

# Análisis Estructural de Transformadores de Distribución y Efecto del Papel Diamante como Aislamiento de Bobinas

Hugo Parra Guerrero, José Eulalio Contreras de León, Prolec GE, Apodaca, Nuevo León, México.  
Alberto Díaz Díaz, Rubén Castañeda Balderas, CIMAV, Chihuahua, México.

## I. INTRODUCCIÓN

*Resumen*— Los corto-circuitos en transformadores generan esfuerzos mecánicos que pueden provocar la falla de alguno de los componentes del transformador. La optimización del diseño de estos transformadores requiere de cálculos que estudien los posibles escenarios de falla. Estos cálculos se efectúan en dos etapas: en la primera, por medio de un cálculo electromagnético se determina la densidad de fuerzas de origen electromagnético en los devanados y en la segunda, por medio de un cálculo estructural se evalúan los esfuerzos generados por las fuerzas electromagnéticas. En este estudio se incluyó la función del papel y se pudo comprender la función del papel diamante (es un aislante únicamente) y los posibles escenarios de falla en el transformador. Al analizar estos escenarios se revelaron factores importantes para el diseño como lo es el espacio entre cuñas. Esta metodología puede implementarse para otros tipos de transformadores para optimizar su diseño e incrementar su desempeño mecánico.

**Palabras Clave**—Corto-circuitos, Papel Diamante, Resistencia del Papel Diamante, Fuerzas Electromagnéticas, Modelado, Transformadores de Distribución

Los corto-circuitos en transformadores generan esfuerzos de alta magnitud que pueden provocar la falla de algún componente del transformador. En muchos casos, el papel dieléctrico empleado para aislar los conductores es el que se daña. En otros casos, son los devanados los que se desajustan o se desplazan considerablemente deteriorando el desempeño eléctrico del aparato. La evaluación de los esfuerzos provocados en los componentes del transformador por el corto-circuito es entonces de vital importancia para su diseño. Para calcular los esfuerzos se requiere primeramente efectuar un cálculo electromagnético con el cual se determina la densidad de fuerzas en cada devanado [1]. Después se realiza un cálculo estructural que da como resultado los desplazamientos y esfuerzos en los devanados. Estos cálculos se complican debido a las heterogeneidades en los devanados: cada devanado se compone de conductores y de un material dieléctrico. Actualmente, todos estos cálculos se pueden efectuar mediante softwares de elemento finito [2], [3], [4], [5].

En este trabajo se analiza un transformador de distribución que consta de un devanado de baja hecho de conductores de lámina de aluminio y de un devanado de alta hecho de conductores de alambre de cobre. El devanado de alta envuelve al devanado de baja. En cada devanado se emplea “papel diamante” (papel con diamantes de resina) como aislante entre capas. La resina actúa supuestamente como agente de cohesión entre capas. Entre los dos devanados se utilizan capas de papel diamante como aislante (EBA: espacio baja-alta). En cada devanado hay ductos de enfriamiento realizados por medio de cuñas.

El presente trabajo expone las siguientes partes:

- De acuerdo con las características electromagnéticas del transformador, se realizó primeramente un cálculo electromagnético mediante el software COMSOL Multiphysics. Este cálculo arrojó como resultados las densidades de fuerza en cada uno de los devanados. Se demostró que las fuerzas radiales son las fuerzas preponderantes y que estas fuerzas son prácticamente constantes en cada conductor; es decir que estas fuerzas dependen únicamente de la posición radial. Además, se

observó que las fuerzas radiales “incrustan” al devanado de baja contra el núcleo y separan radialmente al devanado de alta del de baja.

- Después, para simular el comportamiento estructural de los devanados fue necesario realizar pruebas mecánicas con el papel diamante y los conductores. Las pruebas mostraron que la adherencia del papel diamante con los conductores es despreciable y se concluyó que no se transmite tensión radial de una capa de conductor a otra. Las pruebas también permitieron identificar las propiedades mecánicas de los conductores.
- Finalmente, se realizaron los cálculos estructurales. En éstos, se pudo estudiar por separado el devanado de baja y el devanado de alta gracias a que el EBA no juega ningún papel estructural. Para los cálculos en ambos devanados se mostró la importancia de la alineación de cuñas para disminuir la flexión y deformación de los conductores. En el devanado de baja se puede plastificar el aluminio por flexión si hay demasiado espacio entre cuñas (se puede determinar un espacio óptimo). En el devanado de alta, los conductores trabajan esencialmente en tensión y se mostró la importancia de apoyos con la pared del tanque para disminuir el estiramiento de los conductores.

## II. CÁLCULO DE DENSIDAD DE FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS

Para el cálculo de la densidad de fuerzas electromagnéticas se consideró únicamente una fase en el cálculo. Se supone que no hay interacción entre las fases debido al desfase que existe entre éstas. Se consideró una densidad de corriente uniforme en el devanado de baja ( $7.46 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ ) y en el devanado de alta ( $5.42 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ ). Los valores de estas corrientes corresponden a los valores máximos alcanzados por éstas en el pico del corto-circuito y son calculados mediante la expresión:

$$j = \frac{I}{A} \times \frac{K}{0.01 \times \%Z} \quad (1)$$

donde  $j$  es la densidad de corriente,  $I$  es el ampere-vuelta del transformador (9,021.1 A),  $A$  el area total de las secciones de baja o de alta,  $K$  es el factor de asimetría (2.38),  $\%Z$  es el porcentaje de impedancia (5.2 %). La dirección de estas 2 corrientes es la dirección de enrollamiento y tienen un sentido opuesto una con respecto a la otra. La geometría se simplificó al considerar al devanado de baja y al devanado de alta con materiales homogéneos ortotrópicos (la conductividad radial es cero para evitar corrientes radiales). Se consideraron los ductos de enfriamiento en cada devanado. Después se capturaron las propiedades electromagnéticas de los materiales y las condiciones de frontera del problema. Para los cálculos se empleó el módulo de electromagnetismo de Comsol Mutiphysics en régimen permanente (nos interesa el valor máximo alcanzado por las fuerzas y esto ocurre cuando se alcanza el pico de corriente). Gracias a las simetrías del problema, se consideró un octavo de la geometría tal y como lo muestra la figura 1.

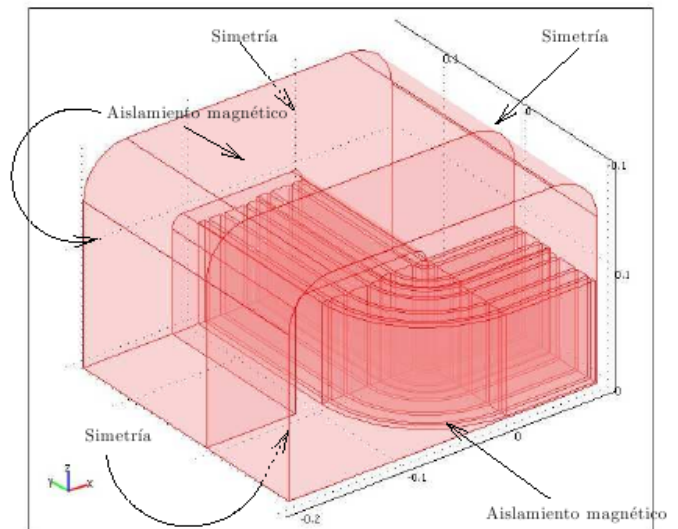


Figura 1. Geometría considerada y condiciones de frontera

Se obtuvieron los resultados de las figura 2,3 y 4 para las magnitudes de las densidades de fuerza radial. Se puede apreciar que estas fuerzas son prácticamente uniformes en cada capa de devanado. En el devanado de baja el valor máximo es de  $2.01 \times 10^8 \text{ N/m}^3$  y en el de alta el valor máximo es de  $1.2 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ . En cuanto a su orientación, en el devanado de baja estas fuerzas están orientadas hacia el núcleo mientras que en el de alta se orientan hacia el exterior. De esta manera, estas fuerzas tienden a separar el devanado de baja del de alta. Por otro lado, los cálculos mostraron que la densidad de fuerzas axiales es despreciable delante de las radiales. Por este motivo no se toman en cuenta en lo que sigue de este estudio.

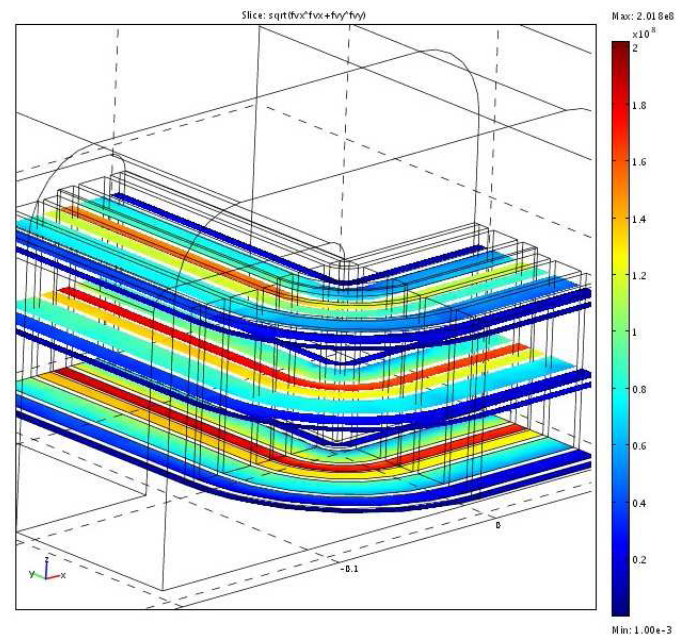


Figura 2. Magnitud de las fuerzas radiales en tres alturas diferentes

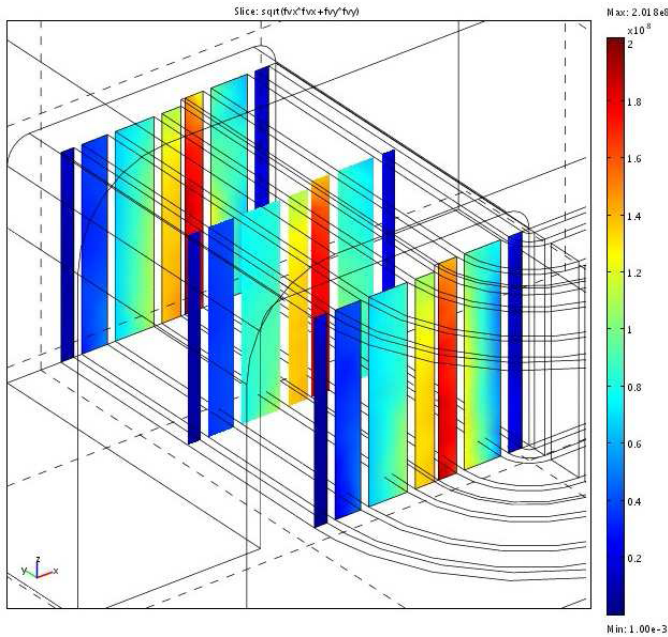


Figura 3. Magnitud de las fuerzas radiales del lado ventana

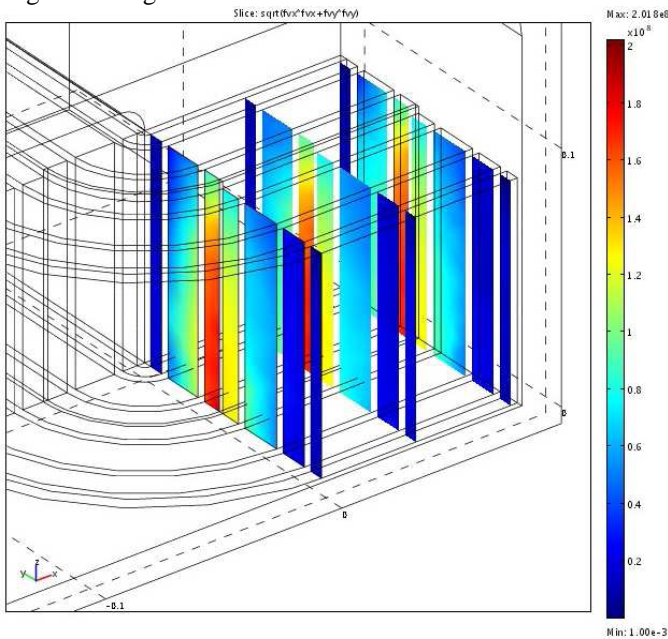


Figura 4. Magnitud de las fuerzas radiales del lado parte viva

### III. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LOS DEVANADOS

Para poder simular el comportamiento mecánico de los devanados sometidos a las fuerzas anteriores, se realizaron pruebas mecánicas para caracterizar los devanados y sus constituyentes. El cobre y el aluminio fueron ensayados en tensión y se obtuvieron las propiedades de la tabla 1. En cuanto al papel y a su adherencia a los conductores, se realizaron pruebas de tensión en la dirección radial. En la figura 5, se muestra el ejemplo de una probeta del devanado de alta en tensión radial. En esta figura se puede apreciar el papel en medio de las dos líneas de conductores. La falla ocurre a niveles de esfuerzos inferiores a 0.1MPa en las capas

de papel o en la interfase papel/conductor (ver figura 6). Para fines prácticos, se puede entonces suponer que la resistencia mecánica de la interfase y del papel en la dirección radial es despreciable. Es importante subrayar que a pesar de la falla mecánica del papel, éste sigue cumpliendo con su función eléctrica: aislar las dos capas adyacentes de conductor. Con estos datos, se tiene suficiente información para simular el comportamiento mecánico de los devanados sometidos a las fuerzas electromagnéticas de corto-circuito.

Material	Módulo de Young (GPa)	Coefficiente de Poisson	Cadencia (MPa)
Aluminio	58	0.37	23
Cobre	110	0.34	97

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los conductores

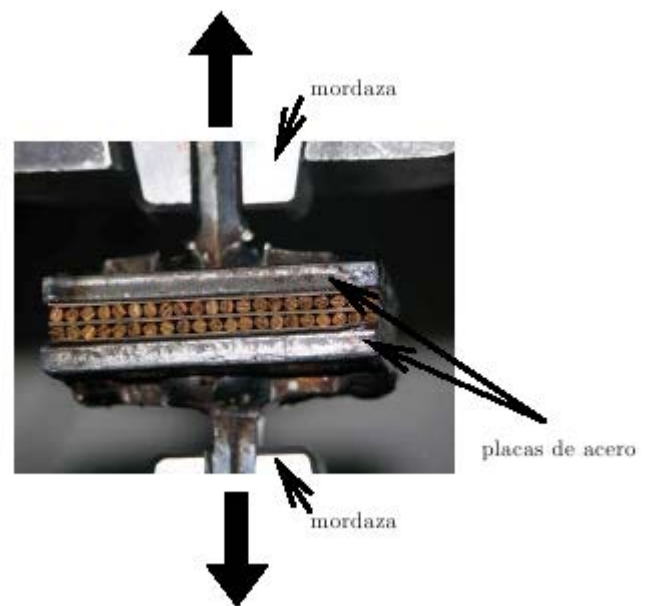


Figura 5. Probeta del devanado de alta en tensión radial



Figura 6. Falla del papel y de la interfase papel/conductor

IV. CÁLCULO ESTRUCTURAL DE LOS DEVANADOS

Debido a que el EBA (hecho de papel diamante) no transmite fuerzas radiales y se rompe con poca carga, se tienen dos problemas desacoplados: uno para el devanado de alta y otro para el devanado de baja. En estos problemas los conductores están sometidos a las fuerzas de volumen y el borde del devanado contiguo al EBA es un borde libre de esfuerzos. En el devanado de baja las fuerzas tienden a incrustar los conductores contra el núcleo y en el de alta los conductores son jalados hacia el exterior.

Para el devanado de baja, debido a que el papel diamante no transmite cargas mecánicas de un conductor a otro, se tiene un problema de flexión para cada conductor (ver figura 7). Además puesto que la densidad de fuerzas radiales son prácticamente uniformes en la altura de cada conductor, se puede considerar que se trata de un problema plano. Gracias a este esquema de la figura 7, es obvia la importancia que juegan la alineación de las cuñas y el espaciamiento de las cuñas. De un punto de vista mecánico las cuñas tienen una función de apoyo para los conductores. Por medio del software COMSOL se realizó el cálculo de cada conductor suponiendo un perfecto alineamiento de las cuñas y un espaciamiento igual al nominal. En la figura 8, se muestran los resultados de esfuerzos circunferenciales para el conductor que está sometido a una mayor densidad de fuerza radial (el conductor más externo). El esfuerzo máximo es de 15 MPa, un valor inferior a la cedencia del aluminio. Sin embargo, si se suprimiera una cuña, entonces el esfuerzo sería 4 veces mayor a la cedencia del material y los cálculos elásticos ya no serían válidos. Pero de cualquier manera, se podría concluir que al quitar una cuña se plastificaría el conductor dejando una deformación plástica remanente considerable y el funcionamiento eléctrico del transformador se alteraría.

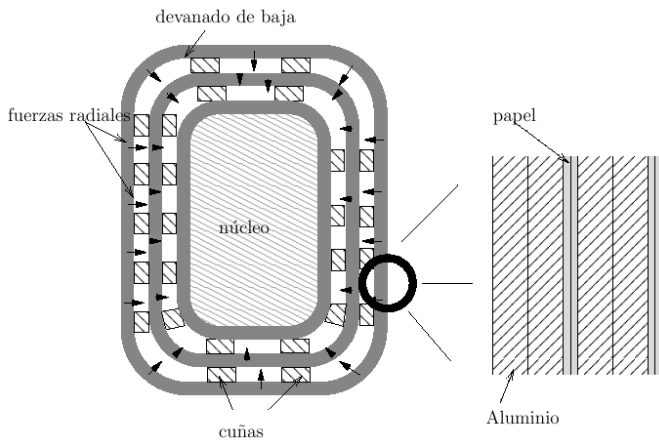


Figura 7. Esquema del problema de flexión en el devanado de baja

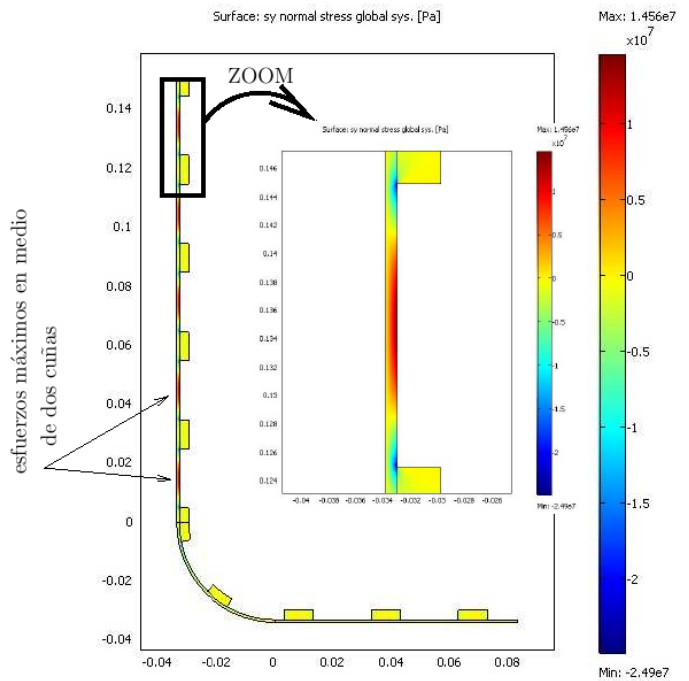


Figura 8. Esfuerzos circunferenciales en el devanado de baja

Analicemos ahora el caso del devanado de alta. El problema mecánico a resolver se encuentra esquematizado en la figura 9. Los conductores son modelados por vigas sometidas a una densidad lineal de fuerza deducida de la densidad volumétrica de fuerzas radiales y del área de la sección del conductor. Las cuñas son también modeladas por vigas pero éstas están colocadas radialmente. Al efectuar los cálculos lineales elásticos por medio del software COMSOL se obtienen valores de desplazamientos radiales demasiado grandes en la ventana que hacen inválida la hipótesis de linealidad del cálculo (ver en la figura 10 la deformación a escala del conjunto de vigas). Sin embargo, hay que tomar en cuenta que del lado de ventana los desplazamientos radiales son bloqueados por el núcleo ó por el devanado de alta de otra fase. Por este motivo se realizó otra corrida bloqueando los desplazamientos radiales del lado de ventana y se obtuvieron desplazamientos aceptables (1.75 cm en la parte viva) para la hipótesis de linealidad de cálculo. En la figura 11, se muestran los valores de esfuerzo de tensión en cada conductor. Se puede apreciar que estos esfuerzos son inferiores a 32 MPa (1/3 de la cedencia del cobre) y no representan un riesgo para deformar permanentemente los conductores (no hay plasticidad).

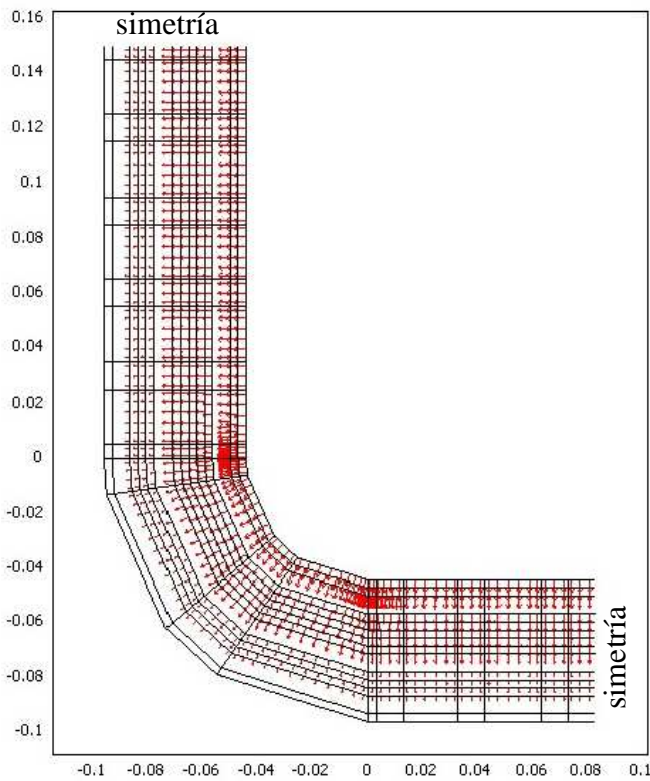


Figura 9. Esquema del problema del devanado de alta

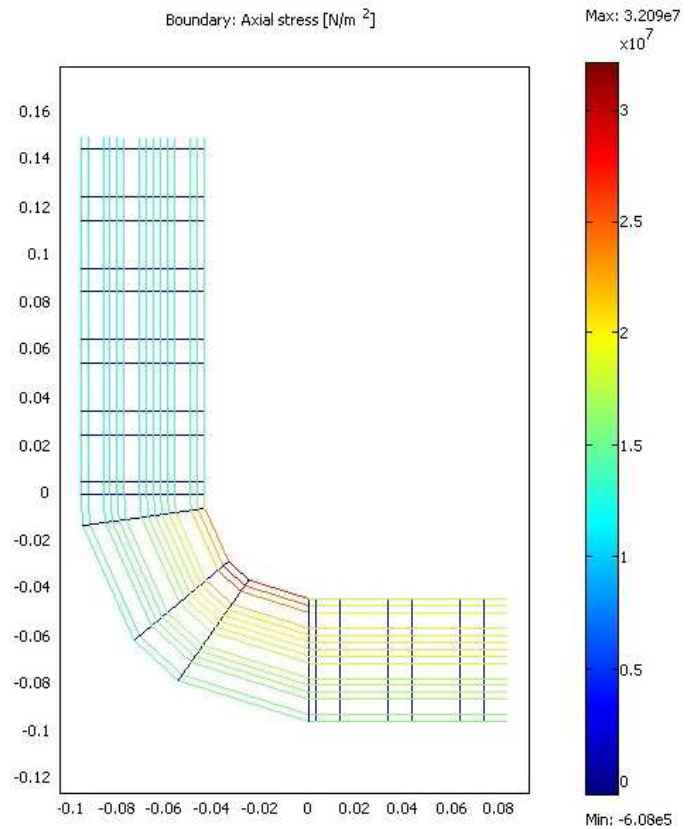


Figura 11. Esfuerzos de tensión en devanado de alta

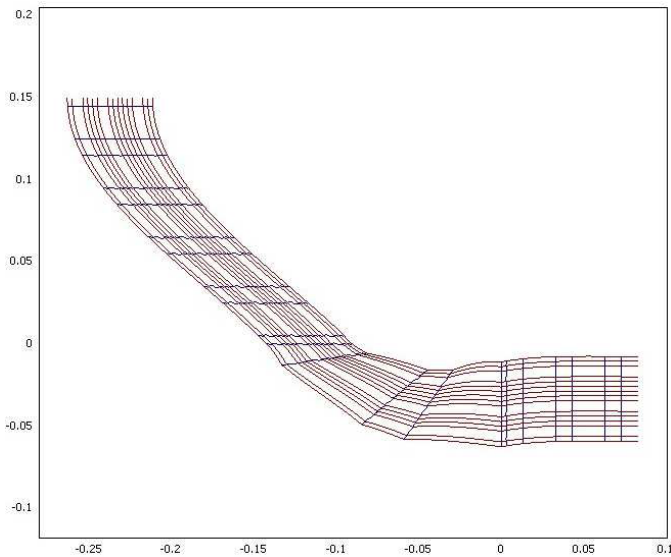


Figura 10. Grandes desplazamientos en el devanado de alta

## V. CONCLUSIONES

Este trabajo ha aportado conocimientos importantes acerca de la resistencia mecánica del papel diamante y de su utilidad como aislante eléctrico y no como agente aglomerante entre devanados. Asimismo, se ha puesto en relieve la importancia del espaciamiento entre cuñas y su alineamiento para la resistencia mecánica de los devanados. También, es importante bloquear los desplazamientos radiales del lado de la parte viva del devanado de alta para disminuir los desplazamientos radiales y evitar un posible cambio geométrico del devanado. Esto podría realizarse por medio de un apoyo con la pared del tanque. La misma metodología adoptada en este proyecto debería de ser adoptada para otros transformadores similares a éste para asegurar que los transformadores resistirán un corto-circuito.

## VI. REFERENCIAS

- [1] M. Waters : The short-circuit strength of power transformers. Londres, Macdonald & Co, 1966.
- [2] S. Salon, B. LaMattina, K. Sivasubramaniam : Comparison of Assumptions in computation of short circuit forces in transformers. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, no. 5, September 2000.
- [3] A.G. Kladas, M.P. Papadopoulos, J.A. Tegopoulos : Leakage flux and force calculation on power transformer windings under short-circuit: 2D and 3D models based on the theory of images and the finite element method compared to measurements. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, no. 5, September 1994.
- [4] M. Tsili, A. Kladas, P. Georgilakis, A. Souflaris, D. Paparigas : Numerical techniques and modeling of distribution transformers. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 161, pp. 320-326, 2005.
- [5] M. Tsili, A. Kladas, P. Georgilakis, A. Souflaris, D. Paparigas : Advanced design methodology for single and dual voltage wound core

power transformers based on a particular finite element model. Electric Power Systems Research, Vol. 76, pp. 729-741, 2006.

## VII. BIOGRAFÍAS

**Hugo Parra Guerrero** nació en Nuevo Laredo, Tamaulipas, en 1963. Se graduó de Ingeniero Mecánico Electricista en la Facultad de Ingeniería de la UANL en 1985 y recibió el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Aachen, RFA, en 1989. Desde 2005 ha sido miembro del equipo de desarrollo tecnológico de Prolec GE. Actualmente es Líder de Tecnología Mecánica y Proyectos de Investigación, dentro de la Dirección de Tecnología de la misma empresa.

**José Eulalio Contreras de León** nació en San Nicolas de los Garza, Nuevo León, en 1978. Se graduó de Ingeniero Mecánico Electricista en la Facultad de Ingeniería de la UANL en 2000 y recibió el grado de Maestría en Ingeniería en Ciencia de Materiales en la UANL. Desde 2006 ha sido miembro del equipo de desarrollo tecnológico de Prolec GE. Actualmente es Ingeniero de Desarrollo y enlace, dentro de la Dirección de Tecnología de la misma empresa.

**Alberto Díaz Díaz** nació en México, D.F., en 1973. Se graduó de Ingeniero Civil, Maestro y Doctor en Ciencias de Materiales y Estructuras en la "Ecole Nationale des Ponts en Chaussées" de París, Francia. Desde 2002 es investigador titular del CIMAV S.C. encargado del área de Integridad Mecánica.

**Rubén Castañeda Balderas** nació en Gómez Palacio, Durango, en 1981. Se graduó de Ingeniero en Sistemas en el Instituto Tecnológico de Chihuahua II, en el año 2004. Desde 2006 es técnico asociado del CIMAV S.C. adscrito al área de Integridad Mecánica.