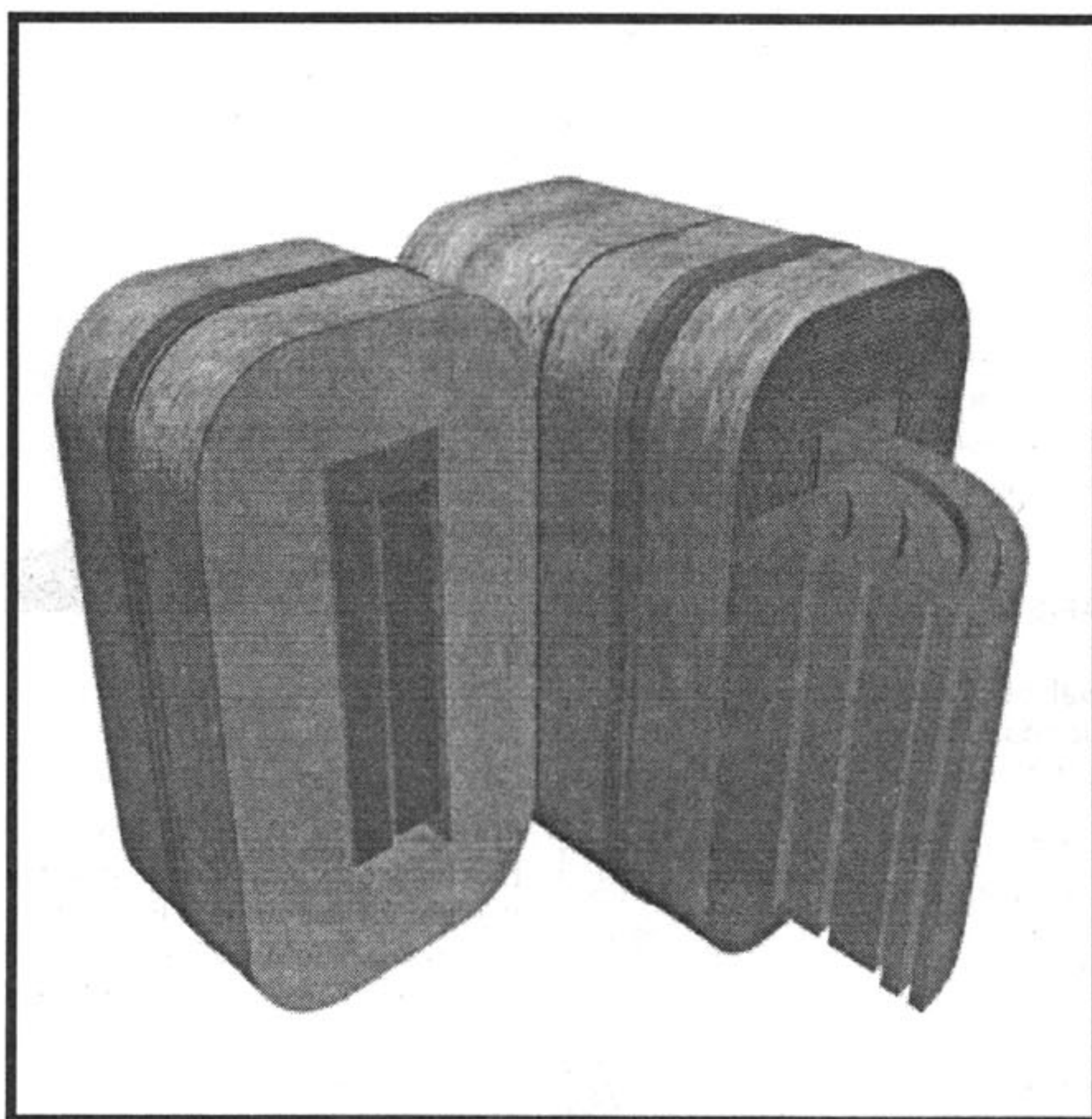


Esfuerzos Mecánicos en Transformadores de Distribución



RESUMEN

Un transformador de distribución durante su vida útil se encuentra sujeto a un estado de carga destructivo ocasionado por corto-circuito.

Este fenómeno ha sido estudiado en transformadores de potencia y literalmente despreciado en transformadores de distribución.

Se mostrará cómo puede hacerse una aproximación a la descripción del comportamiento mecánico a bajo costo.

Se describe un sistema de marcación que permitió medir los desplazamientos relativos acumulativos de las partes de interés del transformador al final de las pruebas de cortocircuito.

El método de elementos finitos permitió cuantificar la magnitud de los desplazamientos y esfuerzos mecánicos del transformador durante el cortocircuito.

PALABRAS CLAVES

Fuerzas Electromagnéticas, Análisis por Elementos Finitos, Electromagnetismo, cortocircuito, Transformadores.

ABSTRACT

A distribution transformer during its working life presents a particular load state caused by shortcircuit situations. This phenomenon has been studied in power transformers

□ **Mauricio Isaacs Agudelo, Ing.**
Ingeniero Analista
J.L.O. Ware Ltda. Colombia.

□ **Guillermo A. J. Pizarro, Ing.**
Ingeniero Analista
J.L.O. Ware Ltda. Colombia.

□ **Yesid Aguilar Castro. M.Sc.**
Profesor Titular
Universidad del Valle.
Colombia.

□ **Héctor Cadavid Ramírez. Ph.D.**
Profesor Titular
Universidad del Valle.
Colombia.

*Unidades de Investigaciones Metalúrgicas
U.I.M*

* La Revista recibió este artículo en Diciembre de 2.001

and neglected in distribution transformers.

Relevance of this phenomenon and how an approach of the mechanic behavior can be done, are shown. The study was done on one-phase and three-phase transformers of 25 kVA and 75 kVA, (13.2 kV/220-110 V) respectively. A mark system proved with success was depicted too. Finite Element Method was employed to show mechanical stresses, displacements and strains during the shortcircuit.

KEYWORDS

Electromagnetic Force, Finite Element, short circuit, transformers.

1. INTRODUCCIÓN

Muchos documentos han sido publicados sobre esfuerzos mecánicos en transformadores de potencia pero la literatura es muy escasa cuando se trata de transformadores de distribución. Esta situación se presenta ya que se cree que un cortocircuito no genera un estado de carga tan severo sobre transformadores de pequeñas potencias. Posteriormente se desarrolla y ejecuta un método que permite físicamente medir los desplazamientos que en el transformador ocurren por efecto del cortocircuito.

Sobre la base de estos pasos se desarrolla y ejecuta una metodología en la que se involucran de manera precisa y muy detallada específicamente qué factores son tomados en cuenta en los modelos, cuáles no y por qué, además del papel que juega cada elemento físico interactuante en el comportamiento mecánico del transformador durante el cortocircuito. No es propósito de esta publicación derivar la formulación para el cálculo de fuerzas y esfuerzos mecánicos que se presentan en el transformador durante el cortocircuito sino que se pretende mostrar el resultado del efecto de estas fuerzas sobre la parte activa de un transformador por medio de la aplicación de la técnica de los elementos finitos, logrando de esta manera obtener los esfuerzos y desplazamientos en los devanados del transformador. El estudio se realizó en transformadores monofásicos de 25kVA y en trifásicos de 75kVA. 13.2kV/220-110V.

2. ANTECEDENTES

Actualmente en Colombia la fabricación de transformadores está orientada principalmente, hacia la distribución. Desde 1993, el Comité de Calidad del Sector Eléctrico exigió la ejecución de las pruebas de aptitud al cortocircuito como requisito para la homologación de los transformadores de distribución en común acuerdo con los fabricantes y se concretaron algunos aspectos del procedimiento para realizar la prueba de corto

circuito.

El acuerdo quedó contemplado en la Norma Colombiana NTC 532. Un estudio estadístico realizado a partir del reporte de las pruebas de cortocircuito realizadas en el Laboratorio de Alta tensión de la Universidad del Valle a 37 transformadores monofásicos y 49 transformadores trifásicos de diferentes potencias, dio como resultado que el 53.5% de los transformadores no pasaron satisfactoriamente la prueba de cortocircuito. Entre las principales anomalías mecánicas registradas durante las pruebas de cortocircuito están los desplazamientos axial y radial de los devanados y el movimiento del núcleo. A nivel eléctrico las anomalías más comunes son las variaciones en la impedancia y en la corriente de magnetización.

La figura 1 muestra la cantidad de transformadores monofásicos y trifásicos que no pasaron la prueba de cortocircuito dependiendo de si cumplieron o no con los requisitos establecidos en la norma nacional NTC 532. [1].

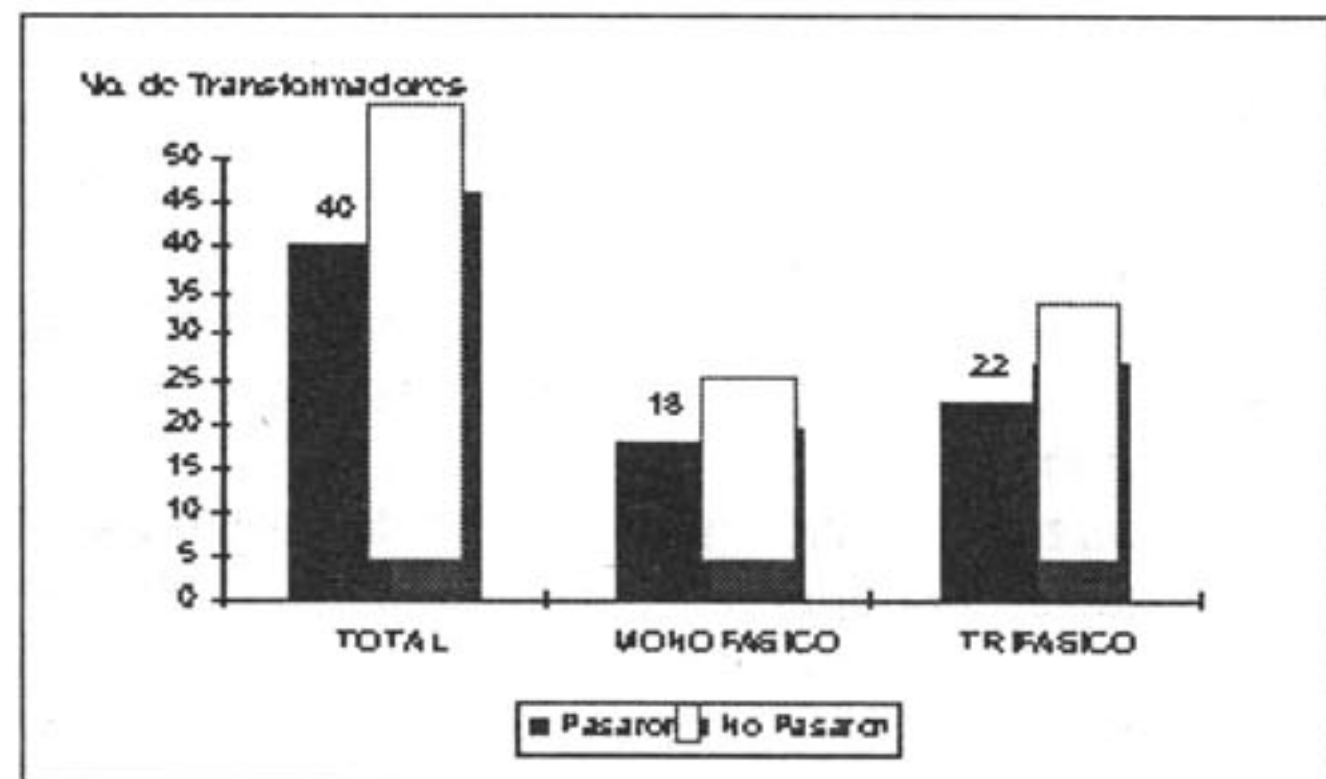


Figura 1. Resultado final de las pruebas.

3. MODELOS MECÁNICOS

En las gráficas de las figuras 2 y 3 se observan las zonas utilizadas para los modelos. Para la elaboración de los modelos mecánicos del transformador se han planteado una serie de suposiciones que regirán el procedimiento mismo del modelamiento. Para ello las suposiciones se han organizado en diferentes grupos según su correspondencia mecánica.

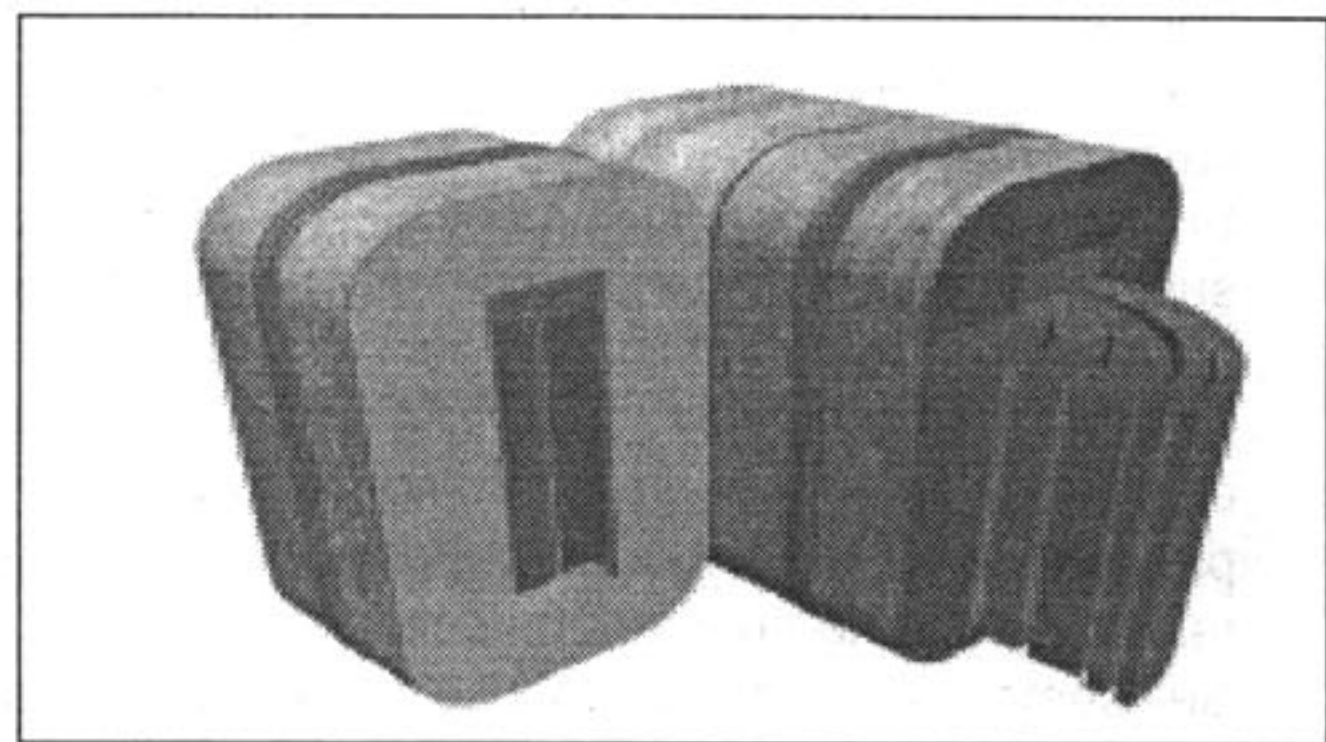


Figura 2. Zona utilizada para los modelos: Dentro de la ventana.

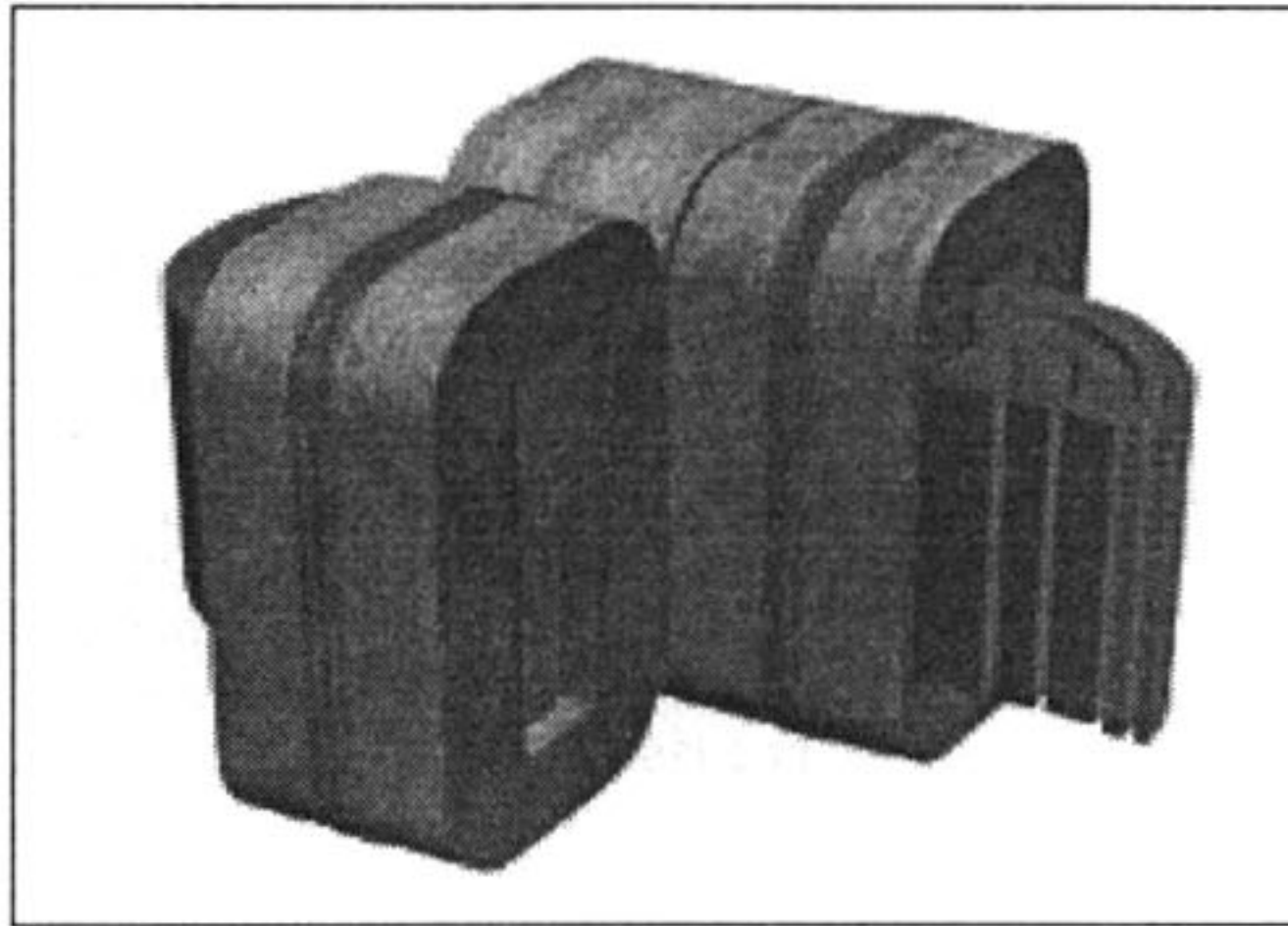


Figura 3. Zonas utilizadas para los modelos: Fuera de la ventana.

3.1. Papel aislante

El papel aislante inicialmente se enrolla alrededor del fleje de cobre; posteriormente cuando la bobina ha sido conformada, ésta se somete a un tratamiento térmico con el fin de que el papel aislante se adhiera al cobre ya que éste se encuentra conformado por una matriz epóxica con incrustaciones de material termofundente.

1. La fuerza de fricción generada por la resistencia al desgarre del papel aislante cuando se adhiere al cobre es despreciable en comparación con las fuerzas a las que es sometido el cobre por efectos del campo magnético.
2. El papel aislante no ofrece resistencia a tensión. El papel actúa como un sistema resorte-amortiguador donde presenta una resistencia importante a compresión en la dirección de las fuerzas radiales. Para la correcta simulación de tal efecto se debe obtener la curva Compresión-Presión procedente del mismo ensayo mecánico. Esta curva será introducida en nuestro modelo como su equivalente en la curva Esfuerzo - Deformación en la zona de compresión y en la zona de tensión se introducirá una línea paralela al eje de deformación de valor constante positivo pero pequeño. No se coloca la línea en cero por causa de alguna posible divergencia en el cálculo y generación de la ecuación matricial. [2]
3. El transformador en el interior del tanque está sumergido en aceite con propiedades dieléctricas y para fines de refrigeración. El papel aislante absorbe parte de ese aceite lo cual varía las condiciones explicadas anteriormente y a su vez la curva Compresión - Presión, sin embargo, este efecto no se tendrá en cuenta en este proyecto.
4. Se asume que durante el proceso de fabricación del devanado y posterior ensamble con el núcleo, no varía el espesor del papel aislante sino que su valor

es idéntico al entregado en los datos técnicos del transformador. En el modelo físico planteado el papel aislante es considerado compresible mientras que el cobre es considerado incompresible por comparación de resistencia a la compresión. [2]

3.2. Aceite

5. El aceite, como tal, alrededor del transformador ofrece un componente mecánico de amortiguamiento que no será introducido en los modelos desarrollados. A su vez, el aceite ofrece un medio convectivo para evacuar el calor generado en el transformador, sin embargo, el fenómeno básico de transferencia de calor y sus consecuencias no son tomadas en cuenta para estos modelos.
6. El efecto de la presión adicional ejercida por el aceite en el momento del corto, tal como se ha observado en algunas pruebas sobre la cuba del transformador por causa del incremento de la temperatura y de la vibración interna, tampoco es tomado en la elaboración del modelo.

3.3. Construcción y configuración

7. Inicialmente se asume que las medidas de diseño proporcionadas en los planos no varían de manera considerable durante la construcción del transformador por lo cual aquellas serán las utilizadas en primera instancia para el desarrollo de los modelos.
8. Las piezas utilizadas en la construcción del transformador para mejorar la sujeción del mismo en el interior de la cuba se reemplazarán por su equivalente mecánico en las restricciones.
9. Se asume que los conectores que provienen de los devanados hacia los bornes de la cuba no ofrecen un cambio mecánico considerable en el sistema físico luego no se incluyen en los modelos y tampoco son considerados como condiciones de borde.
10. La cuba se asume totalmente indeformable por lo cual es plenamente reemplazada por su equivalente en condición de borde para el modelo. Esta suposición no dista mucho de la realidad y de hecho la cuba no sufre deformación plástica.

3.4. Cobre del devanado

11. Se asume que las propiedades mecánicas del cobre no han cambiado con respecto a las originales debido al proceso de fabricación del transformador (trabajo en frío durante la elaboración de los devanados y el cambio de sección que se ejecuta al alambre del devanado de alta tensión, además del tratamiento térmico que se realiza a los devanados para adherir el epóxico del papel aislante con el cobre).

12. La capa de barniz que cubre las espiras de cobre en el devanado de alta tensión no es tomada en cuenta en los modelos, ya que el barniz no ofrece ninguna resistencia mecánica que afecte las deformaciones que se presentan en el cobre durante el cortocircuito, su función es simplemente aislar eléctricamente las espiras del devanado.

3.5. Núcleo

13. No se tiene en cuenta el fenómeno de fricción entre chapas del núcleo. Incluso no se permitirá el desplazamiento de las chapas en dirección perpendicular a su plano de simetría vertical, es decir el movimiento relativo entre chapas es impedido.

3.6. Modelos a elaborar

14. Se asume que el modelo más crítico escogido por los primeros modelos según el «Tap» de Regulación, también es el más crítico en los siguientes modelos a medida que se van perfeccionando éstos [3].

4. UBICACIÓN DE MARCAS

Después de un análisis detallado de la inspección visual y de los datos estadísticos de las pruebas de cortocircuito realizadas con anterioridad al proyecto, se desarrolló y probó una metodología para la medición de los desplazamientos que sufre el transformador después del ensayo de cortocircuito. La metodología consiste en la realización de una marcación en la parte activa del transformador, la cual permite conocer, a través de un método sencillo, la manera en la que ésta se mueve.

En el proceso de toma de medidas para cuantificar los desplazamientos en las distintas zonas de la parte activa del transformador se optó por ubicar una serie de marcas que permitieron observar el fenómeno en vez de cualquier dispositivo adicional externo como transductores u algún otro tipo de instrumento de medición.

La diferencia entre la utilización de los anteriores dispositivos y el empleo de las marcas radica en que estas últimas no alteran el campo magnético ni afectan en lo más mínimo su configuración geométrica.

La característica mecánica predominante es el desplazamiento de ciertas zonas de los devanados, en especial las zonas que se encuentran fuera de la ventana del núcleo por falta de sujeción (figura 4). El problema radica en los grandes desplazamientos de los devanados y no en las deformaciones de éstos. Esta es otra de las razones por las cuales no se emplearon transductores. [3]

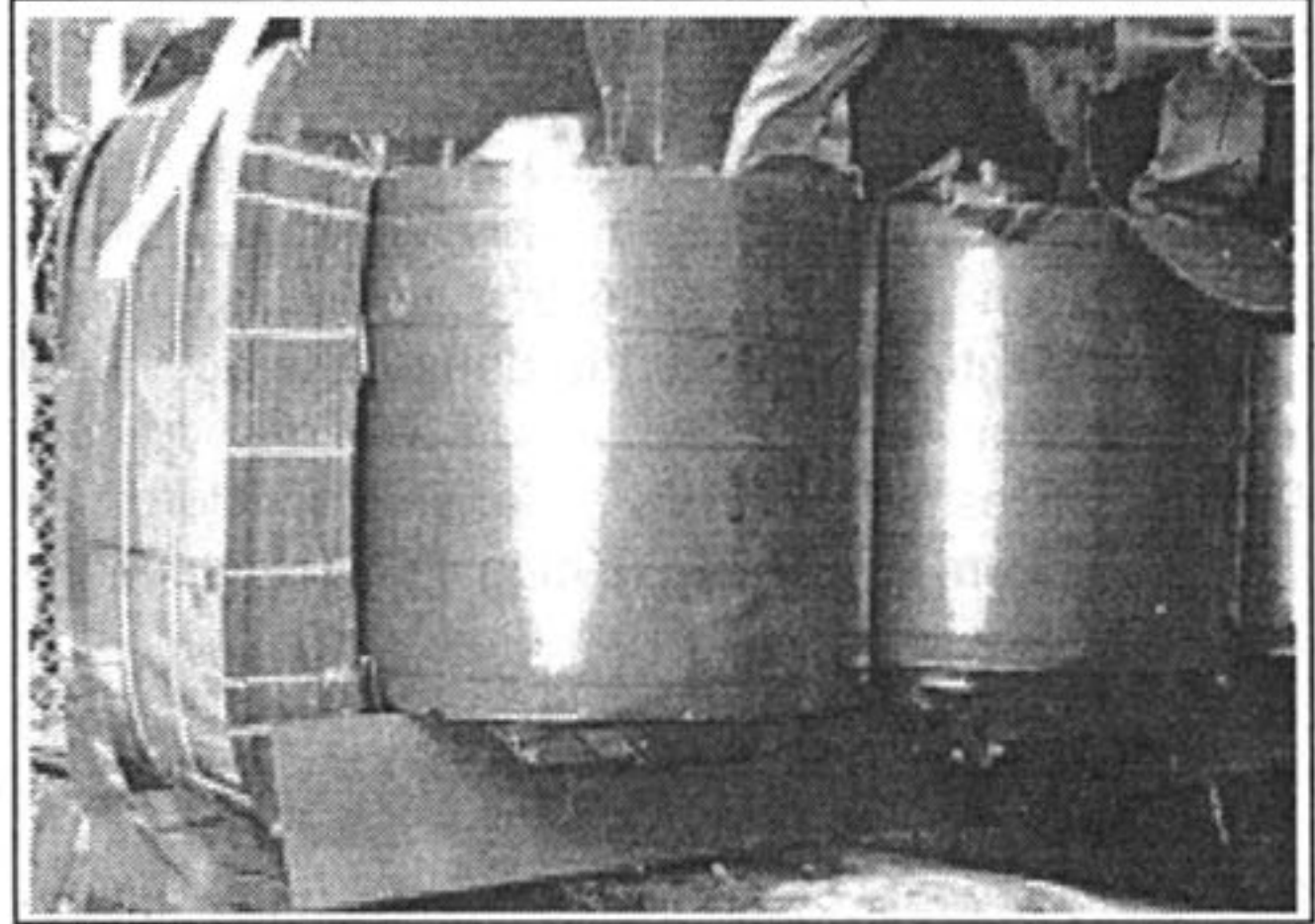


Figura 4. Vista frontal de la zona del medio del transformador trifásico

5. EJECUCIÓN DE MODELOS BIDIMENSIONALES

Hasta el momento se han ejecutado modelos bidimensionales de los devanados de transformadores monofásicos y trifásicos para la zona denominada dentro de la ventana.

La razón por la cual no debe ejecutarse un modelo en dos dimensiones en la zona de fuera de la ventana es la falta de una adecuada representación de las condiciones de borde para los devanados debido a que las restricciones en esta zona son esencialmente de características geométricas.

Los modelos cuya respectiva interpretación será evaluada corresponden a los de la zona dentro de la ventana.

La secuencia utilizada para realizar el modelamiento del transformador se muestra en el figura 5.

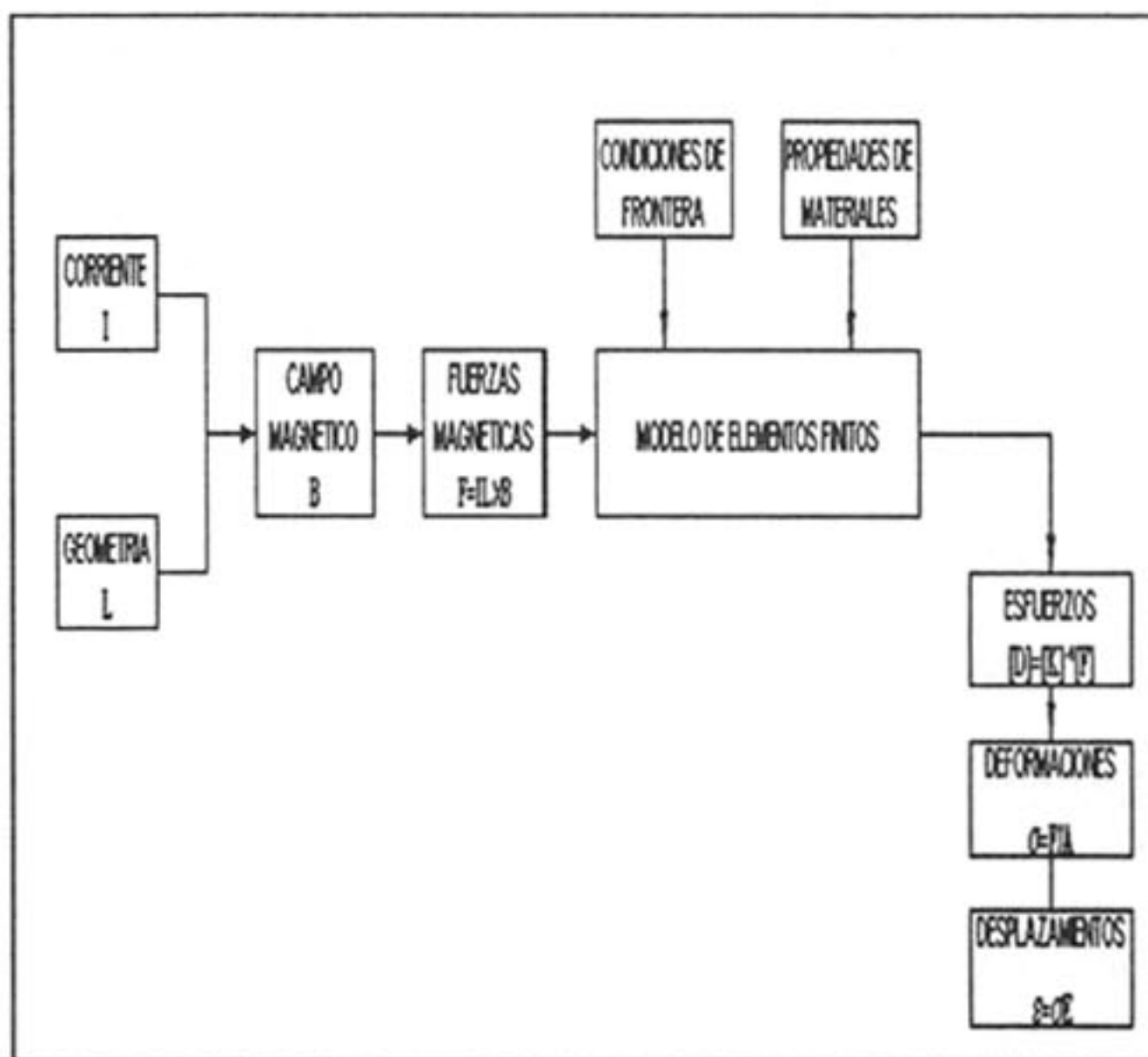


Figura 5. Esquema explicativo de la secuencia de modelamiento.

5.1. Estado de Carga

El estado de carga implementado en la ejecución de los modelos se encuentra determinado a partir de valores de entrada en los modelos electromagnéticos como lo son la corriente y la geometría de la parte activa del transformador.

A partir de estos datos se obtienen los valores de fuerza electromagnética cuya magnitud está dada por la fórmula :

$$F = IL \times B$$

Son estos valores de fuerza electromagnética los datos introducidos en los modelos mecánicos de esfuerzos y desplazamientos junto con la geometría de los modelos. En el análisis dinámico las fuerzas se introducen en una curva de magnitud vs tiempo (figura 6).

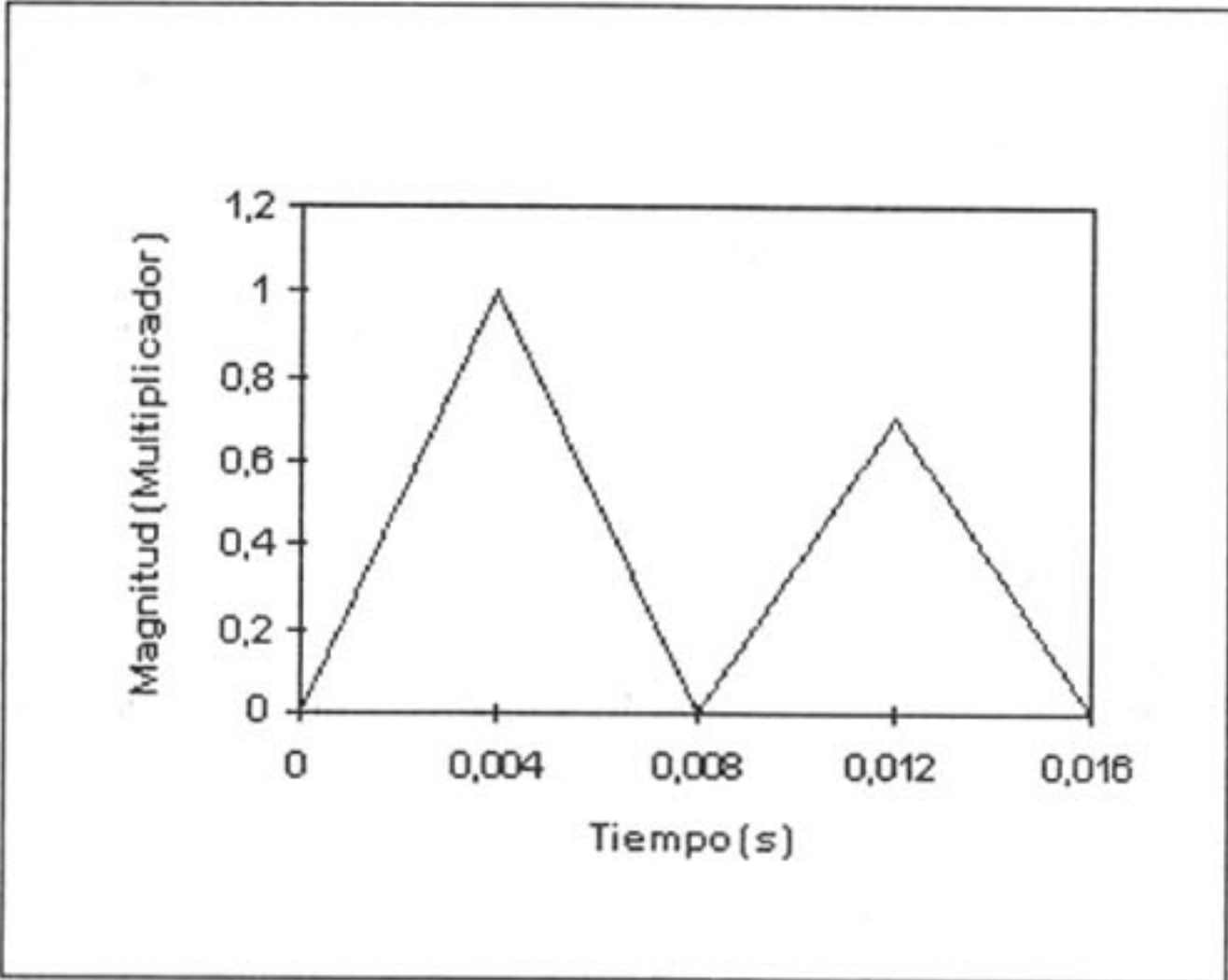


Figura 6. Curva Multiplicador de Magnitud vs Tiempo.

La duración de la prueba de cortocircuito es 0.250 s. El tiempo tomado como referencia ha sido 0.016s, tiempo durante el cual se completa un ciclo de la curva de la corriente y un ciclo de la curva de fuerza. La curva de fuerza original es una curva sinusoidal subamortiguada. Aquí se ha hecho la simplificación de la curva teniendo en cuenta únicamente los picos de la misma.

5.2 Resultados de los Modelos

Las figuras 7 a 12 son algunas gráficas que muestran el resultado del modelamiento del transformador de 75kVA. Las gráficas solamente muestran el material del núcleo y el cobre, el papel ha sido modelado adecuadamente como una condición de borde.

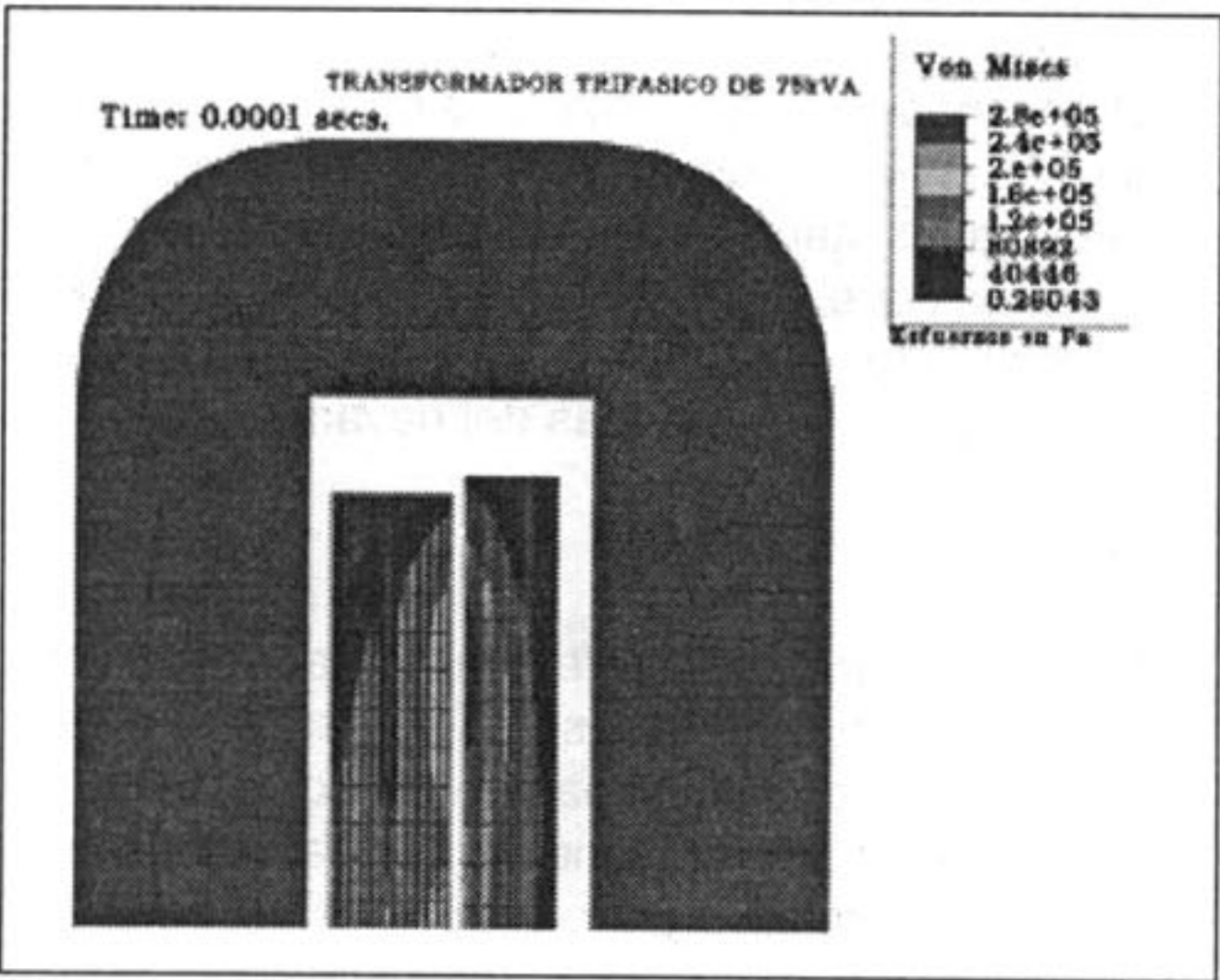


Figura 7. Esfuerzos mecánicos en diferentes instantes de tiempo. $t=0.0001s$, Primer instante de tiempo.

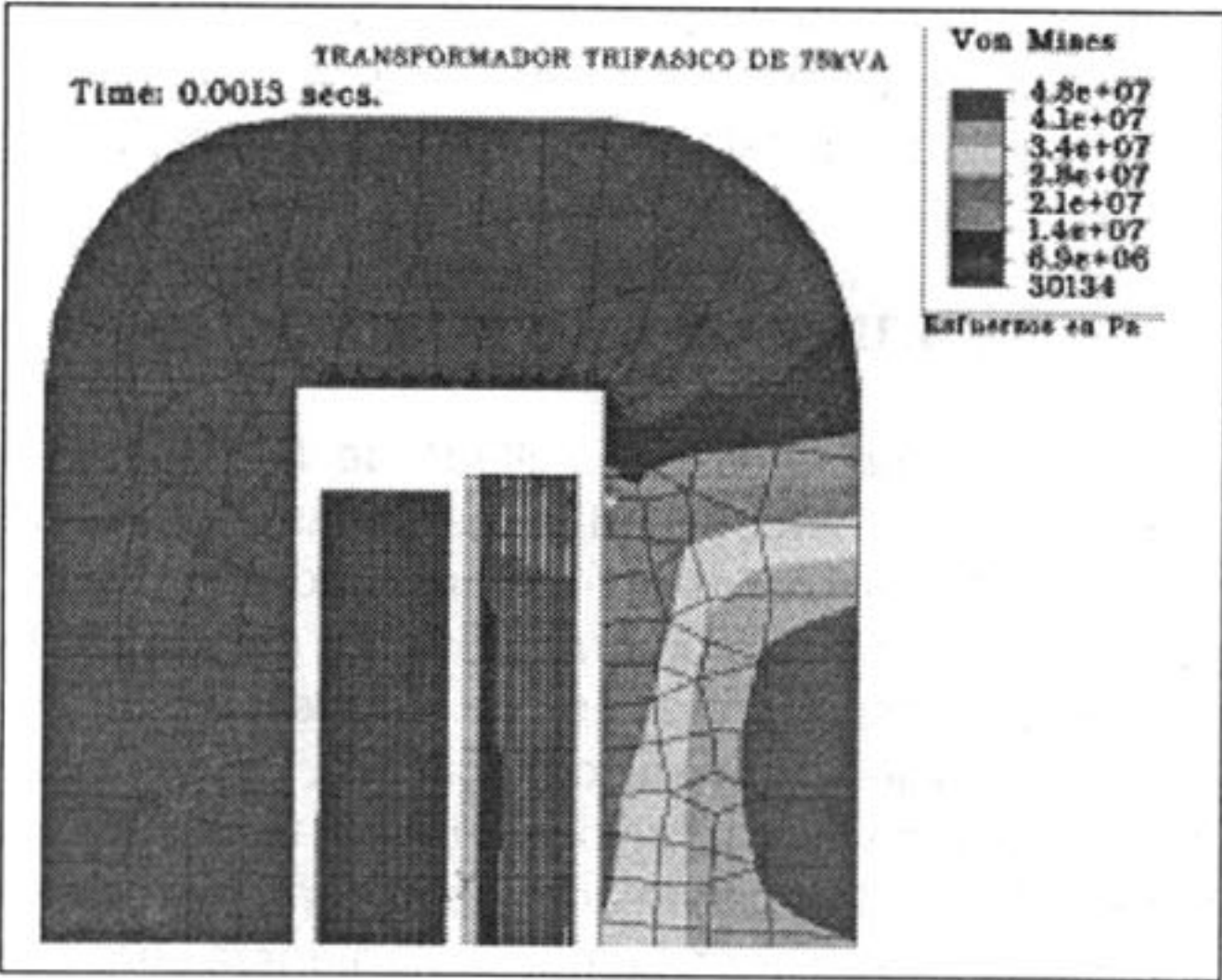


Figura 8. $t=0.0013s$, Máximo esfuerzo es debido al impacto del devanado de baja tensión contra el núcleo.

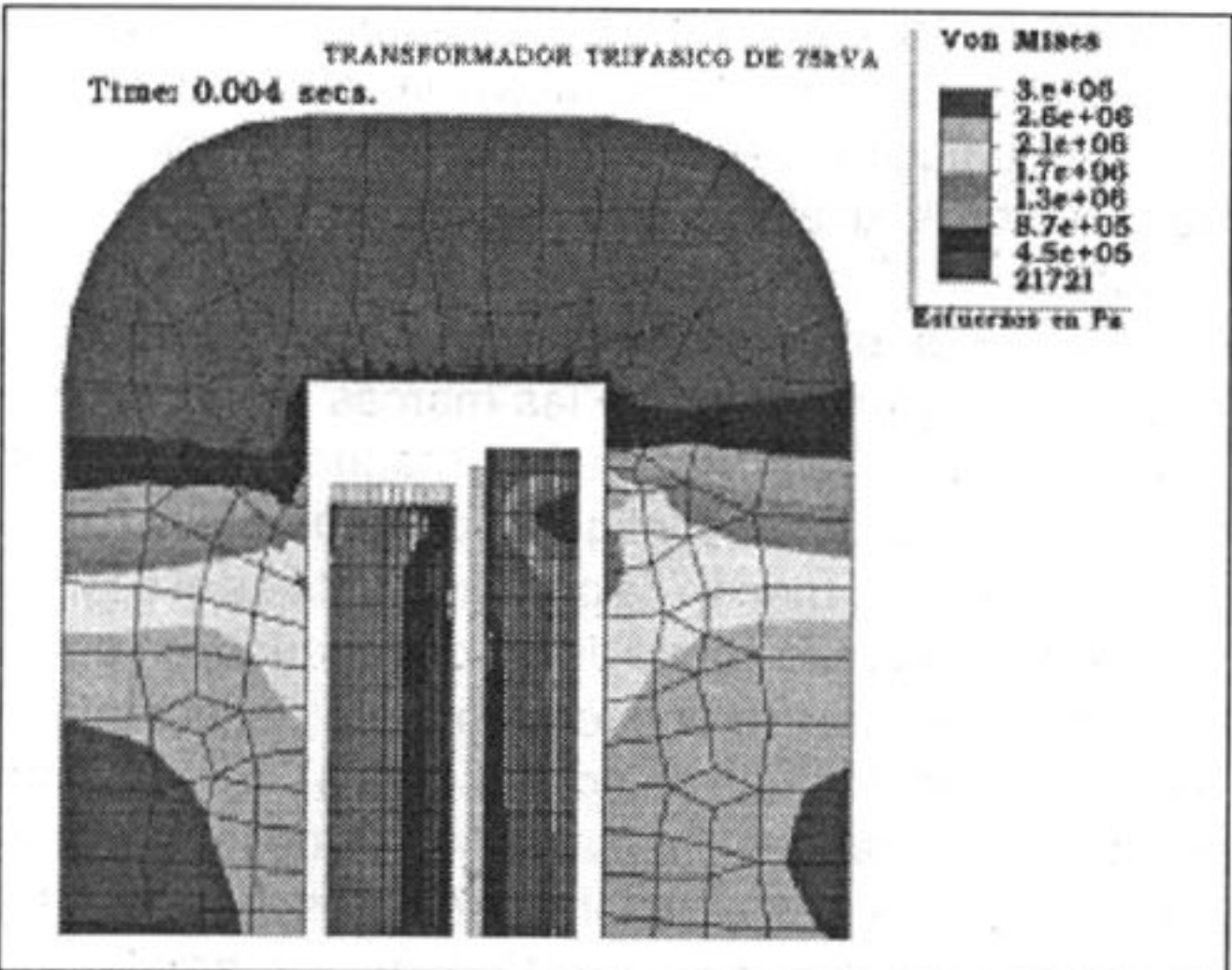


Figura 9. $t=0.004s$, Multiplicador de fuerza igual a 1.

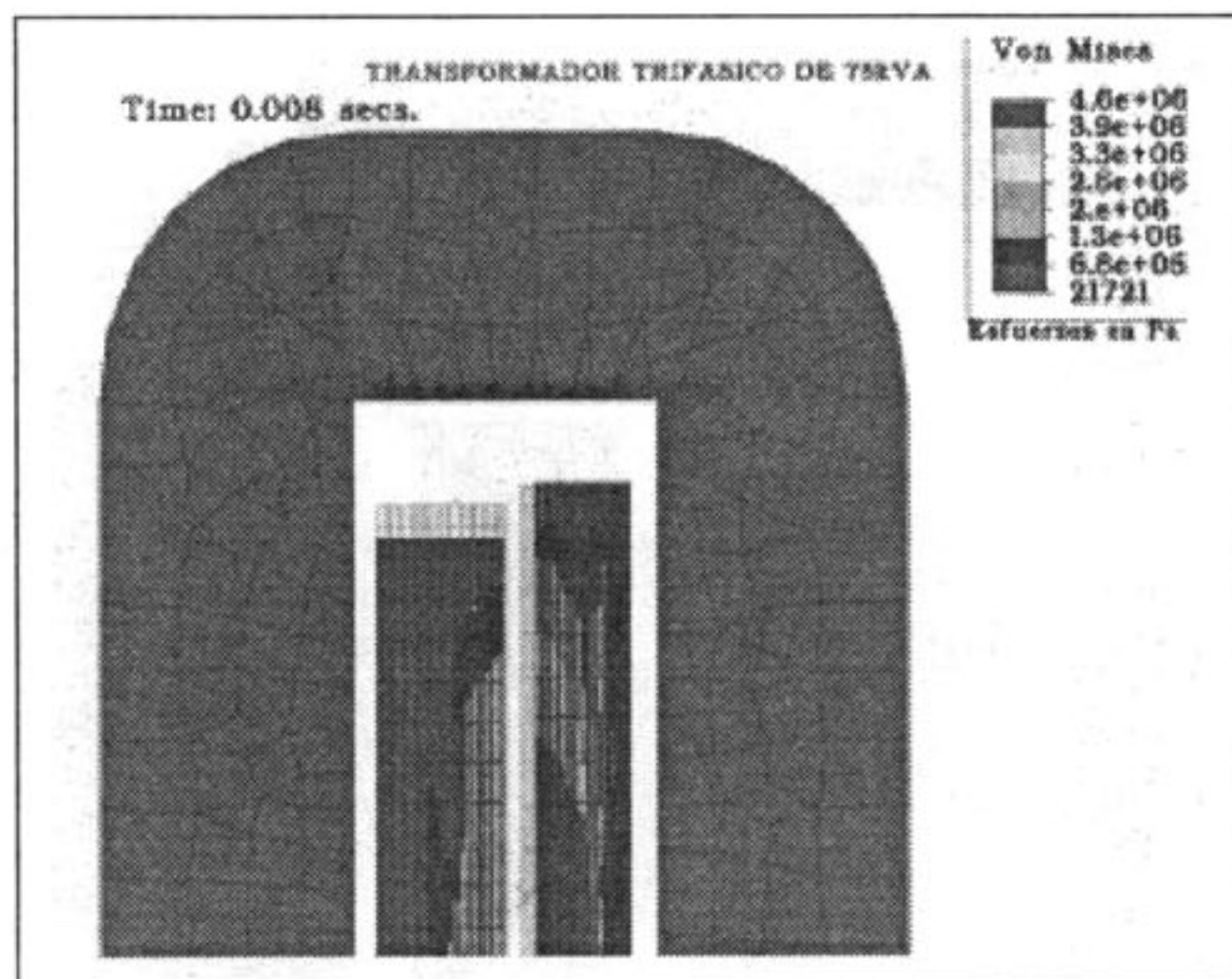


Figura 10. $t=0.008s$, Multiplicador de fuerza igual a 0.

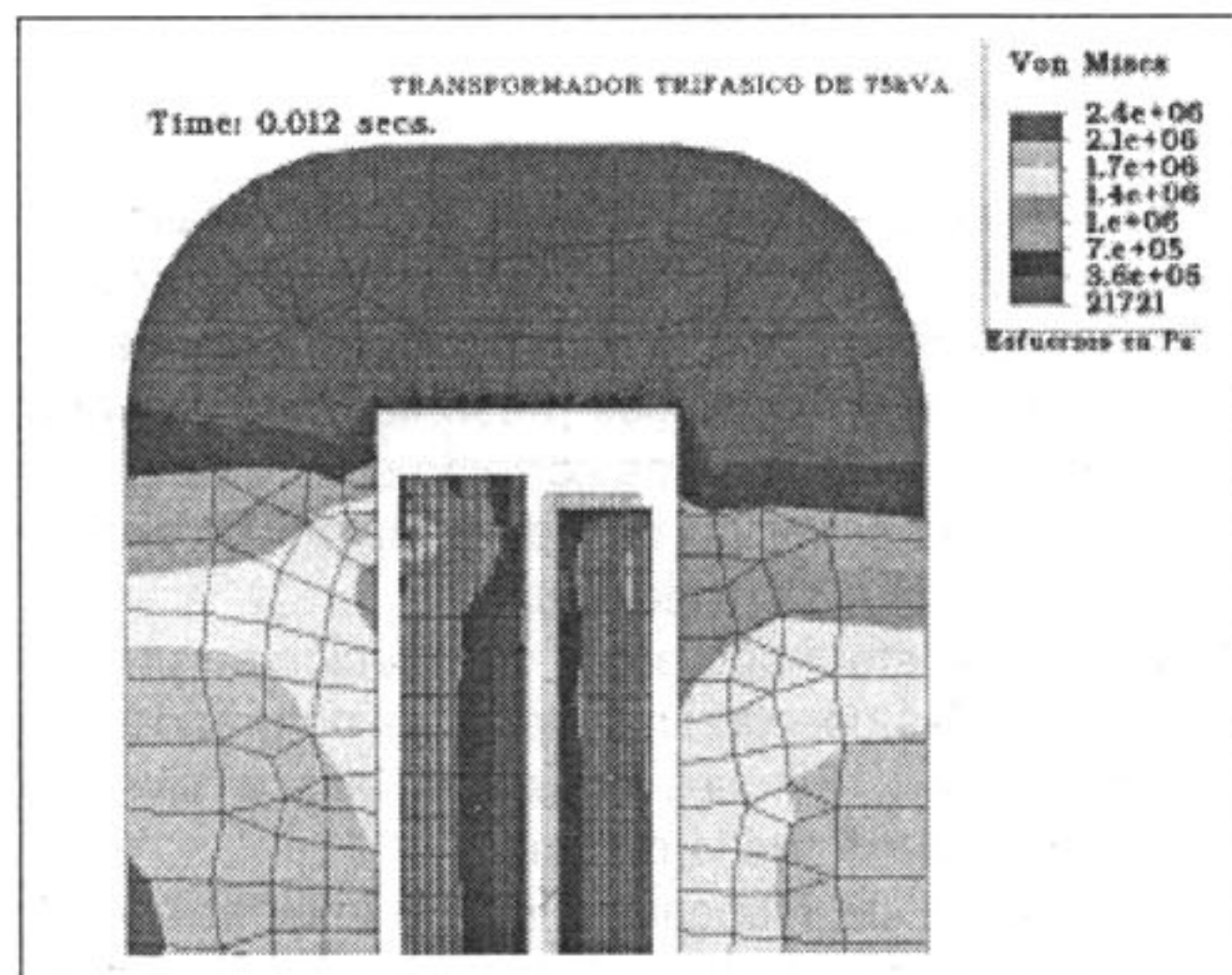


Figura 11. $t=0.012s$, Multiplicador de fuerza igual a 0.7.

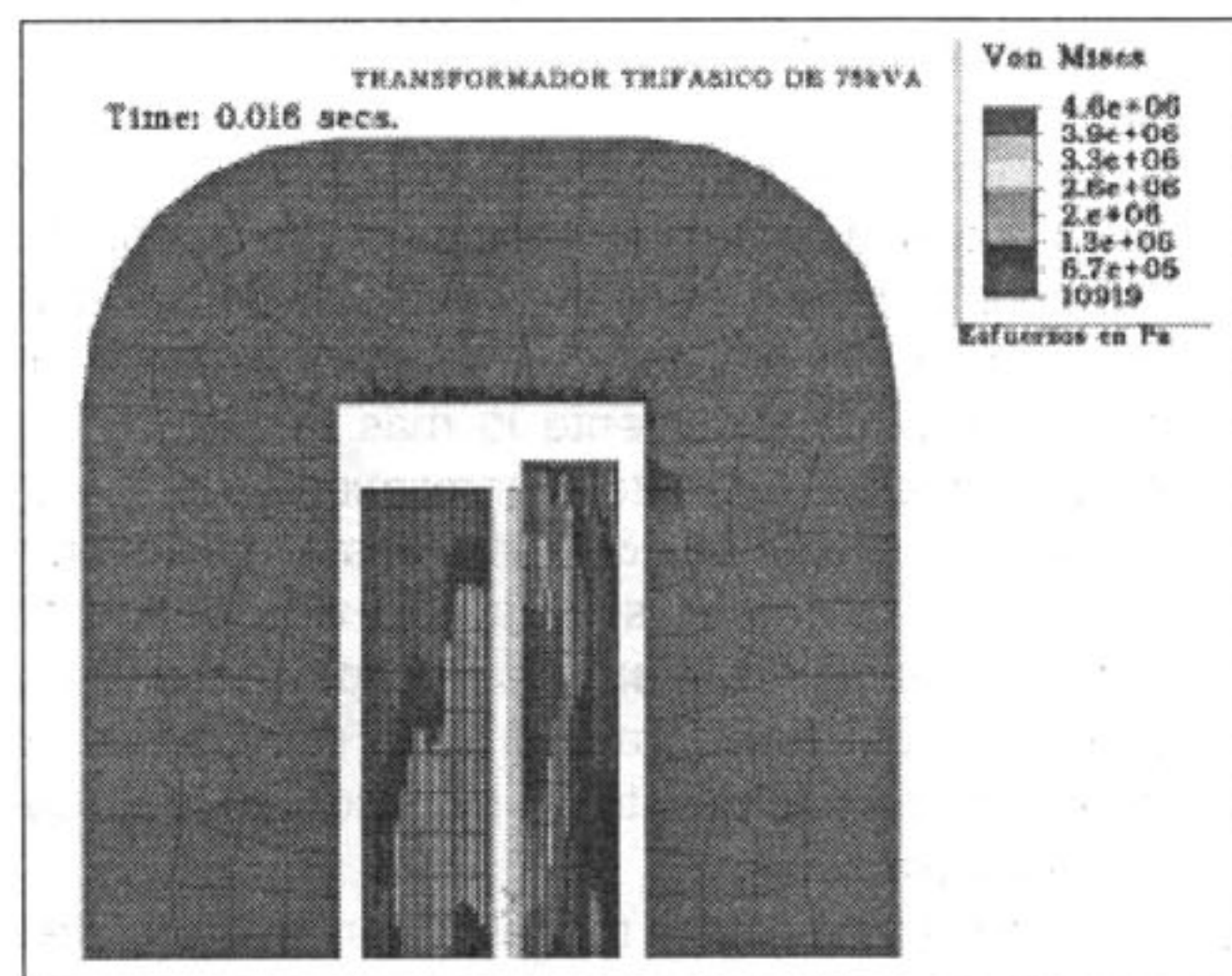


Figura 12. $t=0.016s$, Último instante de tiempo.

5.3. Modelamiento Sugerido

En el tiempo inicial t_0 , la corriente que circula por los devanados produce un campo magnético B_0 y este campo junto con la corriente producen unas fuerzas electromagnéticas F_0 distribuidas a lo largo de los conductores, estas fuerzas deforman y producen cambios geométricos en los devanados durante un Δt de tiempo hasta el tiempo t_1 ; esta nueva geometría junto con la corriente en el tiempo t_1 producen un campo magnético B_1 diferente a B_0 y B_1 con la corriente en el tiempo t_1 producen fuerzas electromagnéticas F_1 diferentes de F_0 que generan un nuevo cambio geométrico sucesivamente el fenómeno se repite durante cada Δt ; el análisis se hace más preciso cuando el Δt tiende a cero.

Como se explica en el párrafo anterior, el fenómeno de cortocircuito en un transformador es el resultado de la interacción de la corriente y la geometría que cambian durante cada instante de tiempo, alternando de esta manera el campo magnético y por lo tanto, las fuerzas magnéticas.

Un modelamiento más detallado debe tener en consideración esta interacción para obtener un análisis más preciso del fenómeno.

Cabe decir que un análisis de este tipo es mucho más costoso y sugiere la utilización de un software multifísico que realice el análisis de la interacción entre el fenómeno eléctrico y el mecánico al mismo tiempo. El diagrama de la figura 13 ayuda a entender el anterior planteamiento.

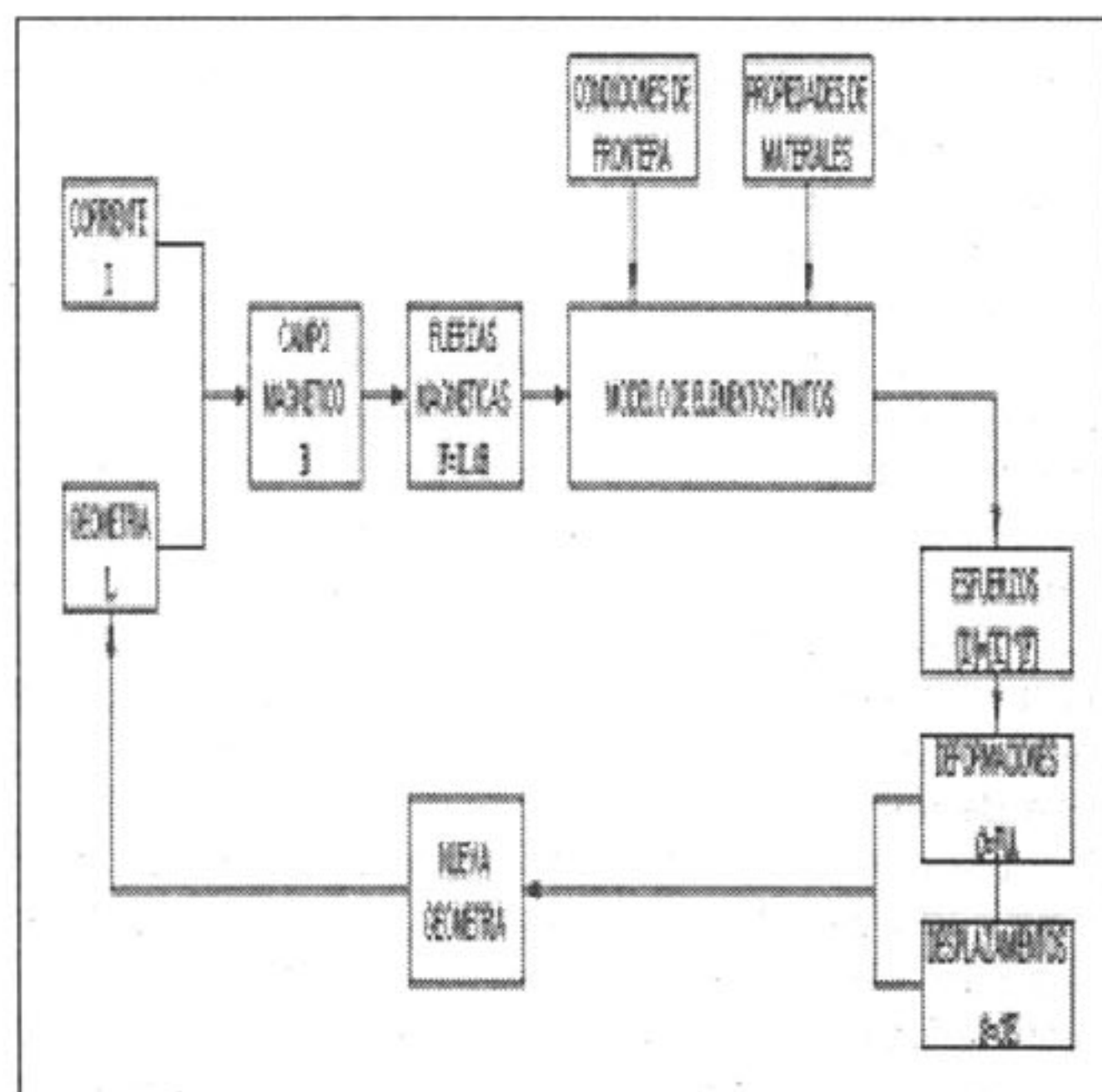


Figura 13. Esquema explicativo de la secuencia de modelamiento sugerido.

6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Durante la elaboración de los modelos se han planteado varios casos con el fin de simular las condiciones tanto electromagnéticas como mecánicas de los devanados para el transformador. Tales casos se refieren a los taps de regulación. De estos casos, el caso correspondiente al «Tap» nominal que presenta una asimetría en el estado de carga para el devanado de alta tensión, se identificó como el caso más crítico por las siguientes razones:

- Por efecto de la asimetría ocasionada aparece un serio desbalance en la sumatoria axial de las fuerzas, del orden de 100 veces mayor al de los otros casos.
- La magnitud de los esfuerzos es mayor al de los otros casos.
- Los máximos desplazamientos a nivel axial son alcanzados en mucho menor tiempo en comparación con los otros modelos.
- Alcanza un estado de deformación que incluye una mayor variación geométrica en comparación con los otros casos.

En términos generales, el fenómeno mecánico del movimiento de los devanados bajo un determinado estado de carga es producto de la interacción entre el papel aislante, que ha sido considerado compresible, con el cobre cuyo módulo de elasticidad lo hace prácticamente incompresible bajo estos estados de carga.

Para describir tal comportamiento es necesario indicar inicialmente la característica que se ha adoptado para el papel aislante. La pregunta que viene a continuación no es si el papel aislante es realmente compresible o no sino cómo lo es.

Para responder a esta cuestión nuestra posición en el modelamiento es la siguiente. Para el papel aislante se ha registrado un módulo de contacto en un rango que podría denominarse de compresibilidad y otro de incompresibilidad similar al del cobre. Básicamente lo que se ha hecho es permitirle al papel aislante comprimirse hasta cierto punto, después de lo cual el material deja de comprimirse fácilmente y para hacerlo las fuerzas que están en juego deben ser mucho mayores. El fenómeno mecánico puede ser descrito de manera global como una compresión progresiva entre cada una de las capas.

Por ahora cabe resaltar un fenómeno apreciado en el devanado de alta y baja tensión correspondiente al caso del «Tap» nominal, el cual se refiere a la separación de las capas exteriores por efecto del impacto con el núcleo, como se aprecia en la figura 14. Sin embargo su estado de compresión las regresan a su posición en el conjunto cobre-aislante.

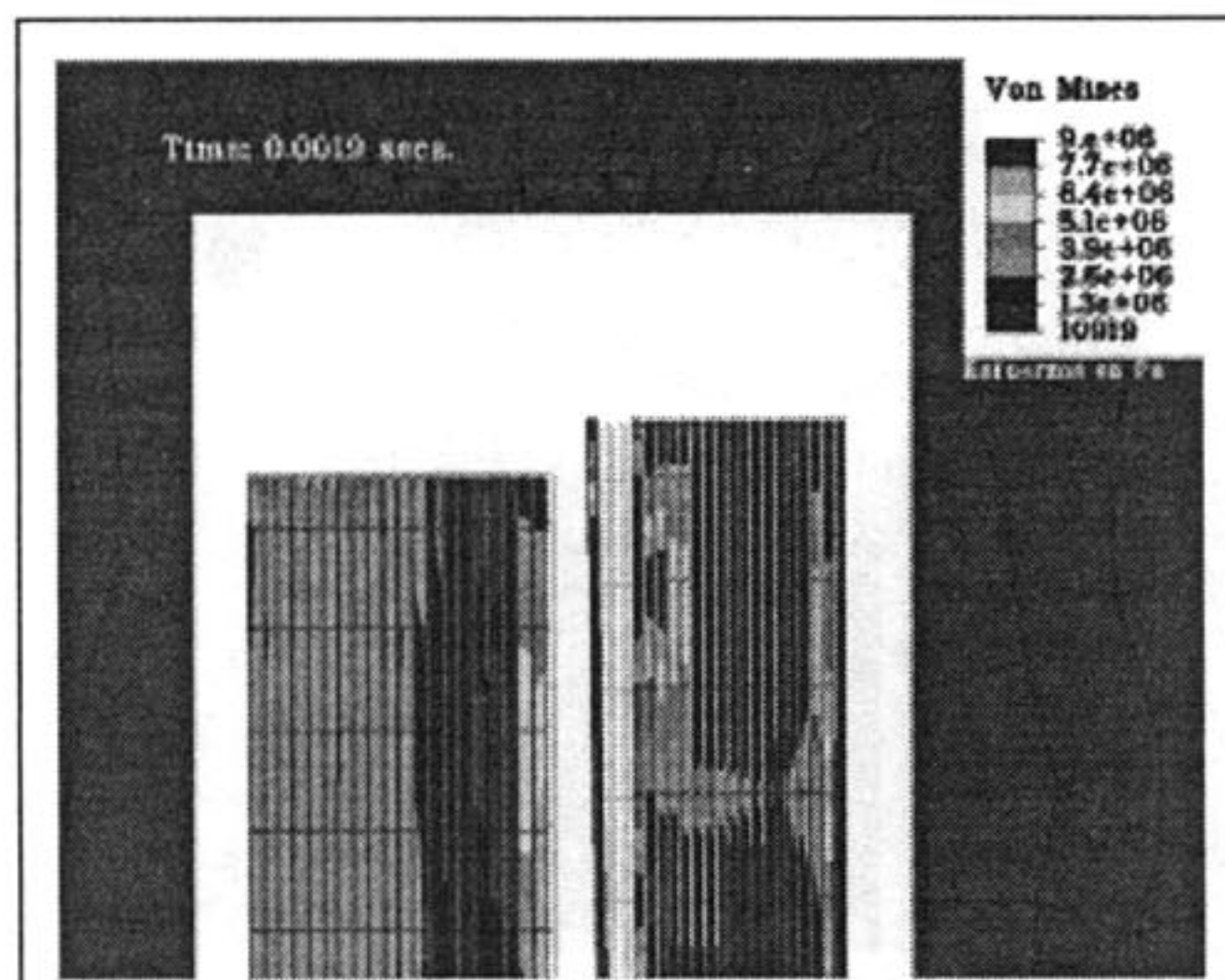


Figura 14. Separación de la capa exterior del devanado de baja tensión de un transformador trifásico.

7. CONCLUSIONES

1. El problema real del estado de esfuerzos del transformador por efecto del corto circuito es un problema de carácter no lineal dinámico. Varios de sus componentes mecánicos presentan un comportamiento no lineal y no es correcto si desea aproximarse a la situación real ejecutar modelos en el rango del análisis lineal estático.
2. En los transformadores de distribución se presentan grandes desplazamientos mas no grandes deformaciones. Esto es causa de falla a nivel del funcionamiento de la máquina.
3. El proceso de fabricación ejerce influencia en la aptitud del transformador para soportar los esfuerzos de corto circuito. Por ser un proceso de ensamble manual se puede presentar alguna diferencia en las alturas eléctricas (excentricidad) aumentando de esta manera las fuerzas axiales en los devanados.
4. Los grandes desplazamientos que se presentan y tanto la configuración geométrica como la mecánica imposibilitan el uso de transductores con el fin de ejecutar mediciones en la parte activa del transformador, experimentalmente lo más importante es evaluar cualitativamente el movimiento del transformador; para poder comparar este movimiento con el de los modelos y es en éstos donde se evalúan cuantitativamente los desplazamientos y esfuerzos del transformador, por esta razón un adecuado procedimiento de medición es la ubicación de marcas.
5. Es necesario ejecutar modelos con más detalles tomando en consideración las chapas del núcleo y las fuerzas de fricción entre los elementos actuantes a nivel tridimensional.

6. El papel aislante y el papel corrugado son dos de los elementos de la configuración mecánica más relevantes en la construcción del sistema dinámico durante la prueba de corto ya que son estos elementos los que se comportan como piezas amortiguantes pero presentan un comportamiento no lineal en una curva análoga a la curva de esfuerzo-deformación.
7. Las fallas más comunes ocurren por desplazamientos axiales y radiales del devanado y por movimiento del núcleo ocasionando la variación del circuito magnético y su respectiva falla a nivel eléctrico. [3]

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1.] APONTE, G. CADAVID, H., CASTRO, F., LOZANO, C.. La prueba de cortocircuito y la calidad de los transformadores en Colombia. Energía y Computación, Volumen VI, No. 1 Edición No. 12. Universidad del Valle. 1997
- [2.] NORRIS, E. T. Mechanical strength of power transformers in service. North-Eastern Center at Newcastle. Inglaterra. 1957.
- [3.] ISAACS, M. JARAMILLO, G. A. Modelamiento y medición de esfuerzos mecánicos en un transformador de distribución sometido a un cortocircuito franco. Tesis. Programa académico de Ingeniería Mecánica. Universidad del Valle. Cali. 2000.

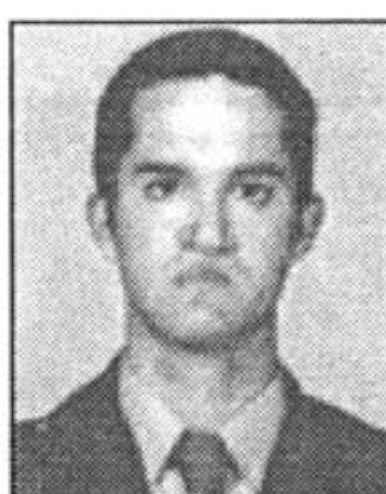
LISTA DE SÍMBOLOS

I =	Corriente.
L =	Longitud del conductor.
B =	Densidad de flujo magnético.
F =	Fuerza electromagnética.
$[D]$ =	Matriz de desplazamientos. Datos a obtener.
$[K]$ =	Matriz de rigidez. Datos de geometría y propiedades de material. Datos de entrada.
$[F]$ =	Matriz de fuerzas. Datos independientes. Datos de entrada.
s =	Esfuerzo.
A =	Área.
e =	Deformación.
E =	Módulo de elasticidad.
t_0 =	Tiempo inicial.
B_0 =	Densidad de flujo magnético en el tiempo t_0 .
F_0 =	Fuerzas electromagnéticas en el tiempo t_0 .
Dt =	Cambio de tiempo.
t_1 =	Instante de tiempo.
B_1 =	Densidad de flujo magnético en el tiempo t_1 .
F_1 =	Fuerzas electromagnéticas en el tiempo t_1 .

9. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue posible gracias al financiamiento y apoyo parcial del Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas" COLCIENCIAS, SIEMENS y la UNIVERSIDAD DEL VALLE mediante el contrato No 259-98 Los autores agradecen el apoyo y colaboración del Ing. Eduardo Oliveros, así como a ALGOR Inc. 

AUTORES



Mauricio Isaacs Agudelo, Ingeniero Mecánico de la Universidad del Valle (2000). 4 años de experiencia en elementos finitos e ingeniería asistida por computador. Teléfono: +57(2)6656236 maurisaa@hotmail.com

Guillermo Andrés Jaramillo Pizarro, Ingeniero Mecánico de la Universidad del Valle (2000). 4 años de experiencia en elementos finitos e ingeniería asistida por computador.

Teléfono: +57(2)5160940
unoytres@emcali.net.co



Yesid Aguilar Castro, Ingeniero Mecánico de la Universidad del Valle. MSc. Director de la Unidad de Investigación Metalúrgica de la Universidad del Valle (UIM). yeaguilar2001@telesat.com.co yeaguila@univalle.edu.co

Hector Cadavid Ramirez, Ingeniero Electromecánico, Ph.D. en Ingeniería Eléctrica del Instituto Superior Energético de Moscú, 1996, Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, y Decano de la Facultad de Ingeniería. hcadavid@galta.edu.co hcadavid@cali.cetcol.net.co

