

Margen de la bobina de alta tensión y su impacto en el costo de transformadores de distribución

^APaul Ramírez Sánchez, ^BJuan Carlos Olivares Galván,
^BEduardo Campero Littlewood, ^BRafael Escarela Pérez

^AInstituto Tecnológico Superior de Poza Rica, Veracruz

^BUniversidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, México, D.F.

pool_8874@hotmail.com , jolivare_1999@yahoo.com ,

ecl@correo.azc.uam.mx , r.escarela@ieee.org



RESUMEN

En este trabajo se analiza el impacto que el margen o collar de la bobina de alta tensión tiene en el costo de materiales de transformadores de distribución. El margen corresponde a la distancia entre la última espira de cada capa del embobinado y la orilla del papel aislante. El análisis establece una comparación entre 1 y 2 cm de margen en seis capacidades de transformadores. La evaluación del costo de materiales se obtiene utilizando un programa de cómputo ya validado. Los resultados muestran una reducción del costo de los materiales de hasta 6% cuando se reduce el margen de 2 a 1 cm.

PALABRAS CLAVE

Papel diamantado, Transformador de distribución, Aislamiento, Margen de alta tensión, Costo de materiales.

ABSTRACT

An analysis of the impact of high voltage coils margins in material cost of distribution transformers is presented. The high voltage margin is the distance between the last turn of each layer of the coil and the edge of the insulation paper. The analysis is performed comparing the material cost when using 1 and 2 cm of margin in six transformer capacities. The design and the cost evaluation are obtained using a computer program that is already validated. Results show a material cost reduction up to 6% when the high voltage margin is reduced from 2 to 1 cm.

KEYWORDS

Transformer paper, distribution transformer, insulation, high voltage margin, materias cost.

INTRODUCCIÓN

El transformador es un componente esencial de los sistemas eléctricos de potencia. El principio de funcionamiento, sintetizado en la ley de Faraday, es relativamente simple: al aplicar un voltaje senoidal en las terminales del devanado primario se crea un flujo magnético en el núcleo que induce un voltaje senoidal

en el devanado secundario. Un transformador se compone de: tanque, núcleo magnético, devanados de alta tensión (AT) y de baja tensión (BT), sistema de enfriamiento y aislamiento. El material aislante que ha mostrado un buen desempeño en la industria de los transformadores es el papel diamantado, que está hecho a base de celulosa obtenida de la pulpa de las coníferas.¹⁻²

En este artículo se evalúan márgenes de 1 cm y 2 cm en la bobina de AT de transformadores de distribución monofásicos de núcleo enrollado tipo acorazado y capacidades de: 5 kVA, 10 kVA, 15 kVA, 25 kVA, 37.5 kVA y 50 kVA (capacidades preferentes en la industria eléctrica nacional). El margen se refiere a la distancia entre la orilla del papel aislante que separa a cada capa del embobinado y la última espira de la capa y puede apreciarse en la figura 1. La evaluación del impacto del uso de dos diferentes márgenes en el costo de los materiales de los transformadores se lleva a cabo utilizando un programa de cómputo. Este programa diseña los transformadores con diferente margen y calcula el costo de los materiales. Para mayor detalle sobre la metodología del programa de diseño de transformadores de distribución utilizada en este trabajo el lector puede consultar.¹ Este programa de cómputo también ha sido utilizado para la selección del material magnético del núcleo de los transformadores, haciendo un análisis de sensibilidad tomando en cuenta información de la industria mexicana.³

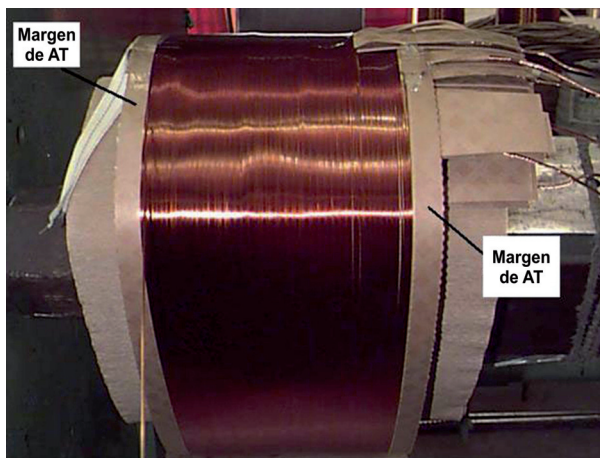


Fig. 1. Bobina de AT donde se aprecian sus dos márgenes. Se utiliza alambre magneto de cobre para la fabricación de esta bobina.

ASPECTOS RELEVANTES DEL DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN

En este trabajo se analizan transformadores monofásicos de distribución de clase de aislamiento 15 kV, núcleo tipo acorazado, inmersos en aceite y se consideraron las siguientes capacidades preferentes: 5, 10, 15, 25, 37.5 y 50 kVA. El análisis incluye la evaluación de dos opciones: margen de AT (M_{ga}) de 1 cm y de 2 cm. En el algoritmo de diseño se utiliza el margen de la bobina de BT (M_{gb}) para determinar la altura de la bobina (A_b).

$$A_b = A_c + 2M_{gb} \quad (1)$$

Donde A_c representa el ancho del conductor de BT que es de aluminio. En el programa de diseño utilizado se tienen 7 opciones de ancho de conductor de BT en el rango de 114.3 mm a 254 mm. Mientras que el cálculo de la altura de la bobina de AT (A_a) se obtiene a partir de la siguiente expresión,

$$A_a = A_b - 2M_{ga} \quad (2)$$

En la figura 2 se muestra el devanado de BT de aluminio con sus respectivos márgenes. Los valores de los márgenes de AT recomendados para las diferentes clases de aislamiento se muestran en la tabla I. Estos márgenes se recomiendan siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones: a) proceso de horneado por 4 horas y temperatura del elemento activo de mínimo 75°C, b) doblez del papel en las

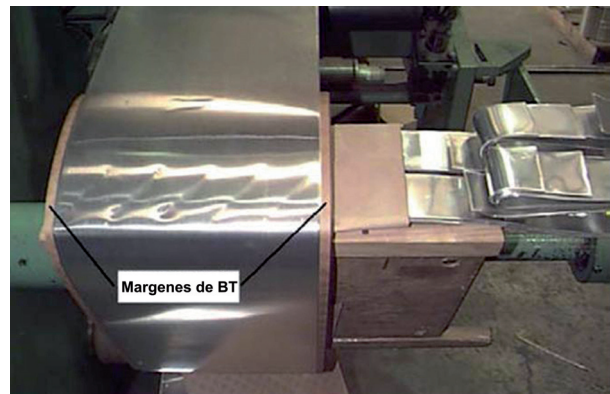


Fig. 2. Márgenes en el devanado de BT.

Tabla I. Márgenes del devanado de AT utilizados en las diferentes clases de aislamiento del transformador.

Clase de aislamiento (kV)	Margen de alta tensión M_{ga} (mm)
15	10
25	20
34.5	40

orillas del papel diamantado para evitar que los conductores en los extremos de la bobina reduzcan el margen de AT, es decir, los dobleces sirven como topes mecánicos para los conductores de las orillas, c) condiciones de vacío de 0.5 mm Hg durante el proceso.

El número de vueltas por capa (V_{pc}) se obtiene cuando se conoce el calibre del conductor de AT y su correspondiente diámetro (D_c).

$$V_{pc} = \frac{Aa}{D_c} \quad (3)$$

La figura 3 muestra el diagrama de flujo de diseño de transformadores de distribución para minimizar el costo evaluado. Se pueden utilizar otras funciones objetivos como por ejemplo el costo de materiales. Los valores de los factores de espacio de las laminaciones del núcleo que se

utilizan en el programa se pueden encontrar en la referencia.³

El número de vueltas de BT (NBT) de un transformador monofásico depende de la capacidad del transformador (kVA) elevada a la potencia 0.4527, el programa ejecuta un barrido desde $-5+N_{BT}$ hasta $+5+N_{BT}$. N_{BT} está dado por,

$$N_{BT} = 81.1988 ([kVA])^{-0.4527} \quad (4)$$

El análisis que se efectuó con la ayuda del programa de diseño consistió en analizar y comparar el costo de un transformador monofásico con núcleo acorazado, con bobinas con configuración B-A-B aumentando el margen de AT $M_{ga} = 1$ cm a $M_{ga} = 2$ cm para transformadores de clase de aislamiento 15 kV. El margen de AT de 2 cm lo utilizan fabricantes que no cumplen con alguna de las condiciones ya mencionadas.

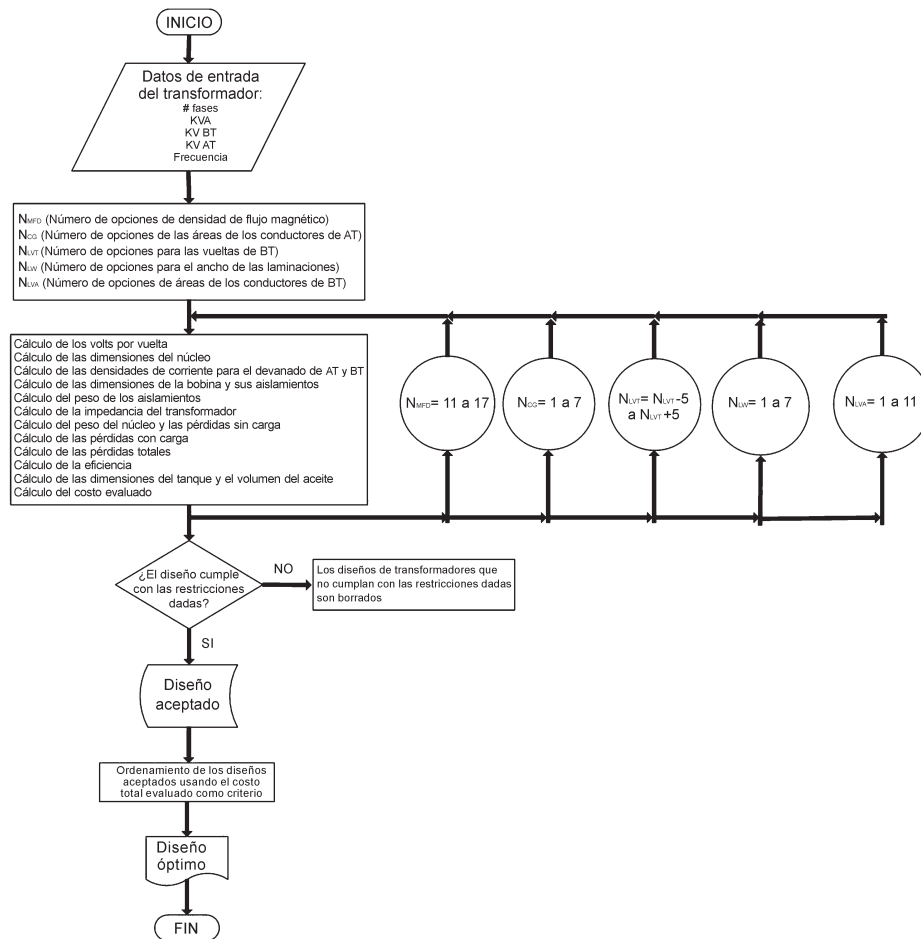


Fig. 3. Diagrama de flujo del programa implementado en MATLAB.

AISLAMIENTO A BASE DE PAPEL DIAMANTADO

Un buen aislamiento eléctrico en un transformador ofrece confiabilidad de que será capaz de soportar los cambios de tensión que se presenten. Aunque el nivel de aislamiento del transformador debe ser suficientemente alto para garantizar su confiabilidad, al mismo tiempo se debe establecer un equilibrio entre costo y confiabilidad.

Entre la variedad de aislamientos que emplean la industria de fabricación de transformadores se encuentran el papel diamantado, que es un material hecho a base de celulosa, que se encuentra en las fibras de algunos vegetales, y se obtiene principalmente de las coníferas.⁴ La madera de estos árboles contiene cuatro componentes básicos: celulosa, semi-celulosa, savia y extractos. La celulosa es un polisacárido formado de enlaces de moléculas de glucosa, es decir, miles de moléculas de glucosa, la unión de dos moléculas de glucosa forman un disacárido entonces la unión de miles de estas moléculas forman lo que es un polisacárido que es el caso de la celulosa.

A continuación se resume el proceso de obtención del papel diamantado: La pulpa sumergida en agua (97%) se agita y se deposita sobre una malla perforada donde se elimina el agua y se forma una capa básicamente de papel. El proceso continúa sobre una banda donde cilindros presionan la capa de pulpa para secarla y lograr el espesor requerido. Posteriormente se le agrega un adhesivo especial y se trata haciéndolo pasar por un tambor precalentado. Por último se estampa mediante unos rodillos de cobre un adhesivo epóxico dándole forma de rombos separados 5/8 de pulgada (15.875 mm) entre centros.

Durante el proceso de horneado o curado del devanado del transformador, el papel diamantado se compacta con los conductores, creando una masa sólida similar a la de un encapsulado, proporcionando una mayor resistencia mecánica debido a la solidificación de sus elementos, estabiliza la oxidación, la deshidratación y la hidrólisis, haciendo posibles temperaturas de operación más altas sin sacrificar la vida útil del transformador, además si se utilizan ductos de enfriamiento se permite la circulación del aceite entre el papel y la bobina, enfriando y reduciendo el envejecimiento térmico del aislamiento.

En la figura 4 se muestra la elaboración de una bobina utilizando el papel diamantado Insuldur. Los elementos en forma de diamante, surgidos de la resina epóxica se pueden apreciar en la figura 4, se integran a las capas del embobinado cuando se funden en el proceso de horneado (curado), que se lleva a cabo al mismo tiempo que el proceso de vacío.

En las figuras 4 y 5 pueden apreciarse los ductos de enfriamiento de 3.2 mm de espesor; en la figura 4 se muestran los ductos tanto en la bobina de alta tensión como en la bobina de baja tensión. Estos ductos juegan un papel importante en el enfriamiento de la bobina, ya que por ellos circula el aceite, el cual absorbe el calor de las bobinas y el núcleo y lo disipa a través de las paredes del tanque.

El papel Insuldur diamantado que se utiliza en la fabricación de bobinas de transformadores de distribución de hasta 34.5 kVA (clase de aislamiento) usualmente tiene dos espesores: 0.127 mm y 0.254

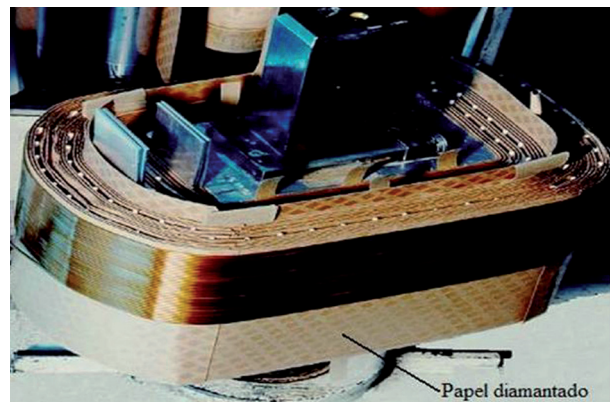


Fig. 4. Papel Insuldur diamantado en la bobina de alta tensión. Pueden observarse los diamantes del papel diamantado.

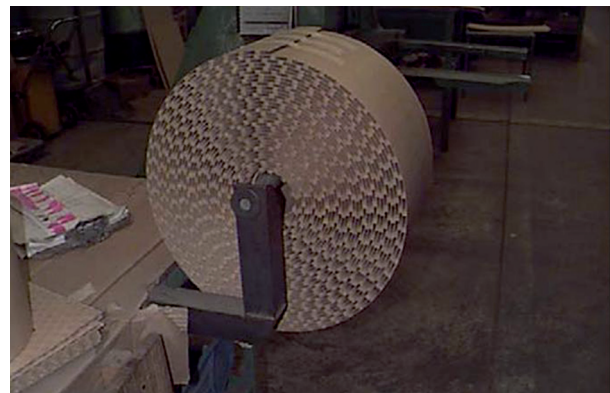


Fig. 5. Rollo de ductos de enfriamiento que se colocarán en las bobinas de transformadores.

mm. Aunque en algunos diseños se requiere agrupar papel de diferentes espesores para dar el espesor necesario para resistir los esfuerzos dieléctricos y mecánicos que se generan en los devanados de AT y BT (por ejemplo: 0.127 mm+0.254 mm, 0.254 mm+ 0.254 mm).

HORNEADO AL VACÍO DEL CONJUNTO NÚCLEO-BOBINAS DEL TRANSFORMADOR

La humedad en los aislamientos de los transformadores es uno de los factores principales que degradan el aislamiento y afectan la vida del transformador.⁵⁻⁸ Así el elemento activo (conjunto núcleo bobinas) se debe someter a un proceso de horneado al vacío en su fabricación y durante la operación del transformador se debe mantener al aceite libre de humedad. La humedad puede penetrar a través del tanque debido a un empaque deficiente en la tapa principal, en las boquillas, en la tapa de registro y en los accesorios que van colocados en el tanque. También a un par de apriete inadecuado de los accesorios colocados en el tanque y materiales deficientes que al exponerse a las condiciones ambientales se degradan.

El proceso de horneado y secado al vacío de los transformadores de distribución es una práctica obligada que se lleva a cabo con el fin de reducir la humedad que se presenta en sus componentes internos (papel diamantado, papel crepe, cartón dieléctrico, madera) ya que origina serios problemas internamente. El proceso típico de horneado consiste en mantener al conjunto núcleo-bobina a una temperatura de 120°C durante 4 horas para evaporar la humedad de los aislamientos. Si se exceden las 4 horas el aislamiento puede envejecer prematuramente. Una vez terminado el horneado se introduce el conjunto núcleo-bobinas al tanque y se inicia el proceso de vacío. Existe también la posibilidad de hacer el horneado al vacío de manera simultánea.⁵

En la figura 6 se muestra el nivel de vacío contra tiempo para un transformador de 25 kVA, 13.2 kV-120/240 V, la temperatura ambiente fue de 28 °C, la temperatura del elemento activo al final del horneado fue de 83°C y la humedad relativa del ambiente fue de 72%.

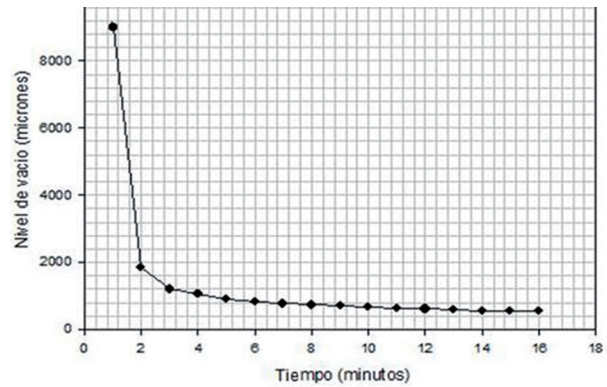


Fig. 6. Nivel de vacío contra tiempo de vacío para un transformador de 25 kVA, 13.2 kV-120/240 V.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de las corridas del programa de diseño de transformadores se muestran en la tabla II. Los transformadores de la tabla I tienen capacidades de 5 a 50 kVA y los niveles de voltaje que manejan son: 13.2 kV-120/240 V. Estos transformadores se diseñaron de acuerdo a la norma mexicana NMX-116, donde se tienen que cumplir restricciones de pérdidas, eficiencia, impedancia, y corriente de excitación.⁹

El porcentaje que se muestra en la tabla II representa la diferencia en costo de materiales de un transformador con un margen de AT $M_{ga} = 1$ cm y con un margen de AT $M_{ga} = 2$ cm. En este estudio se determinó que la masa del transformador con margen de 1 cm es menor que la masa del transformador con margen de 2 cm para todas las capacidades preferentes de 5 a 50 kVA y se

Tabla II. Costo de materiales (en pesos mexicanos) del transformador contra la capacidad. En la cuarta columna se indica el porcentaje de diferencia entre los costos de materiales.

Capacidad (kVA)	Costo de materiales del transformador con $M_{ga}=1$ cm	Costo de materiales del transformador con $M_{ga}=2$ cm	% de diferencia de costos de materiales
5	2472.27	2604.64	5.35
10	3569.42	3759.70	5.33
15	4365.59	4639.04	6.26
25	6452.63	6847.73	6.12
37.5	7786.25	8316.05	6.80
50	10084.04	10563.38	4.75

determinó una diferencia promedio de 2.5 kg entre los transformadores con margen de AT de 2 y 1 cm respectivamente; en la figura 7 se muestran otros resultados obtenidos.

El costo de materiales del transformador está determinado por el costo del devanado de AT, costo del devanado de BT, costo del núcleo, costo del aceite refrigerante, el costo del aislamiento y el costo del tanque y los resultados obtenidos se muestran en la tabla II.

El cálculo de peso de los conductores de BT y AT se llevó a cabo con las siguientes expresiones:

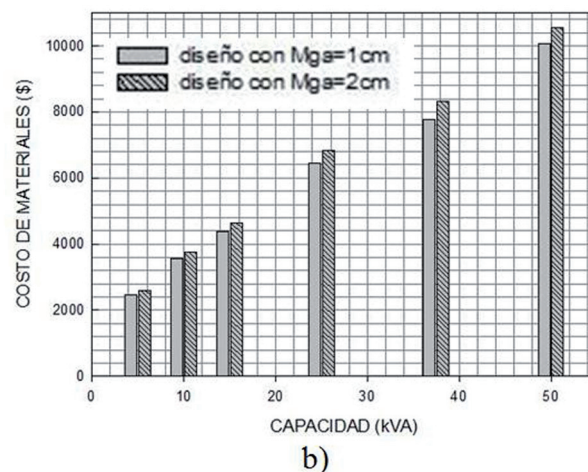
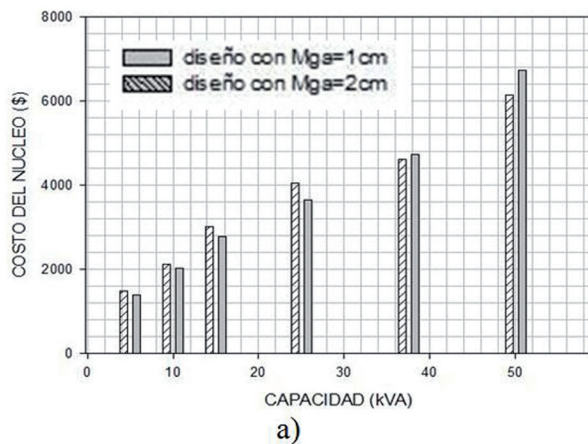


Fig. 7. a) Costo del núcleo (en pesos mexicanos) contra capacidad del transformador considerando márgenes de AT de 1 y 2 cm respectivamente, b) Comparación del costo de materiales del transformador (en pesos mexicanos) considerando márgenes de AT de 1 y 2 cm respectivamente.

$$P_{at} = (V_{ma} N_1 + 1) N_{\phi} S_{at} P_{al} (1.03 \times 10^{-6}) \quad (5)$$

$$P_{bt} = (V_{mbi} N_{bt} + 1) N_{\phi} S_{bt} P_{al} (1.03 \times 10^{-6}) \quad (6)$$

Donde:

S_{at} Área de sección transversal del conductor de AT (mm²).

S_{bt} Área de sección transversal del conductor de BT (mm²).

P_{at} Peso del conductor de AT (kg).

P_{bt} Peso del conductor de BT (kg).

P_{al} Densidad del aluminio (kg/mm³).

N_{ϕ} Número de fases.

V_{ma} Perímetro medio de la bobina de alta tensión.

V_{mbi} Perímetro medio de la bobina de baja tensión interior.

N_{bt} Número de vueltas de la bobina de baja tensión.

N_1 Número de vueltas de alta tensión incrementado en 5%.

Los devanados del transformador considerado en esta investigación son de aluminio. Para determinar el costo de los conductores de AT y BT se utilizan las siguientes expresiones:

$$Costo_{at} = (P_{cat}) (C_{at}) \quad (7)$$

$$Costo_{bt} = (P_{cbt}) (C_{at}) \quad (8)$$

Donde:

C_{at} Costo unitario del aluminio (\$/kg)

P_{cat} Peso total del conductor de AT (kg)

P_{cbt} Peso total del conductor de BT (kg)

El costo de materiales de un transformador está dada por

$$C_{mat} = Costo_{at} + Costo_{bt} + C_{tan} + C_{aceite} + C_{aislamiento} + C_{nucleo} \quad (9)$$

Donde $Costo_{at}$ representa el costo del material del devanado de AT, $Costo_{bt}$ es el costo del material de BT, C_{tan} el costo del material del tanque, C_{aceite} es el costo del aceite mineral empleado, C_{aisl} es el costo del aislamiento empleado (se excluye al aceite) y finalmente C_{nucleo} es el costo del núcleo.

El costo ligeramente mayor cuando se utiliza un margen de 2 cm puede ser compensado con el no requerir condiciones de proceso de control estricto.

CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra que los transformadores de distribución de clase de aislamiento 15 kV de 5 a 50 kVA con margen de AT de 1 cm tienen menor costo de materiales que los transformadores que usan 2 cm como márgenes de AT. El porcentaje de ahorro está en el rango de 4.7 a 6.8 %.

En este trabajo se indican los requisitos que se deben cumplir para reducir los márgenes de 2 cm a 1 cm. Estos requisitos son: utilizar papel aislante diamantado con doblez, lo cual sirve como un retén mecánico, aplicar niveles de vacío de 500 micrones de mercurio durante el proceso de vacío y aplicar previamente un horneado al elemento activo de máximo 4 horas a 120 °C para evaporar la humedad.

Por otro lado, utilizar un margen de 2 cm en AT (clase de aislamiento 15 kV) es la única opción de fabricantes que no cuenten con equipo especializado de horneado y vacío, aun cuando el costo de los materiales es mayor en este caso

REFERENCIAS

1. J. C. Olivares Galván, P. Georgilakis, R. Escarela Pérez, Eduardo Campero-Littlewood. Optimal Design of Single-Phase Shell-Type Distribution Transformers. Enviado a Electric Engineering, (Feb/2009). http://desarrollo.azc.uam.mx/curso/tesis/Optimal_Design_of_Shell_Type_Distribution_Transformers_1_Dec_2009.pdf, accesado marzo 2010.
2. P. S. Georgilakis. Spotlight on modern transformer design, Springer. 2009. London, UK.
3. J. C. Olivares-Galván, P. S. Georgilakis, E. Campero-Littlewood, R. Escarela Pérez. Core Lamination Selection in Distribution Transformers. a enviarse a Electric Engineering, (Abril/2009). http://desarrollo.azc.uam.mx/curso/tesis/Lamination_paper_EPCS_1_Dec_2009_revised_paper.pdf, accesado marzo 2010.
4. D. Kind, H. Kärner. High-Voltage Insulation technology. Germany: Friedr. Vieweg & sohn-Braunshweig/Wiesbaden. 1985.
5. A. S. Asemen. The drying of power transformer insulation. Master Degree Thesis. University of Nottingham. July 1981.
6. B. García, J. C. Burgos, Á. Matías Alonso, J. Sanz. A Moisture-in-Oil Model for Power Transformer Monitoring—Part II: Experimental Verification. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 20, No. 2, April 2005. pp. 1423-1429.
7. B. García, J. C. Burgos, Á. Alonso, J. Sanz. A Moisture-in-Oil Model for Power Transformer Monitoring—Part I: theoretical foundation. IEEE Trans. Power Delivery. Vol. 19, Oct. 2004.
8. J. A. Almendros-Ibáñez, J. C. Burgos, and B. García. Transformer Field Drying Procedures: A Theoretical Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, October 2009.
9. NMX-J116-ANCE2005. Norma Mexicana ANCE para transformadores de distribución tipo poste y tipo subestación – Especificaciones.

