
Modelado de la Respuesta en Frecuencia de Transformadores de Potencia tipo Seco para Diagnóstico de Fallas.

Osmar Quiñónez ¹ Pablo Antuña ² Armando Ortiz ¹

1 Itaipu Binacional

2 Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”

Paraguay

RESUMEN

En los últimos años, el Análisis de la Respuesta en Frecuencia (FRA) se ha convertido en una de las técnicas de uso más extendido para el diagnóstico de fallas en transformadores, y es hoy considerada un ensayo esencial para la obtención de un diagnóstico correcto. El ensayo FRA posee dos desventajas principales: la dependencia de un especialista para la interpretación de los resultados y la falta de criterios objetivos de interpretación. En el presente trabajo se propone una metodología que permite deducir ciertos criterios para la detección de cortocircuito entre espiras en transformadores de potencia tipo seco. La obtención de estos criterios de interpretación representa un avance significativo en la aplicación de la técnica FRA para el diagnóstico de este tipo de transformadores.

La herramienta utilizada es el modelado de la respuesta en frecuencia que arroja el ensayo realizado al transformador bajo estudio. El modelo utilizado es el llamado *modelo de Pleite*. Este es un modelo ventajoso por no necesitar datos de fabricación del transformador, por permitir un ajuste satisfactorio a las curvas reales y por facilitar la interpretación de los fenómenos físicos que ocurren dentro del equipo en el caso de una falla. En el presente trabajo nos enfocamos en la aplicación de la metodología propuesta para el diagnóstico de transformadores de potencia del tipo seco. Específicamente, utilizamos el método de modelado para el diagnóstico de los Transformadores de Excitación Positiva de la Itaipú Binacional.

Este trabajo puede dividirse en tres partes principales. La primera parte trata de la implementación del algoritmo escogido y la utilización del mismo para el modelado de la respuesta en frecuencia de un TEP de la Itaipú Binacional. La segunda parte consiste en el análisis de los resultados obtenidos con el modelado, y la deducción de criterios de interpretación de ensayos FRA a ser utilizados en ensayos futuros. Comparando el modelo de un transformador con cortocircuito entre espiras simulado en su devanado de alta tensión, y el modelo del mismo transformador en estado sano, se llega a ciertos criterios que permiten deducir la presencia o no de una falla en el devanado. La última parte trata del desarrollo de una aplicación informática que facilita la utilización del algoritmo de modelado de manera rápida y eficiente en nuevos ensayos, y la utilización de la aplicación para modelar fallas en transformadores.

1. CONSIDERACIONES INICIALES

El transformador bajo estudio es un Transformador de Excitación Positiva de la Itaipú cuyas características se presentan a continuación. Este equipo pertenecía a la unidad 18A, fase C, que a causa de un cortocircuito entre espiras del devanado del secundario provocó la salida del transformador de operación.

Marca: TRASFOR	Potencia: 3570kVA
Impedancia de corto: 6.86%	Tensión nominal: 10329(+/- 2x2.5%)V/1850V
Frecuencia: 60Hz	Conexión: Estrella-Delta
Standard: IEC 76/726	Clase de aislamiento: F
Fabricación: 2003	
Descripción: monofásico, seco encapsulado en vacío.	

Tabla 1. Características del TEP 18A Fase C

La intención de los ensayos habituales (medición de resistencia óhmica de los devanados, medición de la resistencia de aislamiento, medición de la relación de transformación) realizados en este tipo de transformadores es justamente evitar esta falla en servicio del mismo, que afecta negativamente al sistema de potencia asociado. Con este incidente se constató de manera directa la insuficiencia de los mencionados ensayos para la detección de una falla incipiente en el equipo, por lo que sugiere la utilización de otros ensayos que complementen a los mismos [1], entre ellos el FRA (Frequency Response Analysis).

La ventaja principal que observamos en el FRA es la sensibilidad respecto al tipo de falla a tratar (cortocircuito entre espiras), además de traer consigo una desventaja relativa que es la falta de criterios de interpretación de los resultados que arroja este ensayo, por lo que muchas veces finaliza en un diagnóstico equivocado del estado del transformador.

1.1 El ensayo FRA.

El ensayo FRA básicamente consiste en la aplicación de una señal sinusoidal variable en frecuencia en un amplio rango (10Hz – 3MHz) en unos terminales del equipo, midiendo la respuesta en otros terminales del mismo equipo. Esto es, obtenemos la función de transferencia del equipo. Este ensayo asocia al transformador como una impresión digital, la cual varía cuando varían las condiciones electromagnéticas en la que se encuentra el equipo.[2]

1.2 El modelo de Pleite

El resultado del ensayo FRA es la función de transferencia del equipo en cierto estado (con o sin falla) como se muestra en la Figura 1. Vemos que ésta respuesta está caracterizada por picos, los cuales pueden ser modelados por celdas (circuitos) RLC, con la misma señal de entrada utilizada en el ensayo, estos picos serían los puntos de resonancia de las celdas, se puede apreciar lo expuesto en la Figura 2. Se modela un pico con una celda, esto es, cada pico podría tener una celda asociada a él, para luego conectar las celdas en serie, Figura 3. Se puede constatar que cada celda es preponderante únicamente en el rango de frecuencias en el que se encuentra al punto resonante al cual está asociada dicha celda, saliendo de este rango de frecuencias prácticamente no tiene influencia en el resto del circuito.[3]

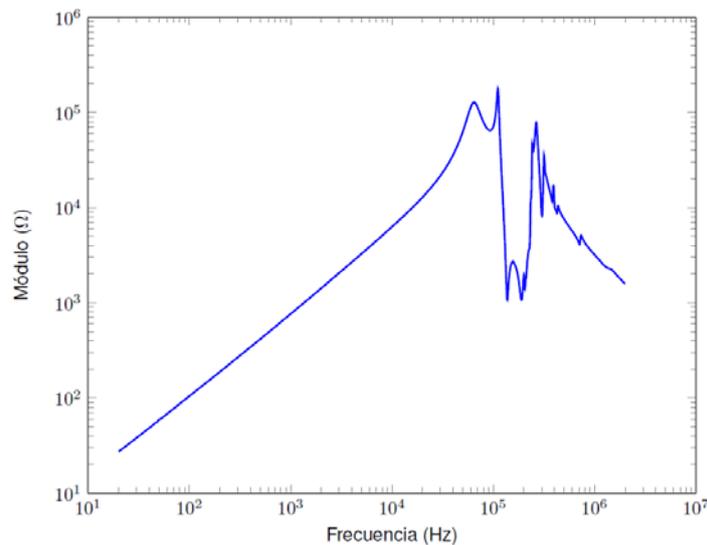


Figura 1. Respuesta en frecuencia típica de un transformador de potencia obtenida a través del FRA.

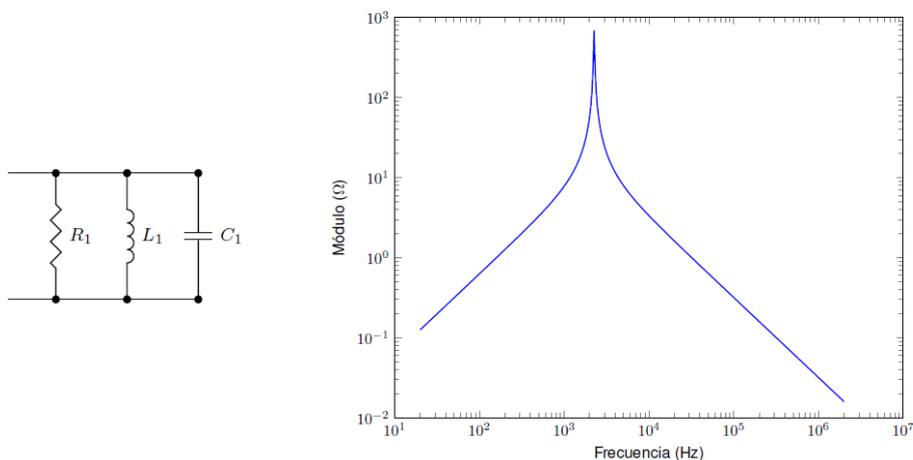


Figura 2. Respuesta de una sola celda compuesta por elementos R, L y C conectados en paralelo. El patrón es una pendiente ascendente hasta llegar a cierta frecuencia de resonancia para luego tener una pendiente descendente.

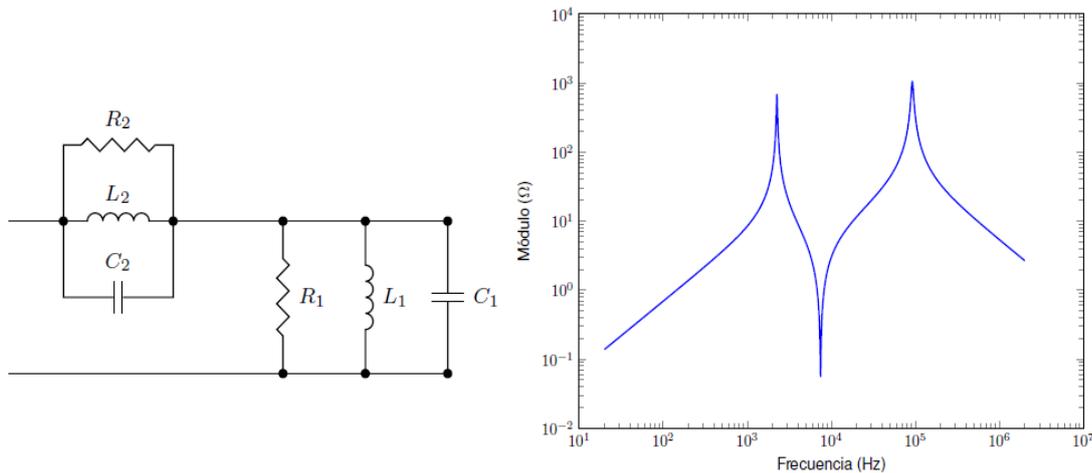


Figura 3. Respuesta de dos celdas conectadas en serie. En este caso se puede observar dos frecuencias de resonancia, correspondientes a las dos celdas. También es notable que la presencia de la segunda celda no afecta a la impedancia en la cercanía del primer punto de resonancia. Es decir, la segunda celda es opaca en el rango de predominancia de la primera celda.

Pleite también ofrece un método asociado al modelo que permite calcular los parámetros, esto es, un algoritmo que obtiene los valores R, L y C de cada celda de tal forma que la respuesta del circuito sea lo más cercana posible a la respuesta del transformador. Este algoritmo se basa en la minimización de una función error.

2. APLICACIÓN DEL MODELO

Describimos rápidamente una propuesta para el cálculo de parámetros del modelo diferente al método propuesto por Pleite, para enseguida mostrar los resultados obtenidos con este algoritmo.

2.1 Método directo para el cálculo de parámetros

El modelo de Pleite fue implementado alterando el método de cálculo de los parámetros, pues el método iterativo propuesto presentó problemas de convergencia como también problemas de incoherencia física, valores negativos de R, L y C no tienen un significado físico convencional, por lo que estos resultados fueron considerados inaceptables.

El método propuesto en este trabajo es un método de cálculo directo de los parámetros. El método consiste en fijar de antemano la frecuencia de resonancia de una celda, que se puede obtener fácilmente con la respuesta del transformador. El módulo de la impedancia alcanza un máximo para esa frecuencia, que es igual a R. Ya que R es fija y es posible escribir L en función de C para la frecuencia de resonancia, nuestra función error queda limitada a una única variable, queda sencillo determinar el mínimo de esta función, y así obtener L y C.

2.2 Implementación del algoritmo para la obtención de parámetros

A continuación se presenta los resultados obtenidos con la implementación del modelo a los ensayos realizados en el TEP en cuestión. Nos centramos en el modelo a frecuencias medias, en el rango de 10kHz a 500kHz pues de la literatura constatamos que el cortocircuito entre espiras causa variaciones en las curvas en este rango de frecuencias. Como las respuestas de los ensayos se caracterizan por dos picos a estas frecuencias utilizamos dos celdas para el modelo.

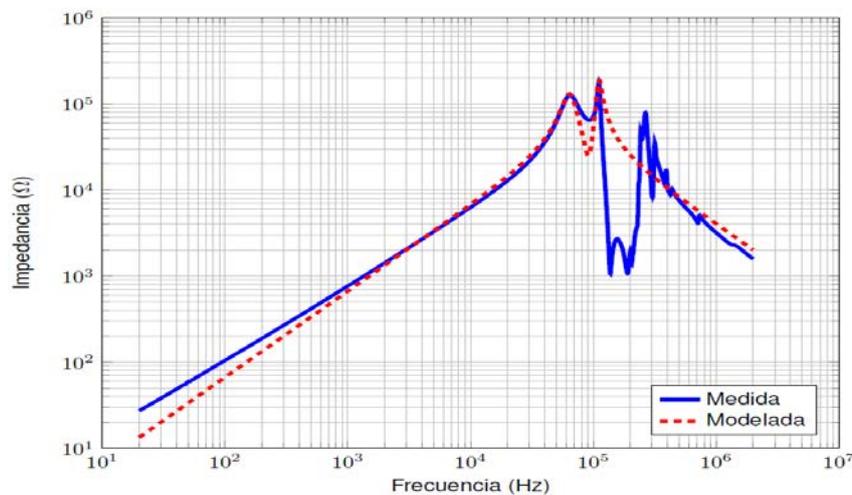


Figura 4. Curva módulo de impedancia. Bobina de alta tensión, configuración abierto.

Celda 1	Celda 2
Rango: 37000 – 84000 Hz	Rango: 97000 – 114000 Hz
R1: 127.411 kΩ	R2: 178.153 kΩ
L1: 81.898 mH	L2: 24.340 mH
C1: 74.411 pF	C2: 84.837 pF
ERP: 15.03%	
Método de cálculo: Directo	

Tabla 2. Datos del modelo obtenido para el ensayo en la bobina de alta tensión, configuración abierto.

La Figura 4 nos muestra la curva real obtenida del ensayo (azul) y superpuesta la curva arrojada con el modelo de dos celdas (roja), notemos que a través del método de cálculo directo obtenemos un error relativo porcentual (ERP) del 15% lo que es aceptable, la Tabla 2 resume los resultados del modelo.

3. OBTENCIÓN DE CRITERIOS DE INTERPRETACIÓN

Primeramente describimos la simulación de cortocircuitos entre espiras del transformador, luego evaluamos los resultados, obtenemos los criterios de interpretación para finalmente conjeturar un comportamiento apuntando a cuantificar el porcentaje de espiras cortocircuitadas a través del porcentaje de variación de los parámetros del modelo.

3.1 Simulación del cortocircuito entre espiras del transformador

Esta simulación es realizada a través de la conexión de diferentes tap's del devanado de AT, obteniendo así tres estados, el estado de *Referencia* o estado *sano*, el estado con la *primera falla* y el estado con la *segunda falla* o *falla agravada*. Se muestra a continuación la configuración de conexión de los tap's para los diferentes estados (Figura 5).

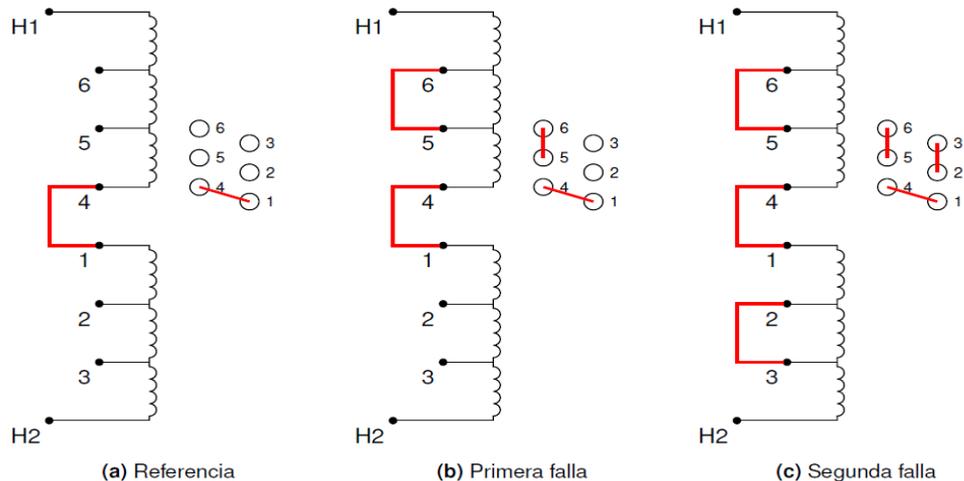


Figura 5. Conexión realizada para el estado de referencia y los estados de falla simulada. La segunda falla representa una falla más grave porque corresponde a un porcentaje mayor de espiras cortocircuitadas.

3.2 Modelado de las respuestas en frecuencia y evaluación de los resultados

A continuación mostramos en la Figura 6 los resultados reales de los ensayos. Se constata que el patrón gráfico es un desplazamiento para la derecha cuando se presentan las fallas.

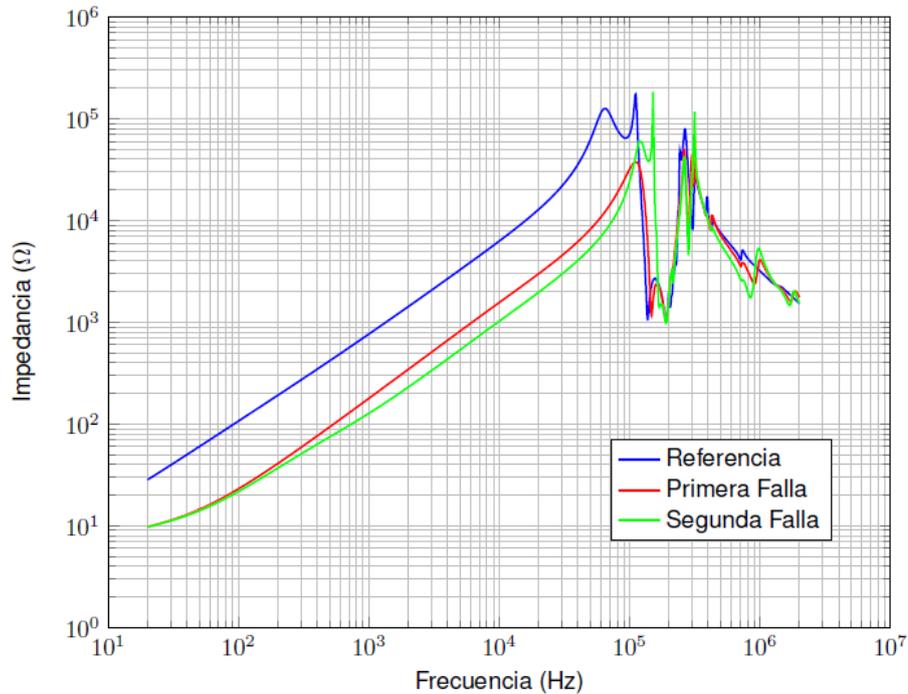


Figura 6. Resultados de los tres ensayos FRA en el devanado de alta tensión, configuración abierto: en estado de evaluación, con la primera falla y con la segunda falla.

Se muestran a continuación cada curva con su respectivo modelo (Figuras 7,8 y 9)

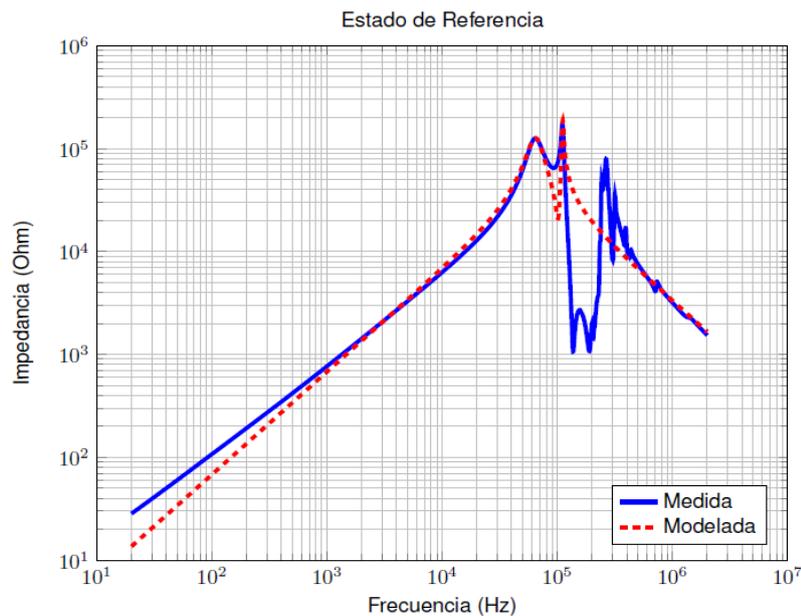


Figura 7. Resultados del modelado, estado de evaluación, devanado de alta tensión.

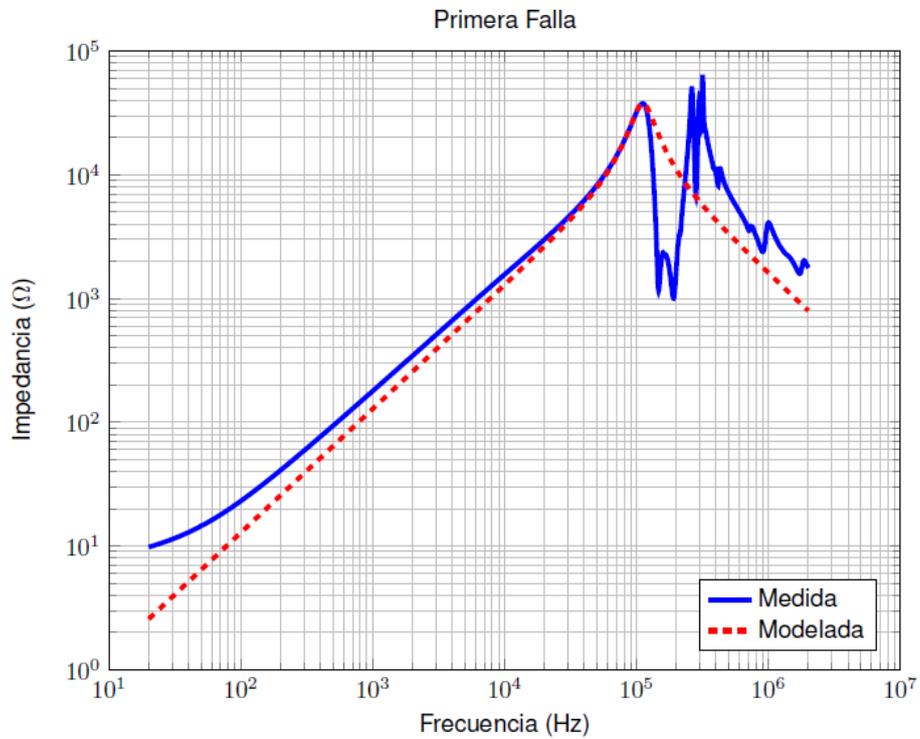


Figura 8. Resultados del modelado, primera falla, devanado de alta tensión

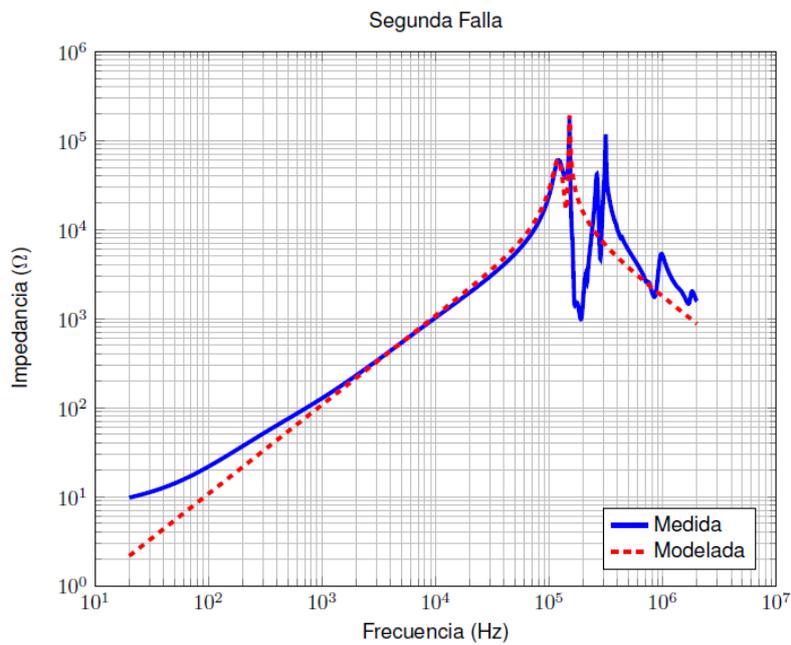


Figura 9. Resultados del modelado, segunda falla, devanado de alta tensión.

	Referencia	Primera Falla	Variación	Segunda Falla	Variación
R1	126.384 kΩ	37.654 kΩ	-70.21%	60.092 kΩ	-52.45%
L1	98.967 mH	20.445 mH	-79.34%	13.610 mH	-86.25%
C1	61.107 pF	100.230 pF	64.02%	129.140 pF	111.33%
R2	174.550 kΩ	-	-	184.109 kΩ	5.48%
L2	9.269 mH	-	-	3.561 mH	-61.58%
C2	222.760 pF	-	-	313.800 pF	40.87%

Tabla 3. Resumen de los resultados del modelo con simulación de cortocircuito entre espiras, devanado de alta tensión.

En la Tabla 3 podemos observar un resumen de los resultados que arrojaron el modelo, con esto percibimos un patrón de variación en cuanto a parámetros inductivos y capacitivos. Se observa una disminución de los parámetros inductivos, así como un aumento de los parámetros capacitivos, en una razón que parece estar relacionada con la gravedad de la falla, ya que cuando la falla se inicia la razón de aumento o disminución es considerable mientras que con la falla agravada la razón decrece.

Esta variación en los parámetros inductivos y capacitivos era de esperarse pues se asocian con el desplazamiento de la curva que representa la respuesta en frecuencia.[4]

3.3 Correlación de variación de parámetros con la severidad de la falla

Haciendo mediciones óhmicas del devanado con las diferentes conexiones de los tap´s obtuvimos los datos que nos permitieron calcular la resistencia del arrollamiento entre los tap´s conectados para la simulación de la primera falla y la falla agravada.

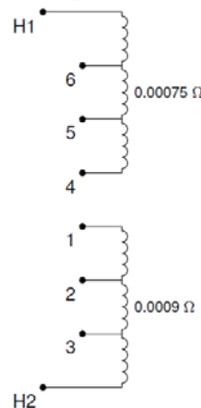


Figura 10. Las resistencias entre los puntos 2 y 3, y los puntos 5 y 6 son calculadas usando las mediciones hechas.

La Tabla 4 nos muestra la resistencia del devanado para el estado de referencia, estado de evaluación con la primera falla y para el estado de evaluación con la segunda falla, así como la variación de esta resistencia respecto a la de referencia, obteniendo al final el porcentaje de espiras cortocircuitadas.

Estado	Tap's cortocircuitados	Resistencia	Variación de resistencia	Espiras cortocircuitadas
Referencia	4-1	0.03597Ω	0%	0%
Primera falla	4-1 y 6-5	0.03522Ω	-2.09%	2.09%
Segunda falla	4-1, 6-5 y 2-3	0.03432Ω	-4.59%	4.59%

Tabla 4. Porcentajes de espiras cortocircuitadas en las fallas simuladas.

Para poder visualizar la correlación graficamos la variación de los parámetros vs. el porcentaje de espiras cortocircuitadas.

En la Figura 11 observamos el gráfico de los puntos que corresponden a la variación del parámetro inductivo de la primera celda en función a la severidad de la falla.

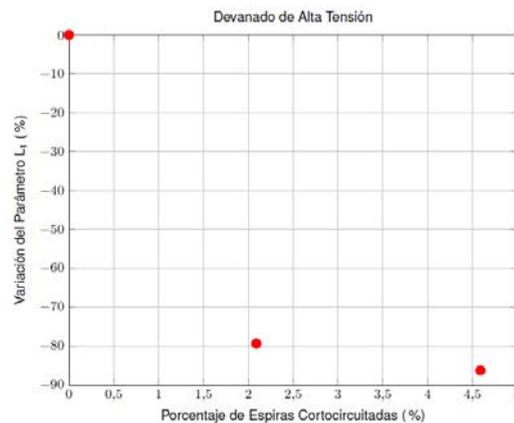


Figura 11. Variación del parámetro L₁ respecto a su valor en el estado de referencia, en los tres estados del devanado de alta tensión.

De la Figura 11 podemos notar que los puntos pertenecen a una ecuación del tipo $y = A(1 - e^{-Bx})$, entonces ajustamos una curva de este tipo que pasa por los puntos en cuestión.

El parámetro inductivo de la segunda celda tiene el mismo comportamiento, al igual que los parámetros capacitivos

Los resultados de los ajustes de curvas se resumen en la Figura 12.

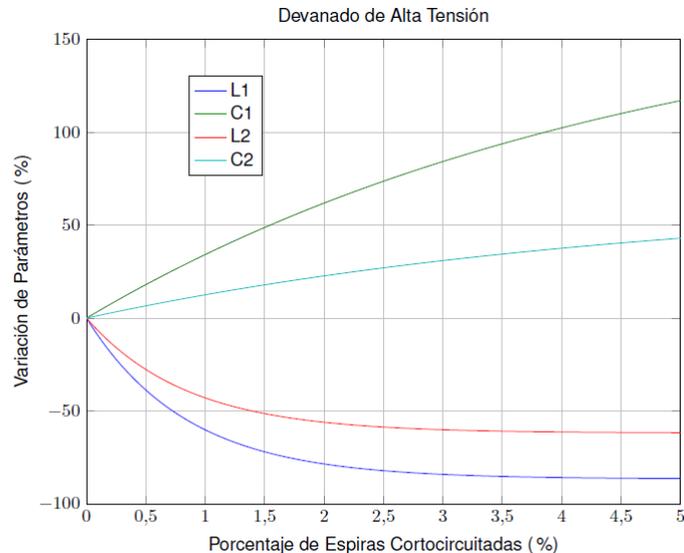


Figura 12. Variación de los parámetros L1, C1, L2 y C2 del devanado de alta tensión en función al porcentaje de espiras cortocircuitadas.

En este punto concluimos que: el cortocircuito entre espiras está caracterizado por un patrón de variación de los parámetros del modelo, disminución de las inductancias y aumento de las capacitancias; debido al comportamiento exponencial expuesto anteriormente entre la variación de parámetros y la severidad de la falla, el modelo es muy sensible a alteraciones incipientes, esto es, la falla es detectable al iniciarse el cortocircuito, por más pequeño que este sea, lo que asegura la vida útil del equipo, haciendo el mantenimiento totalmente preventivo.

4. APLICACIÓN INFORMÁTICA DESARROLLADA

Fue desarrollada una aplicación informática que facilita la aplicación de la metodología de modelado presentada. He aquí una descripción general de la misma:

- Importación de datos de ensayos directamente en el formato utilizado por el fabricante del instrumento de medición.
- Conversión automática de los datos de función de transferencia a impedancia. Los instrumentos de medición generalmente proveen la respuesta del transformador en forma de función de transferencia, mientras que para el modelado se requiere la variación de la impedancia en función de la frecuencia. Esta operación es realizada de manera automática por la aplicación al importar un nuevo ensayo.
- Graficado de hasta dos respuestas en frecuencia para su comparación.
- Síntesis automática del modelo de la respuesta en frecuencia del ensayo seleccionado.
- Graficado de la respuesta medida y la respuesta del modelo, que permite la verificación de la validez del modelo.
- Actualización automática del gráfico de respuesta del modelo al variar manualmente los parámetros.
- Cálculo de los parámetros utilizando los métodos de Pleite y el cálculo directo.

- Simulación de cortocircuito entre espiras de diferentes severidades, usando los datos obtenidos en este trabajo.
- Exportación de todas las curvas, tanto medidas como de modelos, a un formato estándar utilizado por los softwares de instrumentos de medición.

La aplicación fue desarrollada completamente en Java. Una de las ventajas de utilizar este lenguaje es la portabilidad de la aplicación.

Algunas imágenes de la aplicación se muestran en las Figuras 13 y 14.

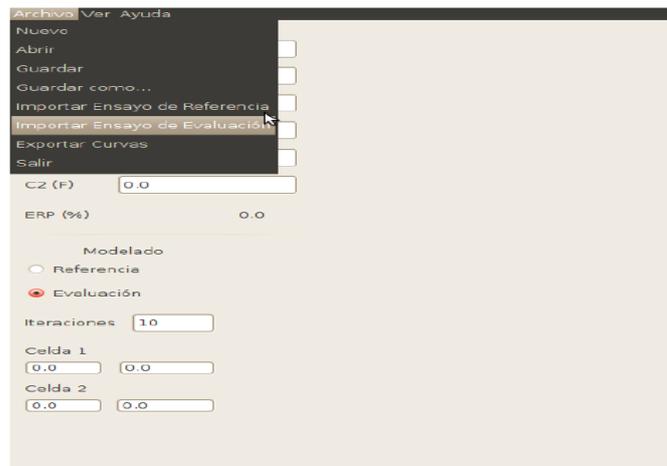


Figura 13. Función importar de la aplicación. Se pueden importar dos ensayos a la vez, uno utilizado como referencia y otro utilizado como ensayo de evaluación.

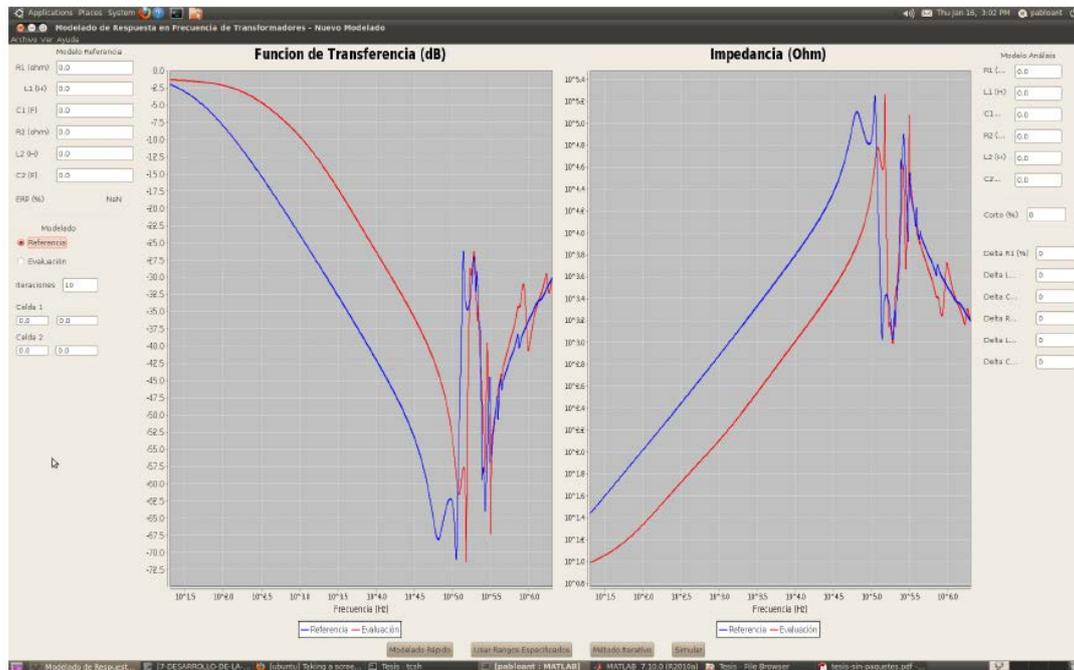


Figura 14. Dos ensayos fueron importados, uno de referencia y otro de evaluación. Las curvas de los dos ensayos pueden ser comparadas.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolla una metodología de modelado de respuesta en frecuencia de transformadores, con la finalidad de facilitar la detección y el diagnóstico de fallas en los mismos utilizando el ensayo FRA. Los principales aportes son:

- **Modelado de la respuesta en frecuencia de transformadores de potencia tipo seco.** Son escasos los trabajos que se enfoquen en este tipo de transformadores. En este trabajo se implementó el método de Pleite para el modelado de la respuesta en frecuencia de los TEP's de la Itaipú. Los resultados obtenidos con el modelado pueden servir de referencia para trabajos futuros.
- **Deducción de criterios de interpretación para el ensayo FRA.** Se llega a una relación cuantitativa entre la gravedad de un cortocircuito entre espiras y la variación de ciertos parámetros del modelo. Esta variación de los parámetros vienen con cierto significado físico, que facilitan una mejor comprensión de los fenómenos que ocurren dentro del transformador en el caso de este tipo de fallas. El patrón de variación de parámetros obtenidos podrá ser utilizado como criterio de interpretación de ensayos futuros, facilitando así la detección de cortocircuito entre espiras.
- **Desarrollo e implementación de un nuevo método de cálculo de parámetros del modelo de Pleite.** El método iterativo para el cálculo de parámetros en ciertos casos no ofrece resultados satisfactorios. Se resolvió esta situación haciendo un estudio más minucioso de la respuesta en frecuencia de un circuito RLC. La desventaja de este método es que no ofrece un control sobre el error del modelado, pero es una alternativa válida en los casos en que el método iterativo no ofrece resultados satisfactorios.
- **Desarrollo de una aplicación informática para el modelado de la respuesta en frecuencia de transformadores.** La aplicación es compatible con los formatos utilizados por los fabricantes de instrumentos, lo cual facilita y acelera la tarea de modelado de la respuesta en frecuencia. Además la aplicación tiene la capacidad de simular cortocircuito entre espiras y mostrar la variación de la respuesta en frecuencia en el caso de esta falla, basándose en los resultados obtenidos en este trabajo.

Bibliografía.

- [1] Ortiz A., Siqueira M., Henning J., Ramos N. *Análisis de Fallas en Transformadores de Potencia tipos Secos y Propuesta de Ensayos Especiales para Evaluación de Condición.* X Seminario del Sector Eléctrico Paraguayo – CIGRÉ. 2012.
- [2] Chedid, Sergio Alejandro. *Análisis de la respuesta en frecuencia FRA para la evaluación de desplazamientos y deformaciones de devanados en transformadores de potencia.* 5to Congreso Uruguayo de Mantenimiento, Gestión de Activos y Confiabilidad URUMAN. 2008.
- [3] Pleite, Jorge et al. *Modeling the Transformer Frequency Response to Develop Advanced Maintenance Techniques.* 14th PSCC, Sevilla. 2012.
- [4] A., Oguz Soysal. *A Method for Wide Frequency Range Modeling of Power Transformers and Rotating Machines.* IEEE Transactions on Power Delivery. Issue 4, Volumen 4. 1993.