



DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE ALTA EFICIENCIA CON BASE EN LA NOM-002-SEDE-TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

METODOLOGÍA DEL DISEÑO DEL TRANSFORMADOR

Dos materiales magnéticos diferentes (M3 y acero amorfo: Metglass 2605SA1) con diferentes espesores se consideran para seleccionar la opción que cumple con las nuevas eficiencias de la NOM-002. Los diseños de transformadores son comparados con base en el costo evaluado del transformador. El impacto de los diferentes materiales magnéticos en el costo evaluado se calcula para un transformador monofásico de 25 kVA

Los transformadores cumplen con las restricciones de construcción y de las normas mexicanas vigentes. El documento considera el impacto del factor de espacio en pérdidas en el núcleo y del factor de destrucción. Se concluye que para la capacidad analizada, la laminación M3 es la mejor opción. Este documento proporciona directrices para seleccionar el material magnético adecuado para transformadores de distribución. Los transformadores que se consideran en este reporte son tipo acorzado con núcleo enrollado.

Debido a la importancia de mejorar el rendimiento de núcleo eléctrico, los investigadores están muy activos en el desarrollo de mejores núcleos de los transformadores [5.1] - [5.8]. Mejores técnicas de fabricación se han desarrollado como consecuencia de una mejor comprensión de los factores que influyen en las propiedades magnéticas. Hoy en día, la calidad de los aceros eléctricos se ha mejorado sustancialmente. Factores que impactan las pérdidas del núcleo se presentan en [5.9] - [5.10]: (a) la calidad del aislamiento de la laminación, (b) el porcentaje de silicio en la aleación, (c) las impurezas químicas, (d) el tamaño de grano, (e) control de la orientación cristalina, y (f) el espesor de núcleo de laminación.

En general, las mejoras en los materiales del núcleo y procesos de fabricación tienen un impacto significativo en el coste del transformador. Cuando el material magnético mejora, el tamaño del núcleo puede ser reducido. El uso de un mejor material con la zona de entrehierros mejorada permite una mayor densidad de flujo. Sin embargo, el costo de producción por unidad de peso de aceros eléctricos aumenta rápidamente a medida que se reduce espesor de laminación. Mientras que los materiales más delgados pueden ser necesarios para ciertas aplicaciones, el uso de laminaciones más delgadas de lo necesario es un desperdicio.

Los precios de transformadores suelen compararse en términos del costo evaluado (CE) y el precio de compra (también llamado precio de oferta). El CE de un transformador es la suma del precio de compra más el costo de las pérdidas del transformador a lo largo de la vida del mismo [5.11]. Las compañías eléctricas suelen comprar transformadores basadas en CE, es decir, seleccionar la oferta que minimice el CE. Por otra parte, los usuarios industriales suelen comprar transformadores basados en el precio de compra del transformador, es decir, seleccionar la oferta con el precio mínimo de compra. En consecuencia, los fabricantes de transformadores minimizan el CE o el precio de venta en función del tipo de cliente.

El término "aceros eléctricos" ha sido universalmente aceptado como la designación de los materiales magnéticos laminados rolados en los que el silicio es un elemento de aleación importante [5.12]. La designación de la American Iron and Steel Institute (AISI) para los grados de acero eléctrico consisten en la letra M (material magnético) seguido de un número (por ejemplo, M3) para especificar el tipo de laminación. En el momento en que el sistema AISI fue aprobada, el número asignado a cada tipo de grado fue de aproximadamente diez veces las pérdidas en el núcleo, expresada en watt por libra para un espesor dado. Los números que acompañan a la letra M en la actualidad no tiene el mismo significado.

Por otro lado, a principios de 1960, los metales con cristales en estado amorfo fueron producidos por primera vez. Los metales amorfos son un tipo de material relativamente nuevo que no tiene una estructura cristalina como los metales comunes, y puesto que su estructura es más bien parecida a la del vidrio son llamados "vidrios metálicos". Los metales amorfos se forman mediante una solidificación rápida donde el metal derretido es super-enfriado en segundos, lo que provoca que los átomos se acomoden de manera arbitraria [5.1]. Este material, a pesar de ser muy delgado, tiene una gran dureza y resistencia física, tiene propiedades magnéticas que lo hacen fácilmente magnetizable y desmagnetizable. Los primeros transformadores que se hicieron experimentalmente con núcleos de metal amorfo presentaron una gran reducción de pérdidas en el núcleo.

Para iniciar el análisis, es importante conocer las pérdidas por unidad de peso de los materiales magnéticos considerados: M3 y acero amorfo. De acuerdo con [5.13] a 60 Hz los watts por kilogramo de estas laminaciones se puede modelar como una función de densidad de flujo magnético B.

$$w_{kg}^{M3} = -45.94322511 + 17.94316167 \cdot B - 2.787213965 \cdot B^2 + 0.21646225 \cdot B^3 - 0.008382569 \cdot B^4 + 0.000129908 \cdot B^5 \quad (2)$$

$$w_{kg}^{amorpho} = 0.0003B^3 - 0.006B^2 + 0.0715B - 0.2288 \quad (5)$$

Las funciones dadas por (1) y (2) se pueden observar en la figura 5.1. De la misma manera las pérdidas aparentes para M3 y el acero amorfo se muestran en la figura 5.2.

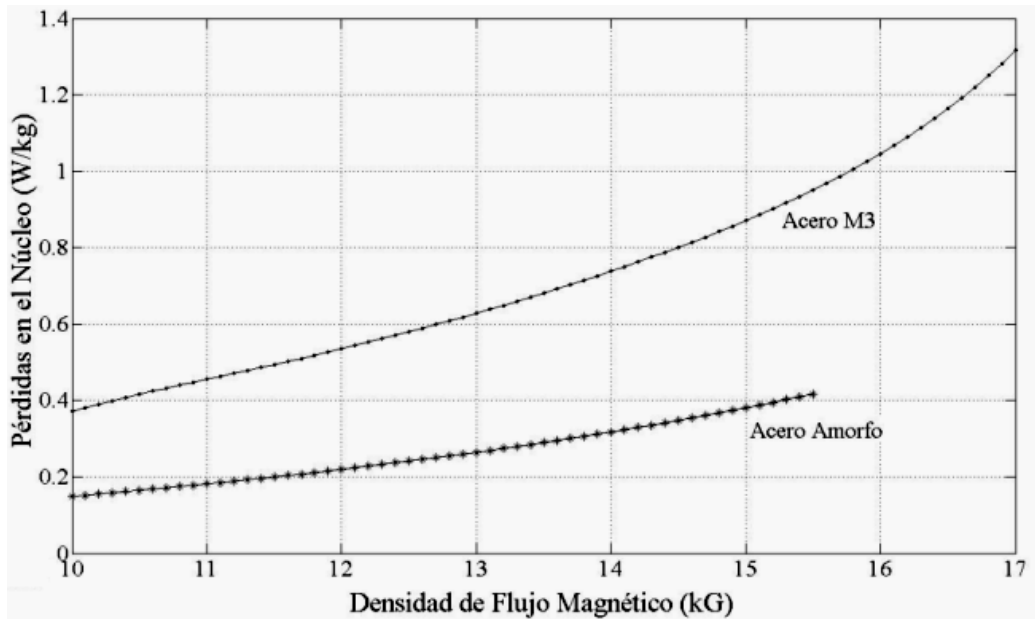


Figura 5.1. Comparación de pérdidas magnéticas en núcleos de metal amorfo y de acero M3 en W/kg para diferentes valores de densidad de flujo.

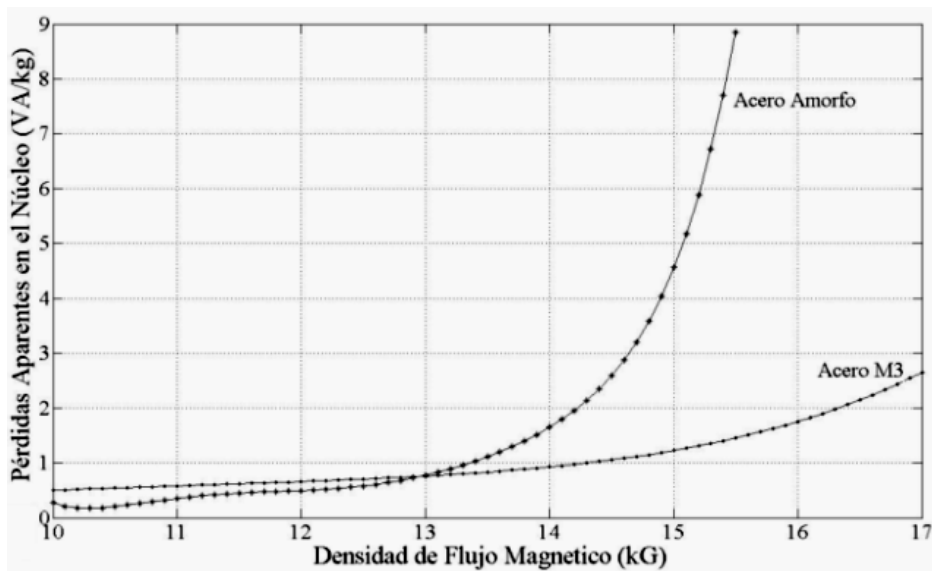


Figura 5.2. –Comparación de pérdidas aparentes de un transformador con núcleo de metal amorfo y de acero M3.

El factor de espacio o factor de laminación es la medida de la compactación de un núcleo de acero eléctrico. Esto también se conoce como factor de apilamiento. Factor de espacio es la relación entre el equivalente "sólido" de volumen, calculado a partir del peso y la densidad del acero, al volumen real del paquete comprimido. La figura 5.3 ilustra cómo el factor de espacio varía como una función de la presión para las diferentes laminaciones. La presión de compresión de las laminaciones no debe exceder un límite máximo de 1.0 MPa para evitar la reducción excesiva de la resistividad del aislamiento de la laminación [5.14].

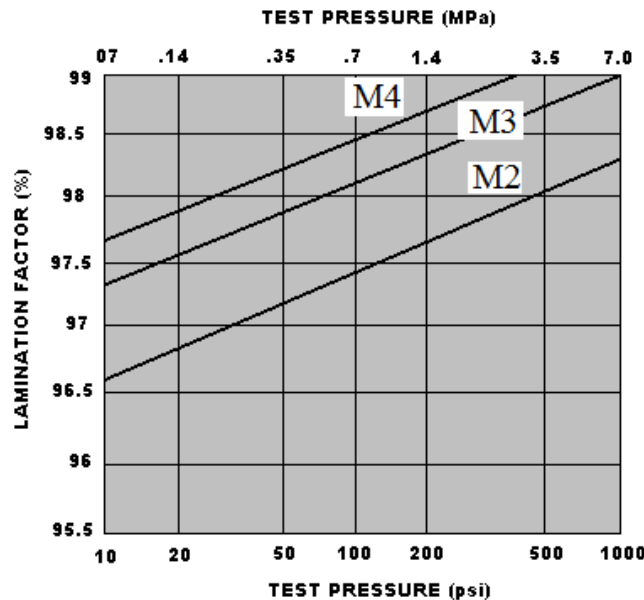


Figura 5.3. Lamination factor versus test pressure for the most widely used forms of grain oriented silicon steel produced by AK Steel Corporation Factor Laminación contra la presión de prueba para los aceros al silicio de grano orientado producido por AK Steel.

Si una presión típica de ensamble del núcleo de 20 psi (0,14 MPa) se considera, como la obtenida con máquinas flejadoras manuales, los factores de espacio para M2, M3 y M4 resultan de 96.8%, 97.6%, y 97.8%, respectivamente (Figura 3) [5.12]. Aunque el factor de espacio del acero amorfo es menor, el factor de espacio varía de 0.75 a 0.85 [5.10]. Para esta investigación se manejo un factor de espacio igual a 0.85, se selecciona este valor porque es lo que recomendó el fabricante del material amorfo.



Hay factores que se consideran como posibles causas del aumento de las pérdidas de núcleo: a) Manejo inadecuada del núcleo de acero durante la fabricación del transformador, b) recubrimiento aislante pobre de las capas de laminación, c) las disposiciones inadecuadas de las la zona de entrehierros, d) formando de rebabas en los bordes de la lamina o en los cortes que se hacen para formar los entrehierros (si están presentes rebabas en la laminación, los cortocircuitos entre laminación pueden presentarse), e) el horneado incompleto para el alivio de los esfuerzos mecánicos. Las pérdidas adicionales debido a todos estos factores se toman en cuenta mediante la inclusión de un factor de destrucción. El factor de destrucción es la relación de las pérdidas de del núcleo medidas por peso (W / kg) para un núcleo totalmente ensamblado, a las pérdidas del fabricante especificadas (W / kg) para el material magnético considerado. El factor de construcción utilizado en el software, es 1.07.

Los diseños con las dos laminaciones diferentes consideradas (M3 y acero amorfo) tienen que cumplir con todas las restricciones de fabricación y con las restricciones de la norma que se aplique: las pérdidas sin carga máximas, pérdidas totales máximas, la eficiencia, el valor mínimo y máximo de impedancia y límite máximo de la corriente de excitación. La figura 5.4 muestra el diagrama de flujo del programa utilizado para minimizar una función objetivo, tal como el CE. El programa implementado para el diseño óptimo de transformadores monofásicos de distribución tipo acorazado utiliza las expresiones (1) y (2), e incluye el factor de espacio y el factor de destrucción mencionados previamente para obtener las dimensiones del núcleo, el peso del núcleo y las pérdidas sin carga basado en el algoritmo descrito en la figura 5.4.

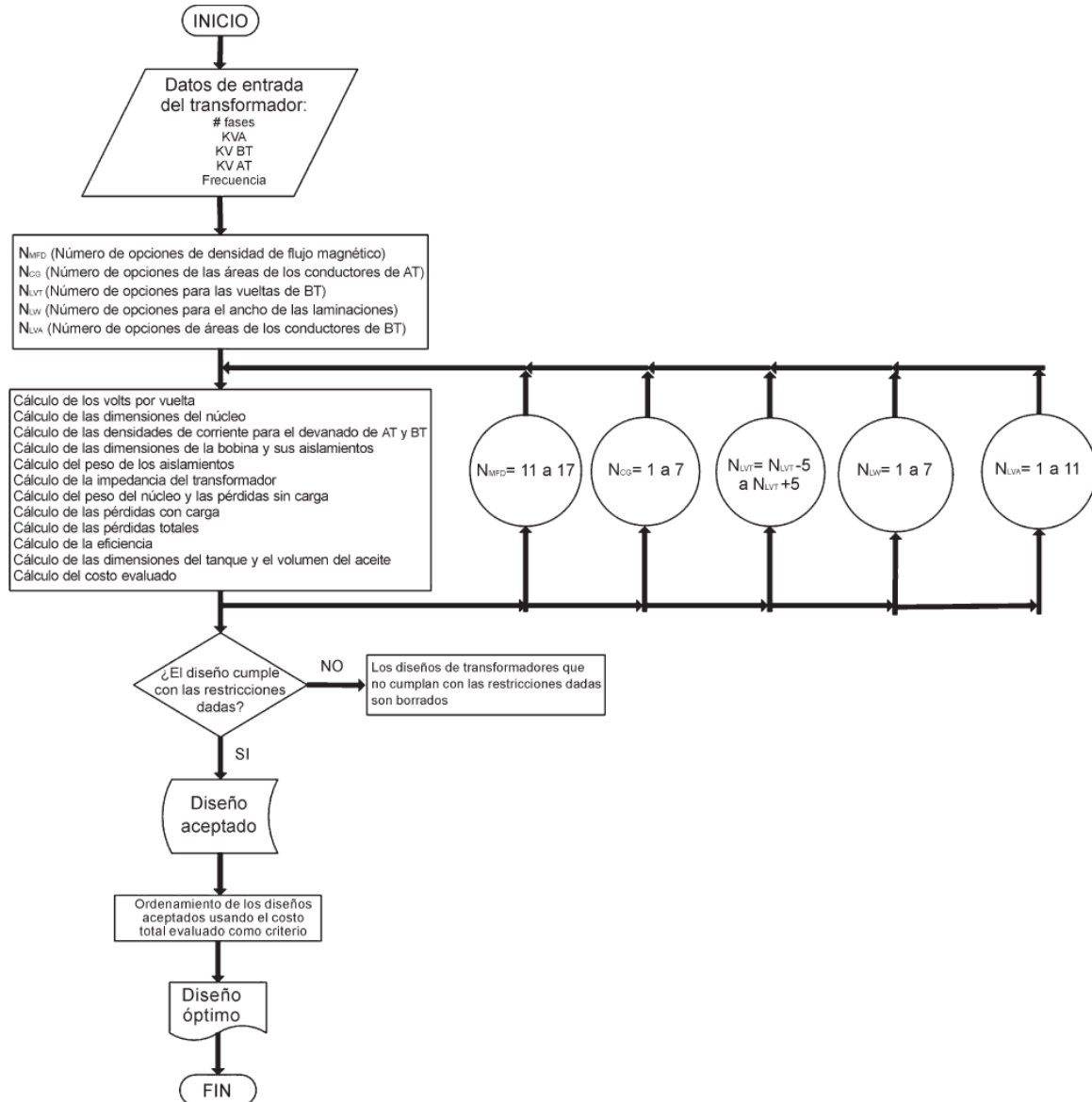


Figura 5.4. Diagrama de flujo del programa implementado para diseñar transformadores

La metodología del programa de diseño de transformadores desarrollada en este trabajo cumple cabalmente con las normas correspondientes y las especificaciones del cliente. La ventaja de este programa es que es de fácil implementación para las pequeñas y medianas empresas fabricantes de transformadores.



El programa se utilizó para diseñar transformadores, cuyas características se presentan a continuación: Capacidades: 5-50kVA, Tensión en alta: 13.2-33kV, Tensión en baja: 240/127V, Fases: monofásico, Frecuencia: 60Hz, Material Magnético del Núcleo: Acero al silicio de grano orientado laminado grado M3 y Acero amorfo grado 2605SA1, Refrigeración: OA (sumergido en aceite, con enfriamiento natural), Materiales del devanado de alta tensión: Alambre magneto de aluminio, Materiales del devanado de baja tensión: Cinta o lámina de aluminio.

Los costos de los materiales utilizados en el diseño están dados en por unidad en términos de un precio base de \$75/kg: Acero amorfo 1pu, Aluminio 0.53pu, Acero al silicio 0.39pu, Aceite 0.062 pu, Aislamiento 0.543pu, Acero al carbón para el tanque 0.4pu.

El programa tiene como datos de entrada las especificaciones del transformador: capacidad del transformador (kVA), número de fases, voltajes, elevación de temperatura, frecuencia, conexión de los devanados y valores de garantía (porcentaje de corriente de excitación, porcentaje de impedancia, pérdidas en el núcleo, pérdidas totales y eficiencia). Los valores de garantía se obtienen de la base de datos con las que cuenta el programa desarrollado. El programa ha sido validado experimentalmente y su tiempo de ejecución es de 268 segundos. El diseño de los transformadores se lleva a cabo en tres etapas: 1) Circuito Magnético, 2) Circuito Eléctrico y 3) Diseño Mecánico.

El programa obtiene el diseño del transformador utilizando como función objetivo el costo evaluado. El costo evaluado toma en cuenta no sólo el precio inicial del transformador sino también el costo de operación y mantenimiento durante la vida útil del transformador. El costo evaluado (CE) se define de la siguiente manera [5.6]:

$$CE = CMT + A \square PSC + B \square PCC \quad (5.1)$$

Donde: CMT es el costo de materiales del transformador (en pesos mexicanos), A el costo de las pérdidas en vacío del transformador (\$89.90/W), B el costo de las pérdidas con carga del transformador (\$44.28/W) [5.15], PSC las pérdidas sin carga (W) y PCC las pérdidas con carga (W).

El programa de diseño tiene las siguientes variables de iteración: Vueltas del embobinado de baja tensión, calibres de conductores de alta tensión y baja tensión, densidades de flujo magnético y anchos de láminas. Se utilizan 11 calibres de alambre magneto para alta tensión, 7 diferentes cintas de aluminio para el devanado de baja tensión y 4 diferentes anchos de lámina del núcleo. Para el diseño de los transformadores con núcleo de material amorfo la densidad de flujo magnético inicia en 11kG y se incrementa en 0.1 hasta llegar a 15kG y se asume un factor de espacio de 0.85 (descrito más adelante). Para el diseño con núcleo de acero al silicio la densidad de flujo magnético inicia en 15kG

y se incrementa en 0.1 hasta llegar a 17kG y el factor de espacio se toma de 0.97. Por falta de espacio no se dan más detalles del algoritmo del programa de diseño, pero los lectores interesados pueden obtener más detalles sobre el funcionamiento del programa utilizado en [5.16].

RESTRICCIONES DE DISEÑO DEL TRANSFORMADOR

Las restricciones de diseño del transformador se utilizan para determinar la región de diseño de factibilidad donde los parámetros de diseño óptimo del transformador pueden ser determinados. Las siguientes son las restricciones que se incluyen en el método de optimización del diseño.

A. Eficiencia

Las eficiencias mínimas en comparación contra la capacidad del transformador y tomando en cuenta también la clase de aislamiento de los transformadores monofásicos se puede ver en la figura 5.5, lo cual se ha tomado de la norma mexicana [5.17].

La eficiencia se calcula

$$\eta = \frac{C}{P_{Dev} + P_{fe} + C} 100 \% \quad (5.2)$$

donde :

η = Eficiencia

C=Capacidad nominal del transformador en kVA

P_{fe} = Pérdidas máximas en el núcleo a tensión nominal en kW

P_{dev} = Pérdidas máximas en los devanados a capacidad nominal kW a 85°C ó 75°C

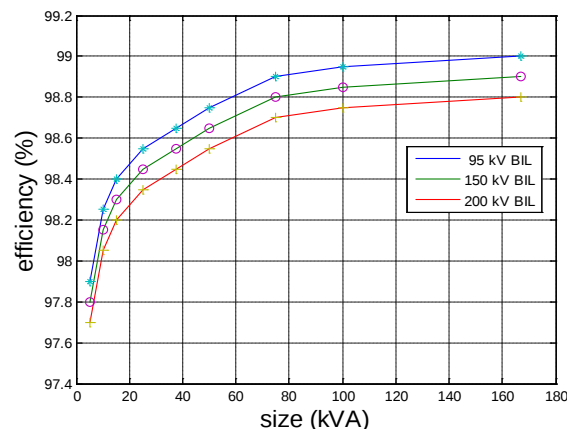


Fig. 5.5 Eficiencias mínimas exigidas por la norma mexicana para transformador monofásico [5.17].

B. Corriente de excitación

De acuerdo con [5.17], la corriente de excitación no debe exceder de 1.5% para transformadores monofásicos y trifásicos con capacidad superior a 45 kVA. Para transformadores trifásicos de hasta 45 kVA la corriente de excitación no debe ser mayor de 2.0%.

C. Pérdidas sin carga y pérdidas totales

La Tabla 5.1 muestra las pérdidas sin carga y las pérdidas totales para los transformadores de distribución monofásicos.

Tabla 5.1. Pérdidas sin carga máximas (W) y pérdidas totales máximas (W) para transformadores monofásicos [5.17].

kVA	Nivel básico de aislamiento					
	95 kV		150 kV		200 kV	
	Pérdidas sin carga (W)	Pérdidas totales (W)	Pérdidas sin carga (W)	Pérdidas totales (W)	Pérdidas sin carga (W)	Pérdidas totales (W)
5	30	107	38	112	63	118
10	47	178	57	188	83	199
15	62	244	75	259	115	275
25	86	368	100	394	145	419
37.5	114	513	130	552	185	590
50	138	633	160	684	210	736

D. Impedancia

La tabla 5.2 muestra las restricciones de impedancia para transformadores de distribución monofásicos. La impedancia depende de la clase de aislamiento y de la capacidad del transformador.

Tabla 5.2. Restricciones de impedancia para transformadores monofásicos de 5 kVA a 167 kVA [5.17].

Clase de aislamiento (kV)	Impedancia (%)
1.2 to 25	1.5 a 3.00
25	1.50 a 3.25
34.5	1.50 a 3.50



Las eficiencias en transformadores de distribución están en fase de transición y los fabricantes se están preparando para ofrecer transformadores con las nuevas eficiencias y niveles de pérdidas como se muestra en la tabla 5.3 y 5.4 (tomadas de [5.18]). En las tablas 5.3 y 5.4 sólo se han considerado el caso monofásico.

Para la determinación de la eficiencia se deben considerar las pérdidas en vacío y debidas a la carga referidas a un factor de carga del 80% derivada de la medición de las pérdidas al 100% de la carga y corregida (a 85 ° C) y un factor de potencia unitario de acuerdo a [5.18]:

$$\%E = \frac{100(P \square kVA \square 1000)}{P \square kVA \square 1000 + NL + LL \square P^2 \square T} \quad (5.4)$$

Donde:

P = Carga por unidad (0,8)

kVA = kVA (nominal)

NL = Pérdidas en vacío a temperatura ambiente W

LL = Pérdidas debidas a la carga a temperatura de referencia (a 85°C) W

T = Factor de corrección para las pérdidas de carga a 70 °C (0.952332)

La diferencia entre (5.2) y (5.4) son el factores P y T. Otra diferencia importante es que ahora NOM-002-SEDE/ENER-2012 solo indica valores de pérdidas totales y no indica valores de pérdidas sin carga. En general hay un incremento en la eficiencia que se exige para los transformadores, por ejemplo para un transformador de 25 kVA de clase 15 kV, la eficiencia que se solicitará de acuerdo a la NOM-002-SEDE/ENER-2012 es de 98.90% y anteriormente con la NOM-002-SEDE-1999 era de 98.55 [5.19]. Para este mismo transformador, las pérdidas totales con la NOM-002-SEDE/ENER-2012 serán de 222 W y con la NOM-002-SEDE-1999 eran de 86 W sin carga y de 368 las totales. Con estos cambios existe la posibilidad de que resulte el CE más bajo fabricándolo con acero amorfo que con acero al silicio tradicional. Cada fabricante debe analizar y

Tabla 5.3. Eficiencias mínimas permitidas referidas a un factor de carga del 80 % para los transformadores de distribución monofásicos (Eficiencia en %)

TIPO DE ALIMENTACION	CAPACIDAD EN KVA	NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO		
		Hasta 95 (clase 15 kV)	Hasta 150 (Clase 18 y 25 kV)	Hasta 200 (clase 34,5 kV)
M o n o f á s i c o	10	98,61%	98,49%	98,28%
	15	98,75%	98,63%	98,43%
	25	98,90%	98,79%	98,63%
	37,5	98,99%	98,90%	98,75%
	50	99,08%	98,99%	98,86%
	75	99,21%	99,12%	99,00%
	100	99,26%	99,16%	99,06%
	167	99,30%	99,21%	99,13%

Tabla 5.4. Pérdidas totales máximas permitidas referidas a un factor de carga del 80 % (Unidades en W)

Tipo de Alimentación	Capacidad kVA	Nivel básico de aislamiento al impulso kV		
		hasta 95	Hasta 150	hasta 200
		Totales	Totales	Totales
M	10	113	123	140
O	15	152	167	191
N	25	222	245	278
O	37,5	306	334	380
F	50	371	408	461
Á	75	478	533	606
S	100	596	678	759
I	167	942	1064	1173
C				
O				

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron diseños de transformadores para las capacidades de 5 a 50kVA, utilizando como función objetivo el costo evaluado. Esto se aplicó tanto para el transformador de metal amorfo como para el acero al silicio M3. El precio del acero al silicio M3 se mantuvo en \$50/kg. Los resultados para el metal amorfo se obtuvieron para 2 costos diferentes: \$75/kg y \$100/kg. Las simulaciones correspondientes se muestran en las figuras 5.6 y 5.7. En la figura 5.6 se muestran los costos evaluados con el precios de \$75/kg; se puede comprobar que el costo evaluado en transformadores de metal amorfo es menor en un 7.9% que en los transformadores de acero al silicio. En la figura 5.7 se muestra que el costo evaluado de los transformadores de acero amorfo con un precio de \$100/kg es mayor en un 12% que para los transformadores de acero al silicio M3. En la figura 5.8 se muestran las pérdidas sin carga contra capacidades de transformadores con núcleo de metal amorfo y acero al silicio, se observa que el transformador con núcleo de acero amorfo tiene menores pérdidas en un 40% que en los transformadores de acero al silicio.

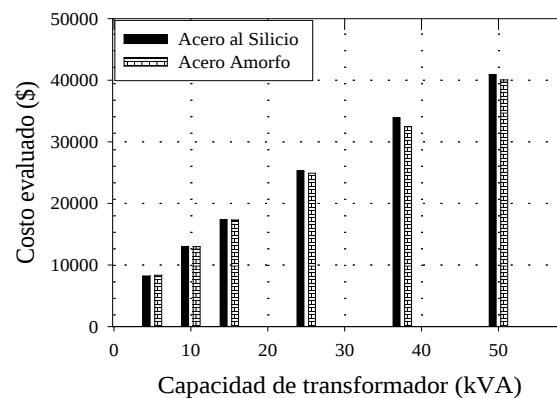


Figura 5.6. Costos evaluados de transformadores monofásicos y Capacidades. Los costos considerados del acero al silicio y metal amorfo son \$50 pesos/kg y \$60 pesos/kg, \$75 pesos/kg respectivamente.

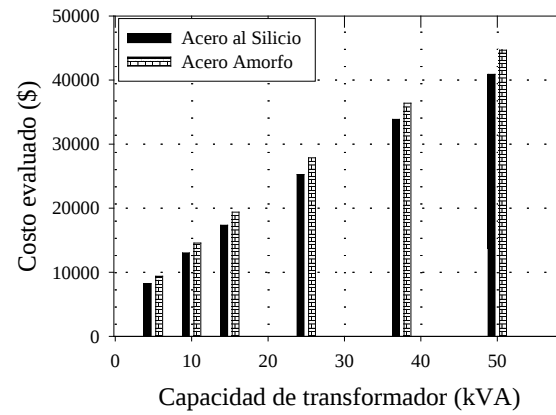


Figura 5.7. Costos evaluados de transformadores monofásicos y Capacidades. Los costos de considerados del acero al Silicio y metal amorfo son \$50 pesos/kg y \$100 pesos/kg respectivamente.

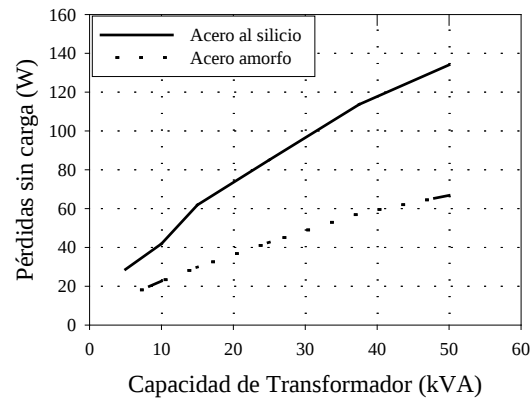


Figura 5.8. Pérdidas sin carga para transformadores con núcleo de acero amorfo y acero al silicio.



CONCLUSIONES

Este capítulo ha presentado una comparación de costos evaluados en transformadores de distribución con núcleos contruidos con dos diferentes metales: metal amorfo y acero al silicio M3 (acero convencional), con el objetivo de observar cual diseño presenta el menor costo evaluado y que cumpliera con las restricciones impuestas por la norma.

En todas las simulaciones se cumplieron con restricciones impuestas por la norma (corriente de excitación, pérdidas en el núcleo, pérdidas totales, eficiencia e impedancia). Para las capacidades preferentes analizadas de 5 a 50 kVA, resulta que los transformadores con material amorfo presentan menores costos evaluados cuando el costo del acero amorfo es \$75/kg. Cuando el costo del acero amorfo es de \$100/kg, los costos evaluados de los transformadores son mayores que utilizando el acero convencional.

Es recomendado realizar los mismos ejercicios aplicando NOM-002-SEDE/ENER-2012.



REFERENCIAS

- Córcoles F, Sáinz L, Pedra J, Sánchez-Navarro J, Salichs M, (2008) Three-phase transformer modelling for unbalanced conditions. Part 1: Core modelling and introductory examples, IET Electric Power Applications, 2: 99-112.
- Guerra FCF, Mota WS (2007) Magnetic core model, IET Science, Measurement & Technology, 1: 145-151.
- Zirka SE, Moroz YI, Marketos P, Moses AJ, (2008) Comparison of engineering methods of loss prediction in thin ferromagnetic laminations, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320:2504–2508.
- Zirka SE, Moroz YI, Marketos P, Moses AJ, Jiles DC, and Matsuo T (2008) Generalization of the Classical Method for Calculating Dynamic Hysteresis Loops in Grain-Oriented Electrical Steels, IEEE Transactions on Magnetics, 44:2113-2126.
- Theocharis AD, Milias-Argitis J, Zacharias Th (2008) Single-phase transformer model including magnetic hysteresis and eddy currents, Electr Eng., 90:229–241.
- Schulz R, Alexandrov N, Tdtreault J, Simoneau R, Roberge R (1995) Development and Application of Amorphous Core-Distribution Transformers in Québec, Journal of Materials Engineering and Performance, 4:430-434.
- Thompson JE (1967) A Review of Some Interdisciplinary Work on Grain-Oriented Silicon-Iron and its Use in Large Power Transformers, Journal of Materials Science, 2: 395-403.
- Kefalas TD, Georgilakis PS, Kladas AG, Souflaris AT, Paparigas DG (2008) Multiple grade lamination wound core: A novel technique for transformer iron loss minimization using simulated annealing with restarts and an anisotropy model, IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44:1082-1085.
- Moses AJ (1990) Electrical steels: past, present and future developments, IEE Proc. A, 1990, 137:233-245
- Littmann M (1971) Iron and silicon-iron alloys, IEEE Transactions on Magnetics, 7: 48-60.
- Alonso AM, Germain JG, Burgos JC, García B, Pérez E, Saenz de Buruaga MJ, de Pablo A (2000) Contribution to life expenditure evaluation of transformers paper-oil insulation under combined thermal and surge overvoltages stresses, 1st



International Conference on Insulation Condition Monitoring of Electrical Plant, Bujan, China.

- AK Steel Corporation: Selection of electrical steels for magnetic cores, AK Steel Corporation, 2000.
- Allegheny Ludlum Corporation (1996) Technical Data Silectron, Grain-Oriented Silicon Steel," Allegheny Ludlum Corporation, USA.
- Karsai S, Kerényi D, Kiss L (1987) Large power transformers, Elsevier, Budapest.
- Arce-Salas JJ, (2004) Factors for transformers evaluation, Comisión Federal de Electricidad, Subdirección de Distribución, Circular 31.312.02, http://desarrollo.azc.uam.mx/curso/tesis/Factores_de_evaluacion.pdf, accessed Feb 2010.
- J. C. Olivares-Galvan, P. S. Georgilakis R. Escarela-Perez and E. Campero-Littlewood, "Optimal design of single-phase shell-type distribution transformers based on a multiple design method validated by measurements", Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik Springer), Vol. 93, No. 4, pp. 237-246, 2011.
- Norma Mexicana ANCE, NMX-J-116 ANCE-2005. Transformadores de distribución tipo poste y tipo subestación, Especificaciones, pp. 7, 29-31.
- Anteproyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE/ENER-2012, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución.
- Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-1999, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución.