

MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE RUIDO EN TRANSFORMADORES MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

MODELING AND ANALYSIS OF NOISE IN TRANSFORMERS USING FINITE ELEMENTS

ABSTRACT

This paper presents a study case based on 3D finite elements, in which a simulation of core power transformer reference is performed, and from this, changes into the geometry of the air gap of the core are made, in order to validate which setup has lower magnetic flux density and hence smaller value of electromagnetic force.

Key words: electromagnetic force, finite element method (FEM), magnetostriction, noise in power transformer.

RESUMEN

En este artículo se presenta un caso de estudio con base en elementos finitos 3D, en el cual se realiza simulación del núcleo de un transformador de potencia de referencia y a partir de este se realizan cambios en la geometría del entrehierro del núcleo; con el fin de validar cuál configuración presenta menor densidad de flujo magnético y por ende menor valor de fuerza electromagnética.

Palabras claves: fuerza electromagnética, magnetostricción, método de elementos finitos (FEM), ruido en transformadores.

Anderson Ramírez Beltrán

Ingeniero Eléctrico
CODENSA S.A.
aramirez@endesacolombia.com.co
Bogotá, Colombia

Edwin Rivas Trujillo

Doctor en Ingeniería Eléctrica Electrónica y Automática
Docente planta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas
erivas@udistrital.edu.co
Bogotá, Colombia

Danilo Alfonso López Sarmiento

Magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones
Docente planta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas
dalopezs@udistrital.edu.co
Bogotá, Colombia

Tipo: Artículo de investigación

Fecha de Recepción: Enero 13 de 2013
Fecha de Aceptación: Marzo 15 de 2013

1. INTRODUCCIÓN

Los transformadores al entrar en operación generan un zumbido característico denominado ruido, el cual está dentro del rango de frecuencias perceptibles al oído humano. Este zumbido dependiendo de su intensidad, puede llegar a ser molesto e irritante. De tal forma que la generación excesiva de ruido de los transformadores puede ser considerado como una forma de contaminación auditiva, al superar los niveles establecidos por las normas ambientales vigentes. [1] [2] [3].

El ruido en transformadores es un problema social más que un problema técnico, por lo tanto con el fin de reducir el nivel de ruido, es muy importante conocer y entender las fuentes de ruido. La predicción del ruido y la comprensión de los factores que contribuyen con el mismo en transformadores de potencia es la razón principal de este proyecto.

Para los transformadores hay tres fuentes de ruido principales:

- Vibración del núcleo, causada por el efecto magnetostrictivo de laminado
- El ruido generado por el funcionamiento de los sistemas de refrigeración tales como ventiladores o bombas de aceite.
- El ruido de carga se genera principalmente por la interacción de la corriente en los devanados y el flujo de dispersión producida por esta corriente de carga.

Este artículo se centra en la presión acústica generada por la vibración del núcleo que se transmite a las superficies del tanque a través del medio de aceite. El tanque responde a estas ondas de presión en función de sus frecuencias naturales y las formas de los modos. Para obtener rápidamente propuestas concretas un esquema de modelado para la simulación numérica de los transformadores con aislamiento de aceite se ha desarrollado. Este modelo se basa en el método de elementos finitos (FEM) y nos permite hacer eficiente el cálculo 3D.

En el artículo se presenta un análisis cualitativo de las fuerzas electromagnéticas presentes en un núcleo que no posee entrehierros, con modelos de núcleo que tienen 1,2 y 3 entrehierros respectivamente (recto y en cuña). Las simulaciones de las fuerzas presentes en el núcleo del transformador se hacen con el programa de elementos finitos COMSOL.

2. ESTADO DEL ARTE

Los primeros estudios en generación ruido en transformadores fueron realizados por investigadores de la AIEE (Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos.) entre 1884 y 1963. Estos estudios fueron encaminados a la identificación de las fuentes generadoras de ruido, y a mecanismos para la mitigación de la transmisión del ruido emitido [4]. Después de 1963 las investigaciones se orientan al desarrollo de nuevos materiales para la fabricación de núcleos con menor emisión de ruido y en el desarrollo de nuevas técnicas para el diseño de transformadores.

En la figura 1 se presenta la línea del tiempo con los trabajos de investigación más representativos acerca de ruido en transformadores de potencia, desarrollados entre 1939 y 2010, para continuar con una breve descripción de cada una de las investigaciones realizadas. B.G. Churcher y J. King et al. (1939) presentaron resultados de pruebas que demuestran que el ruido es generado principalmente en el núcleo y en el embobinado de los transformadores, por lo cual recomiendan que en la etapa de diseño se reduzca la densidad de flujo magnético con el fin disminuir el ruido generado por el núcleo.

Señalan que aleaciones de acero con silicio, presentan un menor efecto magnetostrictivo, es decir un menor índice de generación de ruido. Desde el punto de vista mecánico proponen instalar amortiguadores para evitar la transmisión de las vibraciones generadas desde el núcleo del transformador al tanque y así absorber las vibraciones generadas en el transformador.

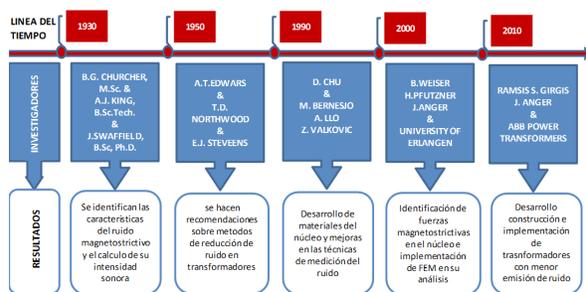


Figura 1. Línea del tiempo del estudio de ruido en transformadores de potencia.

J. Swaffield et al. (1942)[2] realiza una investigación en la que indican que el ruido en transformadores principalmente es debido a los siguientes factores:

- Flujo interlaminar el cual produce la vibración individual de las laminaciones.
- Magnetostricción que es la principal causa de la vibración del núcleo como conjunto.
- Fuerzas entre las bobinas debido a las corrientes del devanado, principal fuente de la vibración de los conductores.

Murray et al. (1949)[4] Estudiaron el ruido en los transformadores ubicados cerca a zonas residenciales, indicando que este es generado por el cambio en las dimensiones en el acero del núcleo, fenómeno producido cuando el núcleo es magnetizado generando fuerzas alternantes, las cuales producen vibraciones en el núcleo, dichas vibraciones son transmitidas con una pequeña atenuación a través del aceite y del tanque al aire circundante, generando un ruido conocido como zumbido.

Definen que la cantidad de ruido emitido y su frecuencia dependen de la inducción, magnetostricción, y la naturaleza del acero así como de las dimensiones lineales y tamaño del núcleo.

Edwards et al. (1957)[5] expresan que la deformación generada en el núcleo es independiente de la dirección del flujo, y que normalmente a una frecuencia de 60 ciclos por segundo produce ruido con frecuencia fundamental de 120 ciclos por segundo, a veces con armónicos importantes a 240 y 360 ciclos por segundos,

siendo la fundamental 10 a 15 decibeles más grande que los armónicos.

A.Ilo et al. (1996) [6] estudiaron la influencia de los parámetros geométricos en las propiedades magnéticas de los modelos de los núcleos de un transformador de referencia.

Z. Valkovic et al. (1996) [7] determinaron la influencia del tamaño de la superposición de las uniones de las láminas, determinando que las imperfecciones en el ensamblaje del núcleo tienen una influencia significativa en el nivel de ruido generado.

En 2000, B. Weiser, H. Pftzner[8], explicaron las diferencias en la generación de ruido entre dos tipos de ensamblaje de núcleos de transformadores, el SSL (single step lap joint assembling) y el nuevo MSL (multistep lap joint assembling). Concluyen que el ruido es generado principalmente por la magnetostricción debida a la magnetización de las partes más largas del núcleo (Brazos y yugo), esto ocurre habitualmente en la dirección X o en la dirección de la laminación.

El modelamiento del nuevo tipo de núcleo MSL, es realizado utilizando el método de elementos finitos, tomando solo una parte del núcleo asumiendo que la geometría total del núcleo es homogénea y simétrica. Simularon los puntos de medida reales, para obtener resultados de las vibraciones típicas de la superficie del núcleo, consiguiendo adicionalmente valores de los desplazamientos y velocidades de la vibración.

De su trabajo se obtienen como principales conclusiones para trabajos posteriores: el exceso de ruido es debido a la magnetostricción fuera de la dirección de la laminación y a las fuerzas magnéticas que actúan entre las hojas del núcleo.

En 2001, investigadores[9] de The University of Erlangen-Nuremberg en colaboración con investigadores de ABB Transformatoren GmbH para el cálculo de las vibraciones de la superficie del devanado y el tanque, utilizaron el método de elementos finitos (FEM) a través

del programa CAPA el cual es usado en el modelamiento del comportamiento dinámico de transformadores de potencia. Para el cálculo de la radiación del sonido en un campo acústico libre aplicaron el método de elementos de contorno (BEM).

En 2012 Yu Sheng Quan y Jiang Shan [10] realizan el cálculo de fuerza mecánica y campo magnético de un modelo de transformador utilizando FEM, en dos dimensiones, donde simuló la fuerza que actúa en los devanados para situaciones de corto circuito.

3. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS

En primera instancia se simula el núcleo de un transformador de potencia de referencia y a partir de este se realizan cambios en la geometría del entrehierro del núcleo, para validar cual configuración presenta menor generación de valores de fuerza electromagnética.

Para verificar que el resultado obtenido tiene concordancia con la teoría presentada en el estado del arte, se realiza una revisión de la concentración de la densidad de flujo magnético, para obtener finalmente el núcleo con menor generación de fuerza electromagnética.

En la figura 2 se ilustra en resumen la metodología propuesta para el análisis de fuerzas electromagnéticas.

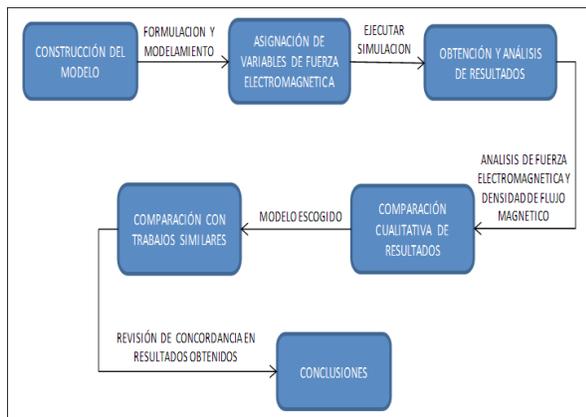


Figura 2. Metodología para el análisis de fuerzas electromagnéticas.

Para la construcción del modelo, se tomaron los parámetros de diseño del transformador (tabla 1) y las dimensiones y área del núcleo (tabla 2). En la tabla 3 se presenta las dimensiones y área transversal de los devanados.

Tabla 1. Parámetros del transformador.

Potencia Nominal	5MVA, Trifásico
Tensión	22KV/11KV
Conexión	Delta-Estrella
Frecuencia	60 Hz
(I Max) devanado de alta	75.8 ^a
(I Max) devanado de baja	262 ^a

Tabla 2. Dimensiones y área del núcleo.

Area neta	23280cm ²	Area bruta	40320cm ²
Alto de ventana	1420mm	Ancho de ventana	600mm
Alto de núcleo	1920mm	Ancho de núcleo	2100mm
Profundidad derecha	415mm	Profundidad izquierda	415mm

Tabla 3. Dimensiones y área trasversal de los devanados

Devanado de baja	11cm x120cm	1320cm ² =0.1320m ²
Devanado de alta	9cm x1200cm	1080cm ² =0.1080m ²

En la figura 3a y 3b se muestran una vista frontal y superior del núcleo respectivamente.

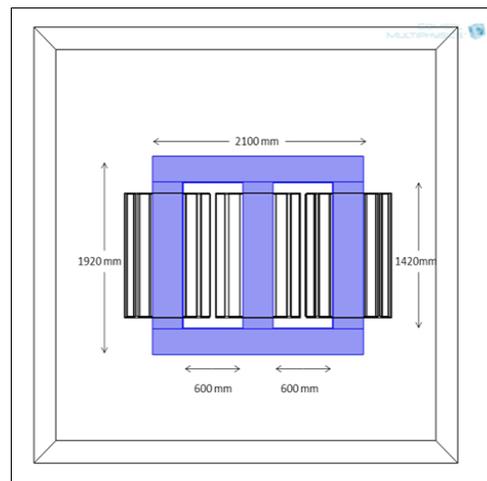


Figura 3a. Vista frontal del núcleo.

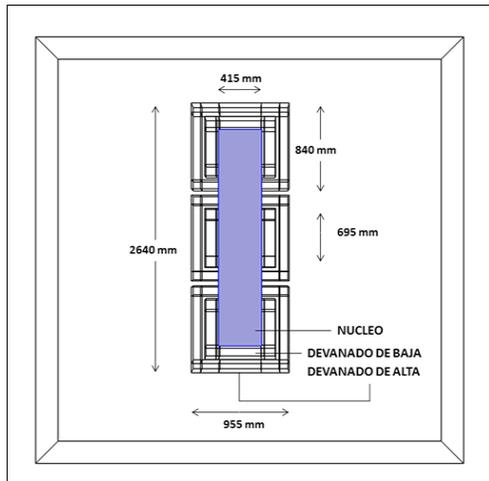


Figura 3b. Vista superior del núcleo.

Los materiales constitutivos del transformador se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Materiales constitutivos del transformador.

Material	Conductividad eléctrica	Permitividad relativa	Permeabilidad relativa
Aceite dielectrico	0,55 S/m	2.2	4.5
Cobre	5,99e7 S/m	1	1
Acero electrico	0.4365	4000	4000

Con la geometría en tres dimensiones del modelo completo del transformador, se asignan las propiedades magnéticas para generar la solución. En la figura 4 se muestra en un diagrama de flujo el proceso realizado.

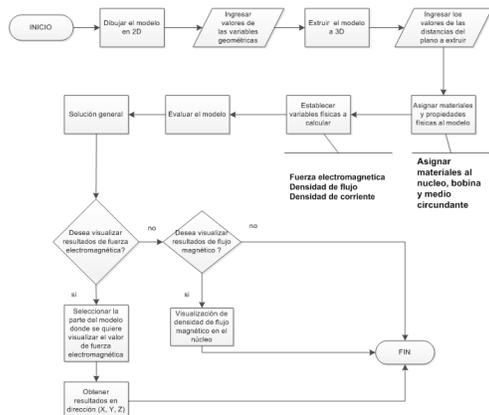


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de modelamiento y calculo con FEM.

4. MODELOS DE NÚCLEOS CON ENTREHIERRO

Para todos los modelos de núcleo que poseen entrehierros, se ha tomado una longitud de entrehierro constante de valor 112mm, dado que lo que se busca es evaluar la concentración de la densidad de flujo magnético y las fuerzas electromagnéticas para diferentes geometrías. En la figura 6.4 se muestran tres tipos de entrehierro seleccionados para modelar el núcleo del transformador, algunos en forma recta y otros en forma de cuña. Las dimensiones de los entrehierros para cada modelo se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Distancia vertical del entrehierro para cada modelo.

TIPO DE CONFIGURACION	DISTANCIA	TOTAL
Un Entrehierro recto	112mm	112mm
Dos Entrehierros rectos	56mm	112mm
Tres Entrehierros rectos	34mm	112mm
Un Entrehierro Cuña	112mm	112mm
Dos Entrehierros Cuña	56mm	112mm
Tres Entrehierros Cuña	34mm	112mm

5. DENSIDAD DE CORRIENTE ELÉCTRICA EN CADA DEVANADO

La corriente eléctrica se representa como una función seno definida en la ecuación (1) y la forma de onda se observa en la figura 5.

$$I(t) = A_0 \text{Sen}(2\pi ft + \beta) \quad (1)$$

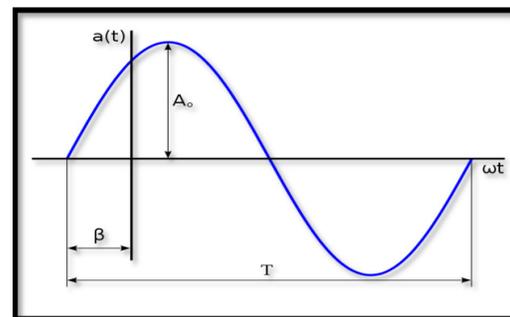


Figura 5. Forma de onda señal de corriente.

Al ser una onda seno, el valor de la corriente I

(t) es mínimo en $t=0$ y máximo en $t= 0,25T$ por lo cual el análisis se realizara para estos dos tiempos.

Tabla 6. Frecuencia y tiempos de estudio.

FRECUENCIA	t_1	t_2
60 Hz	0 s	0.004165 s

Una vez obtenidos los valores de corriente eléctrica se calculan los valores de densidad de corriente eléctrica (tablas 7 y 8).

Tabla 7. Densidades eléctricas en los devanados para t_1 .

t1	β	DEVANADO DE ALTA	DEVANADO DE BAJA
FASE A	$0^\circ=0$ rad	0	0
FASE B	$120^\circ=2,094$ rad	607.95A/m	1719.31A/m
FASE C	$240^\circ=4,188$ rad	607.77A/m	-1718.86A/m

Tabla 8. Densidades eléctricas en los devanados para t_2 .

t1	β	DEVANADO DE ALTA	DEVANADO DE BAJA
FASE A	$0^\circ=0$ rad	70.185A/m	1984.09A/m
FASE B	$120^\circ=2.094$ rad	-350.29A/m	-990.62A/m
FASE C	$240^\circ=4.188$ rad	-351.80A/m	-994.88A/m

Cada devanado se asume como un elemento sólido, es decir no se tiene en cuenta en la simulación el diámetro del conductor, ni tipo de conductor.

6. RESULTADOS

6.1. Análisis de resultados de fuerza electromagnética

Se dividió el núcleo del transformador en cinco secciones (figura 6), con el propósito de asignar a cada sección una variable denominada fuerza. La asignación de fuerzas se muestra en la tabla 9.

Como el modelo es tridimensional la fuerza electromagnética se genera en la dirección (X, Y, Z).

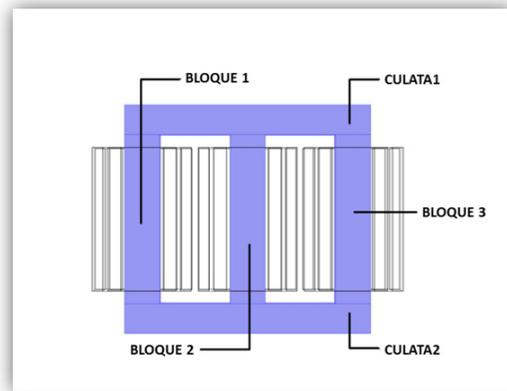


Figura 6. División del núcleo para el análisis de fuerza magnética.

Tabla 9. Tabla de asignación de Fuerzas en el modelo del núcleo.

PARTE	FUERZA
Bloque1	Fuerza1
Bloque2	Fuerza2
Bloque3	Fuerza3
Culata2	Fuerza4
Culata1	Fuerza5

6.2. Análisis de resultados de densidad de flujo magnético

Este análisis se contabiliza (Tabla 10) el aumento (+) o reducción (-) de cada fuerza en cada modelo con entrehierros respecto al modelo de referencia.

Tabla 10. Total de variación de fuerzas electromagnéticas en los modelos.

Tipo de núcleo	-	+
Recto 1EH	13	17
Recto 2EH	16	14
Recto 3EH	10	20
Cuña 1EC	15	15
Cuña 2EC	13	17
Cuña 3EC	7	22

Con base en los resultados condensados en

la tabla 10, el modelo de núcleo que presenta una mayor disminución de los valores de fuerza electromagnética, es el de dos entrehierros. Por lo tanto se realiza el análisis cualitativo de densidad de flujo magnético sobre modelos de núcleos con dos entrehierros rectos y dos entrehierros en cuña, comparado con el modelo de referencia.

Para la visualización de los resultados se procede a realizar un corte en la mitad del núcleo sobre el plano (XY).

6.3. Análisis cualitativo para núcleo de referencia

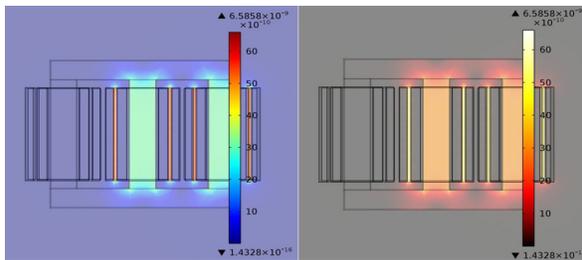


Figura 7. Densidad de flujo magnético para núcleo referencia en t1.

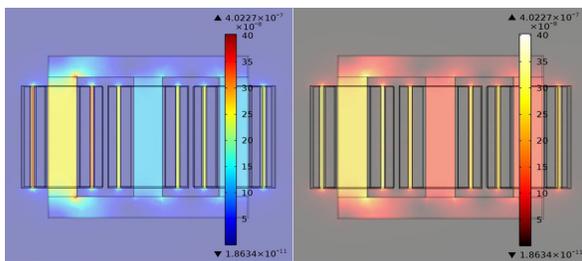


Figura 8. Densidad de flujo magnético para núcleo referencia en t2

En la figura 7 se observa que en la región central del bloque 2 y bloque 3 del núcleo de referencia, hay una distribución uniforme de densidad de flujo magnético, presentándose una mayor concentración en las regiones correspondientes a la unión entre el bloque 2 y 3 y las culatas; igualmente en la figura 8 se observa que existe mayor generación de fuerzas magnetostrictivas en las esquinas de las uniones de las laminaciones del núcleo (ángulos) donde hay mayor generación de ruido.

6.4. Análisis cualitativo para núcleo con dos entrehierros rectos

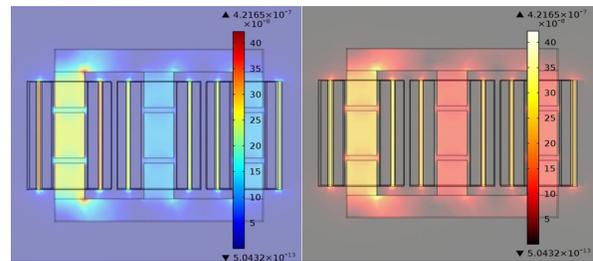


Figura 9. Densidad de flujo magnético núcleo con dos entrehierros rectos en t1.

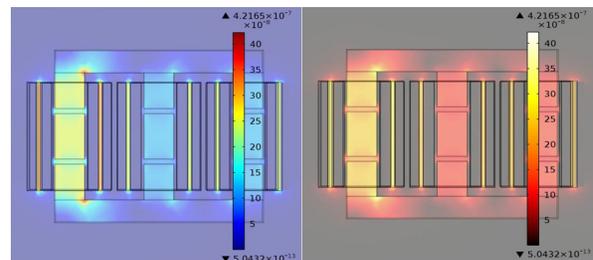


Figura 10. Densidad de flujo magnético núcleo con dos entrehierros rectos en t2.

En la figura 9 se observa una distribución uniforme tanto en el bloque 2 y 3 y sus respectivos entrehierros, sin embargo se presenta un pequeño incremento de la concentración de densidad de flujo magnético.

En la figura 10 se observa una distribución uniforme de la densidad de flujo magnético sobre el bloque 1 y sus respectivos entrehierros, así mismo se muestra un ligero incremento en la densidad de flujo magnético correspondiente a las uniones internas del bloque 1 con la culata 1 y 2 respectivamente.

6.5. Análisis cualitativo para el núcleo con dos entrehierros en cuña

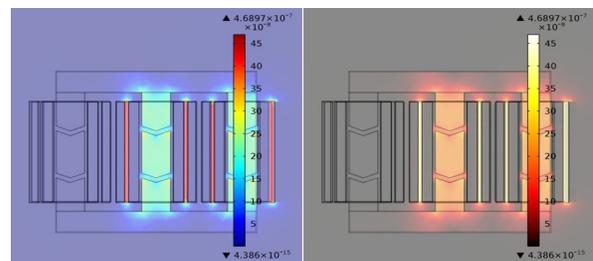


Figura 11. Densidad de flujo magnético para núcleo con dos entrehierros en cuña en t1.

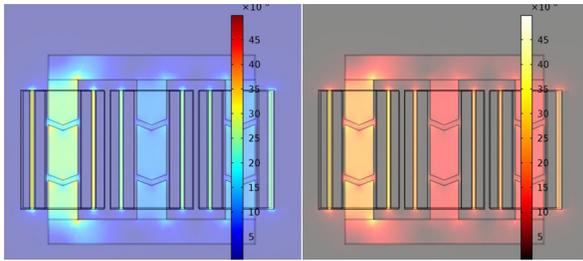


Figura 12. Densidad de flujo magnético para núcleo con dos entrehierros en cuña en t2.

En la figura 11 se observa que a pesar que la distribución en los bloques 1 y 2 son uniformes, se genera en las puntas inferiores de los entrehierros, una alta concentración de flujo magnético. En la figura 12 se observa un incremento notable de la concentración de densidad de flujo magnético en las puntas inferiores de las cuñas del bloque 1, de la misma forma en la unión interna del bloque 1 con las culatas se observa un incremento notable de la densidad de flujo magnético.

El análisis realizado permite concluir que el modelo que presenta menor concentración de densidad de flujo magnético es el modelo de dos entrehierros rectos.

7. CONCLUSIONES

Es necesario tener en cuenta las limitaciones del hardware al momento de ejecutar las simulaciones, dado que entre más fino sea el enmallado y más variables físicas tenga el modelo, mayores recursos computacionales consume el software, generando bloqueos en los equipos que no tengan los recursos necesarios para ejecutar las simulaciones.

Se estableció durante el desarrollo de las simulaciones, que se debe prestar especial atención a la dirección de la corriente que se asigna a los devanados, porque en el caso que no correspondan a las reales generan resultados erróneos en la simulación.

Los modelos implementados para simular el

comportamiento del núcleo de un transformador de potencia con base en cambios de la geometría del entrehierro, a partir de un transformador de referencia permitió hacer la comparación de los valores de fuerza electromagnética, con el fin de determinar el modelo con menor generación de ruido. Se corroboró que la fuerza electromagnética es proporcional a la concentración de densidad de flujo magnético. Por lo tanto los modelos que presentan menores valores de fuerza electromagnética también presentan menor concentración de densidad de flujo magnético.

Los resultados obtenidos permiten establecer que el número de entrehierros y la geometría del mismo en el núcleo del transformador, no es directamente proporcional a la generación de fuerza electromagnética en el núcleo. Sin embargo si se combina la geometría con un número determinado de entrehierros en cuña presentan mayores concentraciones.

Se determinó que en la unión de las laminaciones del núcleo se presenta una mayor concentración de densidad de flujo magnético, lo cual es evidente en los modelos desarrollados en las regiones de unión entre los bloques y las culatas.

8. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Realizar simulaciones de transformadores en 3D donde se incluya el material del tanque, las características físicas del aire como medio externo, para verificar las vibraciones mecánicas generadas al exterior.

Incluir variables como temperatura y establecer la relación existente con la generación del ruido en el núcleo.

Reducir el tiempo de cómputo y la memoria requerida por los modelos.

Establecer la relación existente entre los decibelios generados por el transformador y los valores de fuerza electromagnética presentes en el núcleo y bobinas.

Acoplar los desarrollos realizados en la etapa de diseño de transformadores utilizando FEM,

con la etapa de fabricación y verificar las mejoras realizadas.

Referencias Bibliográficas

- [1] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 627, Bogotá: MAVT, 2006.
- [2] J.Swaffield, the causes and characteristics of transformer noise, British Electrical and Allied Industries Research Association, London, 1942.
- [3] Subdirección de Estudios Ambientales del IDEAM, Documento Soporte Norma Ambiental, MAVDT-IDEAM, Bogotá, 2006.
- [4] Murray et. Al , Transformer Audio Noise Problem on an Electric Power System, AIEE Transactions, vol. 68, pp. 740-752, 1949.
- [5] Edwards et. Al , Transformer Noise Problem-Performance of Acoustic Treatments and Vibration Isolators, de AIEE Summer General Meeting, Toronto, 1957.
- [6] A. Ilo et. Al , Influence of geometric parameters on the magnetic properties of model transformer cores, Journal of Magnetism and Magnetic Materials , vol 160, pp 38- 40, 1996.
- [7] Z. Valkovic, Investigations of core noise levels using a dry-type transformer, Journal of Magnetism and Magnetic Materials , vol 160, pp 205- 206, 1996.
- [8] Weiser et. al, Relevance of Magnetostriction and Forces for the Generation of Audible Noise of Transformer Cores, IEEE transactions on magnetics, vol. 36, n° 5, pp. 3759-3775, 2000.
- [9] J. J. Anger, Combination of Finite and Boundary Element Methods in Investigation and Prediction of Load-Controlled Noise of Power Transformers, Journal of Sound and Vibration, vol. 2, n° 250, pp. 323-328, 2001.
- [10] Yu-Sheng Quan , Mechanical forces and magnetic field simulation of transformer with finite element method , IEEE Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), Pp 1390 – 1393, 2011