

Evaluación de la Respuesta en Frecuencia del Transformador utilizando un modelo Circuitual de Celdas.

Guillermo Aponte^{1*} Hector Cadavid¹

Julian Martinez¹ Julián Castaño¹ Wilder Herrera¹

(1) Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle.

gponte@univalle.edu.co

Grupo de Investigación en Alta Tensión – GRALTA

Universidad del Valle, Cali – Colombia

<http://gralta.univalle.edu.co>

Recibido 15 de Julio de 2010. Aceptado 01 de Mayo de 2011

Received: July 15, 2010 Accepted: May 01, 2011

RESUMEN

Este artículo presenta un modelo circuitual que puede ser empleado para evaluar las curvas obtenidas en la prueba de respuesta en frecuencia del transformador. El modelo es sensible a cambios en la curvas, por lo que puede ser de gran utilidad para determinar las posibles condiciones del transformador que sean las causas de las variaciones. Se hace la descripción del modelo y se muestran algunos casos de su aplicación.

Palabras clave: Transformador, parámetros del transformador, respuesta en frecuencia, modelado, FRA.

Evaluation of the Frequency Response of the transformer using a cell circuit model.

ABSTRACT

This article presents a circuitual model that can be used to evaluate the curves obtained in the transformer frequency response test. The model is sensitive to changes in the curves, so it can be useful to determine any conditions of the transformer which are the causes of variation. It is done the model description and it is shown some application cases.

Keywords: Transformer, transformer parameters, Frequency Response Analysis, modeling, FRA.

1. INTRODUCCIÓN

El transformador es un elemento esencial en el sistema de transmisión de energía para poder prestar un adecuado servicio a los clientes. Un alto porcentaje de fallas mecánicas en los transformadores es debido a la deformación y el desplazamiento de los devanados [1]. Este tipo de problemas es muy difícil de detectar y en muchos casos lleva a la necesidad de reparar o reemplazar el transformador [2].

El análisis de respuesta en frecuencia FRA (Frequency Response Analysis), útil para la evaluación de la condición mecánica de los transformadores, que ha mostrado ser sensible en la detección de estos tipos de daño [1].

Aunque el FRA puede ser una gran herramienta en el diagnóstico de transformadores, presenta dificultad en la interpretación cuantitativa y cualitativa de sus resultados, ya que no existen reglas o guías que definan exactamente a que corresponde una determinada variación.

Una de las alternativas que se ha sugerido para la evaluación de las curvas obtenidas en la prueba es la de emplear modelos equivalentes del transformador [3], [4].

1.1. El FRA

El análisis de respuesta en frecuencia consiste de 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 [5]. 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.

La curva de FRA presenta picos de resonancia y antiresonancia, que dependen de los parámetros RLC de la red compleja del transformador, Fig.1.

Cualquier variación de los parámetros RLC de la red equivalente del transformador producirá cambios en la curva de respuesta en frecuencia, lo que es un indicativo de algún cambio mecánico o eléctrico en su interior.

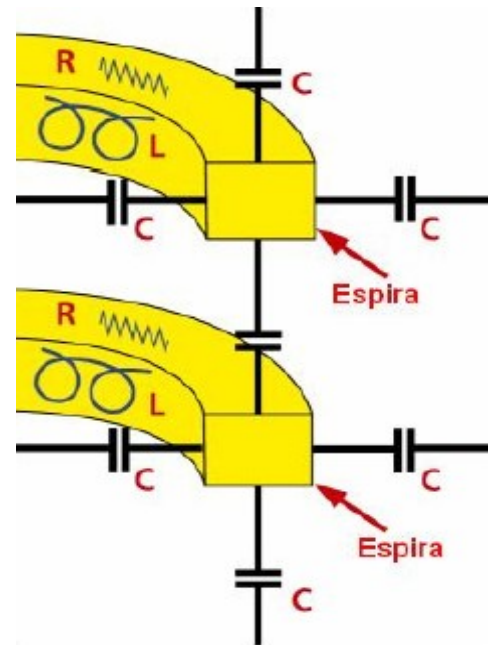


Fig. 1. Red compleja RLC del transformador.

El diagnóstico empleando el FRA está basado en la comparación entre dos curvas, una considerada representativa del estado sano del transformador y la otra de la condición a determinar. Para la comparación se han propuesto algunos factores o índices que cuantifican los cambios entre dos curvas [6], [7]; sin embargo la comparación y detección de cambios se realiza usualmente por inspección visual. Se han propuesto también alternativas para realizar la comparación y el diagnóstico empleando modelos del transformador [8], [9].

Uno de los modelos propuestos es el conformado por celdas RLC [10], que puede replicar la

respuesta obtenida en la prueba del transformador en un determinado ancho de banda; la cantidad de celdas y por ende el orden del modelo depende de las frecuencias de resonancia que puedan ser identificadas en la curva medida.

2. MODELO CIRCUITAL DE CELDAS

El modelo circuital de celdas se obtiene a partir de una curva de FRA medida en el transformador y consiste básicamente en una serie de celdas conectadas en serie, conformadas por tres parámetros eléctricos, R , L , C ; el cual, una vez encontrados los valores apropiados de los parámetros de las celdas, permite reproducir la curva de respuesta en frecuencia obtenida en la prueba [10].

Las celdas están formadas por tres elementos pasivos básicos, la inductancia que representa el almacenamiento de campo magnético; la capacitancia que representa el almacenamiento de campo eléctrico y la resistencia que representa las pérdidas de potencia. Los parámetros eléctricos en cada celda se encuentran conectados en paralelo como se muestra en la Fig. 2.

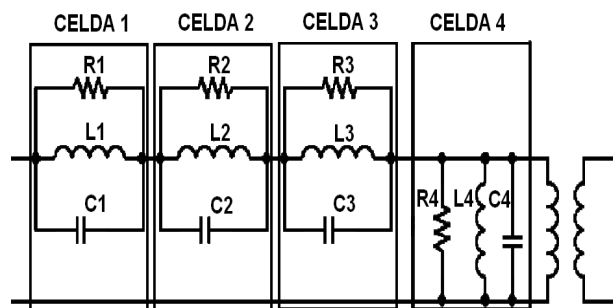


Fig. 2. Modelo constituido por 4 celdas

Cada celda representa un determinado ancho de banda caracterizado por un punto de resonancia y debe funcionar solo en un determinado rango de frecuencia, siendo transparente para los otros rangos, es decir debe comportarse como un

cortocircuito en frecuencias fuera de su rango asignado. El circuito equivalente del modelo en el ancho de banda de la Celda 2 se muestra en la Fig. 3.

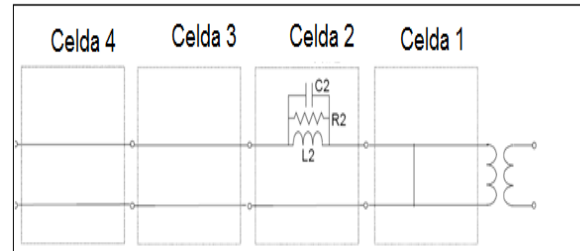


Fig. 3. Circuito aproximado del modelo en el ancho de banda asignado a la Celda 2.

En la Fig 4 se muestra una curva típica FRA de un transformador de potencia, en donde se han identificado los puntos de resonancia (picos) y anti resonancia (valles). Esta curva se puede modelar con cuatro celdas, correspondiendo cada una a un punto de resonancia y dos de antirresonancia. Se tendrá entonces cuatro rangos definidos así: celda 4, puntos 1-2-3, celda 3 puntos 4-5-6, celda 2 puntos 7-8-9 y celda 4 puntos 7-8-9.

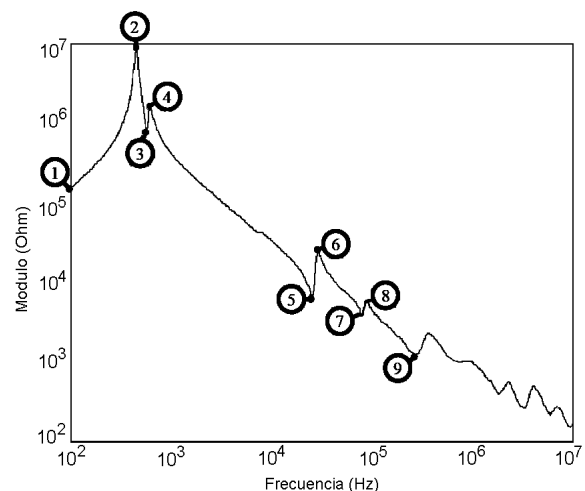


Fig. 4. Identificación de los puntos de resonancia y antirresonancia.

La respuesta en frecuencia del modelo, tendrá también picos y valles a lo largo de todo el ancho de banda, Fig 5. El ancho de banda A1-B1 es el asociado a la respuesta de la primera celda, donde L1 corresponde al flanco de subida, C1 al flanco de bajada y R1 al punto de resonancia.

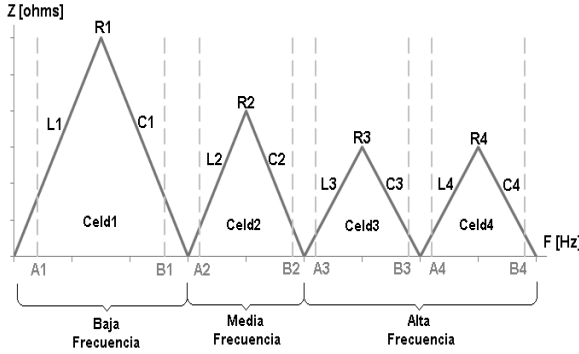


Fig. 5. Respuesta del Modelo

Cada celda se asocia principalmente con un aspecto del comportamiento del transformador: la que está en la banda de baja frecuencia (C1) con efectos en el núcleo, la que está en bandas intermedias de frecuencia (C2) con efectos principales en el devanado y las que están en la banda de alta frecuencia (C3 y C4) con efectos menores en el devanado.

Para elaborar el modelo se parte de una respuesta en frecuencia medida con sus datos entregados en forma de una tabla de impedancia ($R + jX$) y frecuencia (Hz). Cada celda corresponde a la suma en paralelo de las tres impedancias y su admitancia es [10]:

$$Y_M(w, R_k, C_k, L_k) = \frac{1}{R_k} + jwC_k + \frac{1}{jwL_k} \quad (k=1,2,..) \quad (1)$$

Donde k representa el número de la celda.

Los parámetros de cada celda del modelo son obtenidos empleando las siguientes ecuaciones [10]:

$$R = \frac{m}{\sum_{i=1}^m G_R(w_i)} \quad (2)$$

$$L = \frac{\sum_{i=1}^m w_i^2 \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{w_i^2} - m^2}{m \cdot \sum_{i=1}^m w_i B_R(w_i) - \sum_{i=1}^m \frac{B_R(w_i)}{w_i} \cdot \sum_{i=1}^m w_i^2} \quad (3)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m w_i B_R(w_i) \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{w_i^2} - m \cdot \sum_{i=1}^m \frac{B_R(w_i)}{w_i}}{\sum_{i=1}^m w_i^2 \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{w_i^2} - m^2} \quad (4)$$

Donde m es el número de puntos incluidos en el ancho de banda asignada, $Y_R(w) = G_R(w) + jB_R(w)$ es la respuesta de admitancia real en coordenadas cartesianas, G y B son la conductancia y susceptancia en cada punto.

El error entre la respuesta real y la respuesta del circuito modelado en cada punto es [10]:

$$E(R2, C2, L2) = \sum_{i=1}^m |Y_R(w_i) - Y_M(w_i, R2, C2, L2)|^2 \quad (5)$$

Donde Y_R es la admitancia real y Y_M es la admitancia modelada.

El cálculo de los parámetros del modelo a través de las anteriores ecuaciones, supone que todas las celdas del modelo se comportan como cortocircuitos en frecuencias fuera de su banda, sin embargo esto realmente no se cumple y la

impedancia de una celda se ve influenciada por las celdas contiguas. Para corregir este problema y aproximar el modelo a la curva real, se sigue el siguiente procedimiento iterativo [10]:

Inicialmente se calculan los parámetros de la celda de mayor frecuencia, en la banda de frecuencias asignada a partir de la respuesta en frecuencia real.

- El valor de los parámetros del resto de las celdas, se ajustan secuencialmente de acuerdo a su ancho de banda asignado, descontando el efecto de las celdas de más alto orden.
- En las iteraciones siguientes, los parámetros de cada celda son recalculados, en su ancho de banda asignado, descontando el efecto del resto de las celdas.

3. EVALUACION DE LA CURVA EMPLEANDO EL MODELO

Para realizar la interpretación de las variaciones de las curvas de FRA, se necesitan dos mediciones, una correspondiente al transformador en estado sano y la otra del transformador en el estado de posible falla. Cada curva es modelada por separado usando los algoritmos descritos anteriormente.

Los parámetros de los dos modelos, en estado sano y en estado de falla, son comparados calculando su diferencia en porcentaje, lo cual puede dar una indicación de algún tipo de daño en el transformador, Fig. 6.

4. CASOS DE APLICACIÓN

A continuación se presentan dos casos donde se utilizó el modelo para evaluar determinadas condiciones del transformador [11] [12].

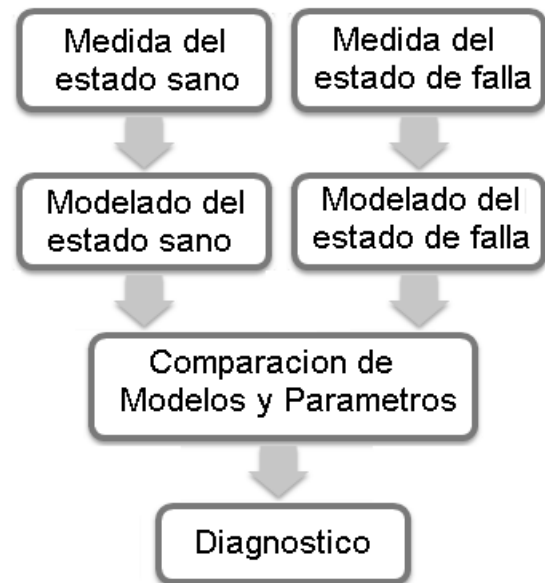


Fig. 6. Aplicación del modelo [10]

4.1 . Caso 1:

El modelo se empleó en un transformador de 90 MVA, 220/115 kV, DYn, al cual se le realizó la prueba FRA inicial (modelo sano); posteriormente se magnetizó el núcleo obteniéndose una nueva curva de FRA (modelo-falla). Las dos curvas se muestran en la Fig 7.

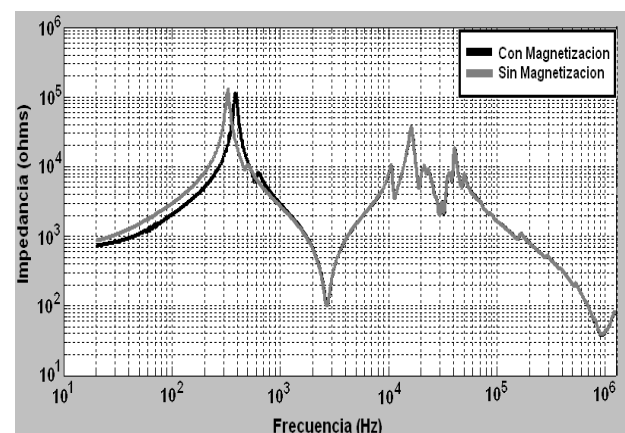


Fig. 7. Curva con y sin magnetización.

Para el modelo se eligieron las 4 celdas indicadas en la Fig 8.

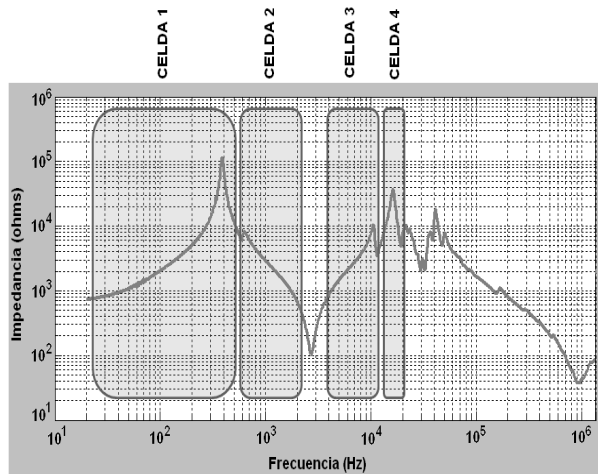


Fig. 8. Selección de los anchos de banda.

En la Fig 9 se muestra para la condición con magnetización, la curva medida y la modelada.

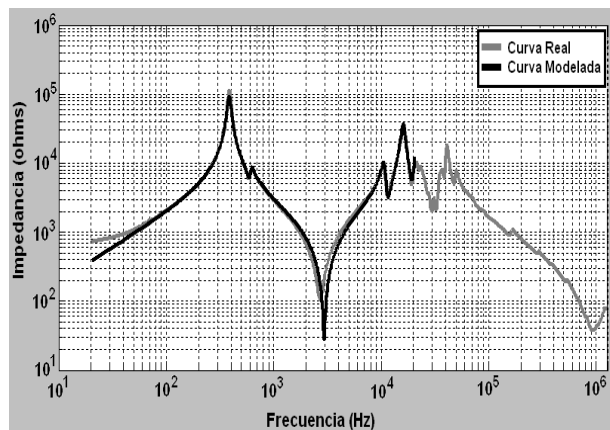


Fig. 9. Curva medida y modelada con magnetización.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros de las celdas obtenidos para los dos casos, junto con las diferencias porcentuales de los mismos.

En la Tabla 1 se pueden observar variaciones considerables de los parámetros en las celdas 1 y 2, que corresponde a bajas y medias frecuencias.

Tabla 1. Valores de los parámetros de las celdas

	Caso Inicial	Con núcleo Magnetizado	Diferencia %
L1	3.9692	2.828	28.751
R1	102105878	111344.5277	8.2974
C1	5.9356E-08	6.0108E-08	1.2514
L2	0.10246	0.086317	15.7539
R2	3223.4917	3267.4121	1.3442
C2	1.0153E-06	7.7053E-07	24.1058
L3	0.0086103	0.0088065	2.2287
R3	7765.0856	7854.9096	1.1435
C3	2.5907E-08	2.5203E-08	2.7205
L4	0.02799	0.027808	0.6506
R4	35394.8964	35881.6576	1.3566
C4	3.4589E-09	3.467E-09	0.2429

La reducción del valor de la inductancia de la celda 1 corresponde a la variación en la magnetización inductancia del núcleo, lo cual a su vez refleja el efecto de la magnetización remanente [13]. También se observa disminución de la inductancia en la celda 2.

4.2 . Caso 2:

Se aplicó también el modelo en un transformador de 45 kVA, 11400/214 V, DYn, que estaba en el final de su línea de producción y aun no había sido llenado con aceite y se le realizaron pruebas de FRA antes y después del llenado. Las curvas con y sin aceite se muestran en la Fig 9.

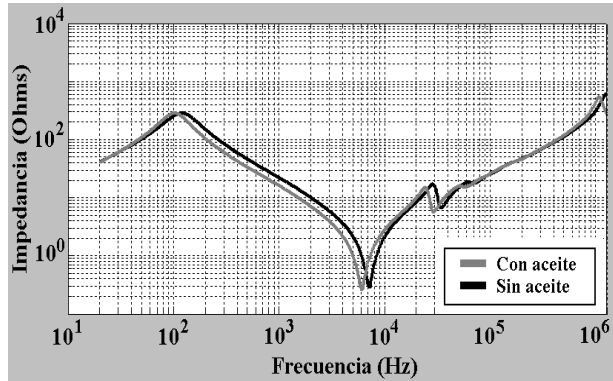


Fig. 9. Curvas de un transformador con y sin aceite.

En este caso se eligieron para el modelo las 3 celdas que se muestra en la Fig10. En la Fig11 se muestra la curva FRA medida junto con la modelada.

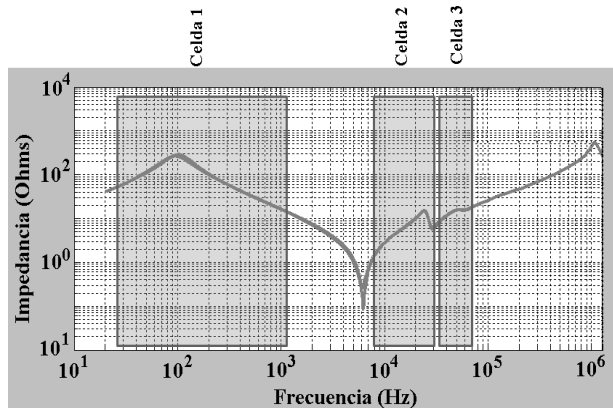


Fig. 10. Curva medida

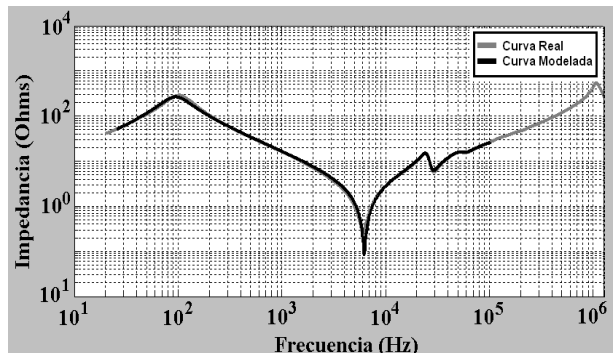


Fig. 11. Curva real y Modelada

En la tabla 2 se muestran los parámetros del modelo para este caso, junto con la diferencia porcentual de los componentes de cada celda.

Tabla 2. Valores de los parámetros de las celdas.

	Con aceite	Sin aceite	Diferencia %
L1	0.295	0.270	9.151
R1	263.234	285.880	7.921
C1	9.370E-06	6.752E-06	38.766
L2	1.325E-05	1.328E-05	0.185
R2	10.680	11.975	10.814
C2	2.985E-06	2.152E-06	38.696
L3	3.781E-06	3.493E-06	8.248
R3	3.756	3.808	1.354
C3	2.324E-06	1.835E-06	26.655

En este caso se observan disminuciones de la capacitancia en todas las celdas del modelo, lo cual está asociado a que la permitividad del aceite es mayor que la del aire, por lo tanto sin aceite las capacitancias del transformador disminuyen. Esto se refleja en el modelo como una variación de la capacitancia en todas las celdas.

5. CONCLUSIONES

Se implementó un modelo del transformador que puede emplearse en la evaluación de las curvas de FRA, compuesto de celdas circuitales, el cual es obtenido a partir de una curva de respuesta en frecuencia medida.

El modelo de celdas muestra ser sensible a los cambios en las curvas, por lo que puede ser una herramienta útil para el análisis de problemas en el transformador empleando la técnica de FRA.

El modelo se empleó para identificar el efecto de la magnetización remanente del núcleo en las curvas de FRA y para detectar cambios en el medio aislante del transformador.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS por su apoyo para el desarrollo de este trabajo.

6. REFERENCIAS

- [1] J. Secue, E. Mombello y C. V. Cardoso, *Revisión del Análisis de Respuesta en Frecuencia (SFRA) para Evaluación de Desplazamientos y Deformaciones de Devanados en Transformadores de Potencia*, IEEE Latin America Transactions, vol.5, no.5, September 2007
- [2] Luwendran Moodley, Brian de Klerk, *Sweep Frequency Response Analysis as a Diagnostic Tool to Detect Transformer Mechanical Integrity*.
- [3] Working Group A2.26, CIGRE, Brochure 342. *Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA)*. April 2008.
- [4] IEC 14/626/CD Committee Draft IEC 60076-18 Ed.1: power transformers – Part 18: Measurement of frequency response, November 2009 60076-18
- [5] Castaño C., Aponte G., Gonzalez C., Garcia A. *El uso de la técnica FRA para el diagnóstico de transformadores*. IX Congreso Latinoamericano y V Iberoamericano en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico, ALTAE 2009, Medellín Colombia, Octubre 25- 28 de 2009. ISBN: 978-958-714-326-3.
- [6] Ryder S.A., *Methods for Comparing Frequency Response Analysis Measurements*, Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 7-10. 2002.
- [7] The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China. Document 15182-2005 *Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers*. December 2004.
- [8] Pleite J., Olias E., Barrado A., Lazaro A., Vazquez J.. *Transformer Modelling for FRA Techniques*. IEEE-PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002 Asia Pacific.
- [9] Pong L., *Modeling a transformer with Doble M series instruments*, Doble Engineering Company, Vol. TX 14 2004.
- [10] Pleite J., *Herramienta de Modelado para el Mantenimiento Predictivo de Transformadores basado en el Análisis de la Respuesta en Frecuencia*. [PhD Thesis]. Universidad Carlos III de Madrid. Madrid 2000.
- [11] Castaño J., *Modelamiento de una bobina de transformador para simular su comportamiento en frecuencia*. [Tesis Pregrado], Universidad del Valle, Facultad de Ingenierías, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Santiago de Cali 2009.
- [12] Martínez J., *Relación de la respuesta del modelo matemático-circuitual con cambios físicos en el transformador*. [Tesis Pregrado], Universidad del Valle, Facultad de Ingenierías, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Santiago de Cali 2010.
- [13] Aponte G., González C., Cadavid. H., Pleite J., Burgos J. C. *The Core magnetization effect on the transformer frequency response*. VI International Workspot on Power Transformer, April 25-28 2010, Foz de Iguazu, Brasil.