

DISEÑO DE TRANSFORMADOR TIPO SECO DE 225 KVA

225 KVA DRY-TYPE TRANSFORMER DESIGN

León Hernández Esmeralda y Estrada Cruz Edgar

Tecnológico Nacional de México/ITS del Occidente del Estado de Hidalgo, División de Ingeniería Electromecánica. Paseo del Agrarismo Carr. Mixquiahuala-Tula, km 2.5, Mixquiahuala de Juárez, Hgo., C.P. 42700, México. *cestradac@itsoeh.edu.mx

RESUMEN. Los transformadores tipo seco son ampliamente utilizados en la industria para subir o bajar el nivel de voltaje con la misma potencia de suministro; requieren poco mantenimiento debido a su diseño simple pero eficiente, y también ocupan poco espacio de almacenamiento. Siendo ampliamente utilizados, y con la creciente contaminación ambiental, se busca que los equipos y máquinas eléctricas mejoren su eficiencia; los transformadores no son una excepción. El objetivo de este trabajo es diseñar un transformador de distribución de baja tensión tipo seco de 225 KVA a 480-220/127 V con una eficiencia superior a la establecida por la norma y una reducción en los costos de operación y mantenimiento. Para ello se ha utilizado una metodología integral; primero se tomó como base el diseño eléctrico, se realizó el dimensionamiento de las bobinas, el núcleo y los conductores de las bobinas; incluyendo al mismo tiempo los aspectos mecánicos de conductores, núcleo y dimensiones físicas. A partir del diseño realizado se determinaron las pérdidas tanto en hierro como en cobre para determinar la eficiencia del transformador tipo seco diseñado. En conclusión, la eficiencia del transformador tipo seco diseñado de 225 KVA a 480-220/127 V fue de 98.94%, por encima del valor mínimo de referencia en la normatividad vigente (95%, NMX-J-351-1-ANCE-2016); esto implica pocas pérdidas en el transformador tanto de cobre como de acero, pero no nulas. Aunque los transformadores se encuentran entre las máquinas más eficientes, no tienen una eficiencia perfecta. Finalmente, se recomienda considerar la elección adecuada de los conductores y el uso de acero amorfo (material de menor resistividad) para reducir al mínimo las pérdidas.

Palabras clave: Transformador de distribución, diseño eléctrico, eficiencia

ABSTRACT. Dry-type transformers are widely used in the industry to raise or lower the voltage level with the same supply power; they require little maintenance due to their simple but efficient design, and they also take up little storage space. Being widely used, and with the growing environmental pollution, it is sought that electrical equipment and machines improve their efficiency; the transformers are no exception. The objective of this work is to design a dry-type low-voltage distribution transformer 225 KVA at 480-220/127 V with efficiency higher than that established by the standard and a reduction in the operation and maintenance costs. In order to this end, an integral methodology has been used; first, the electrical design was taken as a basis, the dimensioning of the coils, the core and the conductors of the coils was carried out; including at the same time the mechanical aspects of conductors, core and physical dimensions. From the design carried out, the losses in both iron and copper were determined in order to determine the efficiency of the designed dry-type transformer. In conclusion, the efficiency of the designed dry-type transformer of 225 KVA at 480-220/127 V was 98.94%, above the minimum reference value in current regulations (95%, NMX-J-351-1-ANCE-2016); this implies, few transformer losses of both copper and steel, but not zero. Although transformers are among the most efficient machines, they do not have perfect efficiency. Finally, it is recommended to consider the proper choice of conductors and the use of amorphous steel (material with a lower resistivity) to reduce losses to a minimum.

Key words: Distribution transformer, electrical design, efficiency

INTRODUCCIÓN

En los sistemas de distribución, para llevar la energía producida a los consumidores, se necesita de la ayuda de un transformador. La energía eléctrica que se produce masivamente en las plantas de generación se transmite hasta una subestación y hacia las áreas de consumo, con el uso de transformadores de distribución a niveles de tensión convenientes.

Los avances tecnológicos han impulsado la eficiencia de las máquinas. El transformador es una máquina electromecánica que por inducción electromagnética

transfiere energía de uno o más circuitos a la misma frecuencia¹. En la industria existen diferentes tipos de transformadores, se clasifican en función de su medio aislante en secos y sumergidos en líquido aislante.

En las últimas décadas se ha extendido a lo largo del mundo el uso de los transformadores de tipo seco, dado que ofrecen múltiples ventajas como: economía, compactos, mantenimiento reducido y facilidad de instalación. A pesar de lo mencionado, no se le ha dado la importancia necesaria. En la actualidad no es fácil acceder a los diseños de fabricación por cuestiones de confidencialidad.

Sus aplicaciones, dependen si el devanado no se encuentra expuesto al medio ambiente, este puede ser ocupado en lugares donde se cuente con humedad, polvo, vapor, niebla, etc. De lo contrario, solo debieran ocuparse en lugares internos y secos, ya que los contaminantes externos contienen humedad, siendo este un factor el cual puede dañar los aislamientos del transformador.

Los transformadores constan de dos bobinas, envueltas en un núcleo, por lo general de algún material ferromagnético. Al aplicarle a la primera bobina un voltaje de CA, genera un campo, el cual es transportado por el núcleo, induciendo a la segunda bobina. Dependiendo del número de espiras que tengan las bobinas, estas elevarán o disminuirán el nivel de voltaje, sin cambiar la potencia.

El transformador tipo seco (Figura 1), en una máquina la cual su principal función es reducir o elevar el nivel de tensión, utiliza el aire como medio de refrigeración. Además, su núcleo y bobinas no es necesario que estén sumergidas en líquido aislante.



Figura 1. Transformador tipo seco.

En este tipo de transformadores, el aire caliente se mantiene en la parte superior del equipo, y el aire frío refrigera el equipo por la parte de abajo. Los transformadores secos, para bajas potencias, no necesitan ningún tipo de refrigeración extra, para mayores potencias es conveniente utilizar extractores de aire o ventiladores, los cuales ayudan a una mejor circulación de aire.

Un transformador está conformado principalmente por las siguientes partes.

1. Núcleo magnético

2. Devanados

3. Aislamientos

El núcleo es el componente del transformador que servirá para conducir el flujo magnético generado. Está conformado por láminas de acero al silicio de grano, orientado de bajas pérdidas y alta permeabilidad magnética. El silicio incrementa la resistividad volumétrica del acero, logrando conducir con mayor facilidad el flujo magnético, disminuyendo las corrientes parasitas y el valor de las pérdidas². El núcleo se produce con láminas de acero muy delgadas, (0.007 a 0.014 pulgadas), porque las líneas de flujo producen a su alrededor pequeñas corrientes que son indeseables y utilizando este tipo de láminas se pueden reducir las corrientes.

Los devanados o bobinas son la parte que componen los circuitos eléctricos del transformador. La función que cumplen es crear flujo magnético para inducir en la bobina secundaria una fuerza electromotriz, y transferir potencia eléctrica del primario al secundario mediante el principio de inducción electromagnética².

Hay que tener en cuenta, que, al momento de fabricar un transformador, existen diferentes circunstancias que afectan los valores obtenidos en el diseño. Desde la maquinaria que se utiliza para la fabricación hasta el personal encargado de este proceso. Un claro ejemplo es la solera que se utiliza, se recomienda que sea rectangular, por ser más fácil de manejar. Además, sirve para que no existan demasiado espacio entre espira

Los parámetros de aceptación de los proveedores están basados en las normas NOM-063-SCFI-2001³. El material de la solera debe de cumplir con la norma antes mencionada, para que sean suaves y maleables, para que nuestro proceso sea facilitado y cumpla con las características del diseño. Habitualmente en los transformadores secos se recomienda el uso de gabinete debido al riesgo eléctrico.

La eficiencia de cualquier máquina tiene una gran importancia por el valor económico, legal y medioambiental. Un transformador, es una máquina que posee una gran eficiencia y requiere muy poco mantenimiento, ya que las partes que lo conforman no están en movimiento. La eficiencia es un indicador

de la cantidad de pérdidas totales, producto de la suma de las pérdidas sin carga y las pérdidas con carga. Las pérdidas en transformadores no son despreciables, por lo cual, es importante considerar su magnitud al seleccionar los transformadores del sistema de distribución. Las pérdidas que hay en un transformador son en calor. La eficiencia mayor ocurre cuando al nivel de carga, las pérdidas del núcleo son iguales a las pérdidas de los devanados. Un transformador, al ser una máquina estática, no tiene pérdidas mecánicas y por tanto puede alcanzar un rendimiento del 98%.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar la parte activa de un transformador tipo seco de 225 KVA a 480-277/220-127 volts para distribución con una eficiencia mayor al 95% y bajas pérdidas de acuerdo a las normas vigentes. Para lograrlo se realizará el análisis de la parte activa del transformador.

METODOLOGÍA

El presente trabajo se divide en diseño eléctrico y eficiencia. Los datos principales permiten tener una buena perspectiva de los objetivos, estos son:

- Número de fases: 3
- Tipo de transformador: Seco impregnado en barniz aislante
- Tipo de refrigeración: AA
- Tipo de uso: Distribución
- Tensión en el primario: 480/277 V
- Tensión en el secundario: 220/127 V
- Potencia nominal: 225 KVA
- Frecuencia: 60 Hz
- Conexión: Y-Y (estrella-estrella)
- Clase de aislamiento: F (155°C)

Los datos magnéticos (hierro) y eléctricos (cobre), conocidos como datos secundarios permiten el diseño de los devanados. Los datos magnéticos son:

- Acero utilizado: lámina de acero al silicio
- Grado: $M - 4$
- Factor de laminación: 99.9 %
- Espesor (grosor): 27 mm
- Densidad: 7650 kg/m³
- Resistividad: $47.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

Los datos del cobre:

- Cobre utilizado: solera
- Densidad: 8.96 gr/cm³

- Resistividad: $1.71 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

Cálculos eléctricos

La Tabla 1 muestra los datos nominales

Tabla 1. Datos nominales.

Devanado	V_L (V)	V_f (V)	I_f (A)
Primario	480	277	277.7
Secundario	220	127	590.5

Como primer punto realizamos el cálculo del número de espiras (devanado primario), para esto, los volts por vuelta se determinan como

$$V_v = 1.1 \sqrt{KVA_{1\phi} / (Z\% / 5)^{1/2}} \quad (1)$$

Para $Z\% = 3$, $V_v = 10.82 V/vuelta$. Entonces el número de espiras se determina a partir de

$$N_p = \frac{V_p}{V_v} \quad (2)$$

Al resolver, $N_p = 26 vueltas$. Se hace la corrección de volts por vuelta a 10.65 V/vuelta.

Con la idea de tener regulación de la tensión en lado primario se agregan 4 tap's con un porcentaje de $\pm 2.5\%$ y $\pm 5\%$ del voltaje nominal a la primera y quinta tap, obteniendo los siguientes voltajes y número de espiras correspondientes:

- Tap 1 (-5%): 263 V y 24 espiras
- Tap 2 (-2.5%): 270 V y 25 espiras
- Tap 3 (0%): 277 V y 26 espiras
- Tap 4 (2.5%): 284 V y 27 espiras
- Tap 5 (5%): 291 V y 28 espiras

Siguiendo el mismo proceso, el número de espiras en el secundario es $N_s = 12 vueltas$.

Como siguiente punto determinamos la sección transversal por conductor utilizando la Ec. 3.

$$A_c = \frac{I}{j} \quad (3)$$

La densidad de corriente para un transformador del tipo seco se encuentra entre 1.5 a 2.5 A/mm²; este trabajo considera $j = 2.5 A/mm^2$. Para el lado primario $A_c = 108.3 mm^2$ y para el lado secundario, $A_c = 236.1 mm^2$. Para los valores nominales del transformador se tiene una carga lineal de 360 Av/cm.

Al considerar un núcleo apilado recto, la sección del núcleo (ver Figura 2) se determina al aplicar la Ec. 4 para $\phi = 1500 \text{ Gauss}^{-1}$.

$$N_s = \frac{E \times 10^8}{4.44 \phi N f} \quad (4)$$

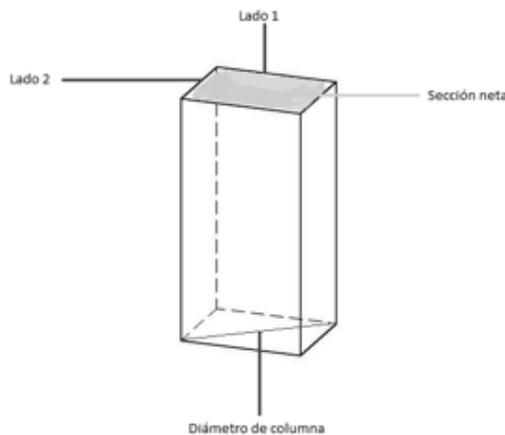


Figura 2. Columna del núcleo de un transformador.

Al aplicar la Ec. 4, $N_s = 248 \text{ cm}^2$. La longitud de cada lado de la columna es la raíz cuadrada de la sección neta, esto es $L_1 = L_2 = 15.7 \text{ cm}$ (se considera de la misma distancia, para columna cuadrada). El diámetro de la columna se determina con

$$\phi_c = \sqrt{L_1^2 + L_2^2} = 22.2 \text{ cm} \quad (5)$$

El siguiente punto es determinar la altura de la ventana, se recomienda de 2.5 a 3.5 veces el espesor¹. La altura de la ventana es $B = 54.95 \text{ cm}$.

Ahora, se determinan las características de las bobinas. La sección del conductor no debe de ser menor al calculado, debido a que la densidad de corriente aumentaría. No existe conductor de aluminio que cumpla la sección transversal del secundario, se opta por utilizar solera de aluminio de $11.5 \times 5.5 \text{ mm}$ (sección transversal total de 63.25 mm^2). Por cuestiones de diseño se toman 2 radialmente y 2 axialmente, para cumplir la altura de ventana. La altura de bobina esta determinada por

$$h_s = B - 2(d_a) \quad (6)$$

Para el collar, se usan dos, cada uno con altura de 65 mm y el aislamiento de yugo tendrá una distancia de 60 mm . Para la altura de ventana, $B = 550 \text{ mm}$ se tiene una altura de la bobina de $h_s = 300 \text{ mm}$.

La construcción de la bobina de baja tensión, se requieren dos circuitos de 12 espiras cada uno, cumpliendo con la altura de bobina calculada. Para el espesor de la bobina se multiplica el número de capas (2 para cumplir con la densidad de corriente), se colocan dos circuitos en paralelo que se multiplican por el espesor del conductor (5.5 mm) y además se agrega un porcentaje de error (5%). Esto da un espesor de 11.5 mm

El diámetro final de la bobina, se toma el diámetro de la columna (222 mm), y se agrega 12 mm , para generar espacio entre el molde y bobina; este diámetro se llama inicial, con un valor de 234 mm , al sumar el espesor de la bobina se tiene un valor de 257 mm , lo que es igual al diámetro final de la bobina secundaria.

La bobina de alta tensión utiliza una solera de las mismas características, siguiendo el mismo procedimiento se tienen los resultados de la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados para la bobina de alta tensión.

Con d	Yugo (mm)	Collar (mm)	h_s (mm)	Cir c	Espira	Espesor (mm)
2	50	50	350	2	14	23.1

Al sumar el espesor de las bobinas de alta y baja al diámetro, se obtiene el diámetro final, $\phi_f = 303.2 \text{ mm}$. La distancia entre centros del núcleo se determina a partir de la Ec. 7.

$$D_c = \frac{\phi_f}{2} + K + \frac{\phi_f}{2} \quad (7)$$

En la Figura 3, se observa la distancia que hay entre centros de bobinas.

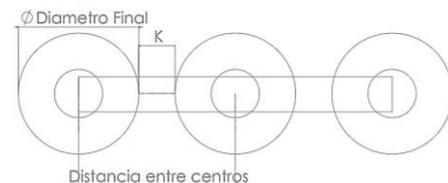


Figura 3. Distancia entre centros.

Donde K , es la distancia de separación entre bobina, se elige $K = 20 \text{ mm}$ (por cada KV se deberá tener un cm de aislamiento). La distancia entre centros es $D_c = 323.2 \text{ mm}$. La distancia total de las bobinas se determina como sigue

$$M = 2 \times D_c + \phi_f = 949.6 \text{ mm} \quad (8)$$

El ancho de ventana del núcleo (\tilde{N}), se obtiene mediante

$$\tilde{N} = \frac{2 \times D_c - 2 \times L_1}{2} = 166.2 \text{ mm} \quad (9)$$

Para obtener el largo total del núcleo se hará uso de la ecuación siguiente

$$T = 2\tilde{N} + 3 \times L = 803.4 \text{ mm} \quad (10)$$

La Figura 4, muestra la forma del núcleo, en el cual se observa las columnas, los yugos largos y cortos. Medidas generales núcleo apilado (vista frontal).

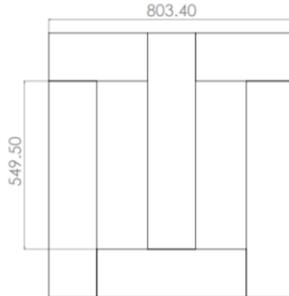


Figura 4. Medidas generales del núcleo apilado.

Las medidas que apreciamos son el total del núcleo, el cual es de 946.6 mm y la altura de ventana de 550 mm. Además del lado 1 y 2.

En la Figura 5 se muestran las partes del núcleo apilado en una vista frontal.

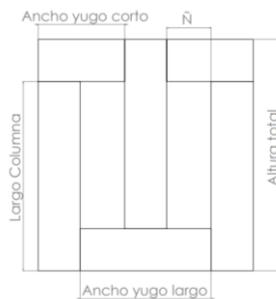


Figura 5. Partes generales del núcleo.

Para completar el núcleo se requiere determinar las dimensiones del yugo corto, largo y de las columnas. El ancho de yugo largo se determina como

$$Y_l = T - 2(L_1) = 489.4 \text{ mm} \quad (11)$$

El ancho de yugo corto se determina como

$$Y_c = \tilde{N} + L_1 = 323.2 \text{ mm} \quad (12)$$

Para determinar la altura total del núcleo, se debe considerar que la longitud de las columnas debe ser igual, por lo tanto, conociendo la altura de ventana, se obtiene la altura del núcleo

$$A_n = L_1 + L_1 + A_v(B) \quad (13)$$

Con la altura de la ventana (B) de 550 mm, se obtiene $A_n = 864 \text{ mm}$. (ver Figura 6).

El peso de núcleo resulta de la suma del peso de las columnas y de los yugos.

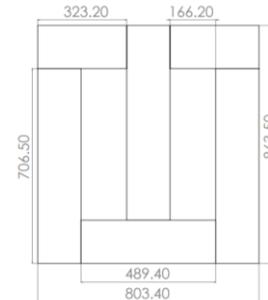


Figura 6. Medidas generales.

Se requiere conocer la densidad del material, se utiliza acero $M - 4$, con densidad de $\delta = 7.65 \text{ gr/cm}^3$. Para poder determinar el peso aplicaremos la ecuación

$$W = \frac{V\delta}{1000} \quad (14)$$

El peso de yugo corto es 121.8 kg, el peso de yugo largo es 92.2 kg y el peso de las columnas: 310.8 kg. Al hacer una suma, se obtiene en peso total del núcleo de $W_n = 525 \text{ kg}$.

Pérdidas y eficiencia

En esta sección analizaremos las pérdidas y eficiencia, recordar que se busca una eficiencia mayor al 95%. Este tipo de pérdidas son muy similares a las pérdidas del ensayo en vacío, y deben ser garantizadas.

Capacidades nominales preferentes para transformadores con aire forzado, con densidad de flujo de 15000 gauss, se tiene

- Pérdidas en el núcleo: 1.1 W/kg
- Pérdidas aparentes en el núcleo: 1.4 VA/Kg

Las pérdidas activas en el núcleo se determinan con

$$P_{Fe} = P_n \times W_n \times \alpha \quad (15)$$

Tomando en cuenta que el tipo de acero $M - 4$ y considerando un factor de fabricación del $\alpha = 10\%$, las pérdidas en el núcleo son de 635.26 W.

Para determinar las pérdidas en baja tensión requerimos la resistencia total del conductor, esto se hace a través de la ecuación

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (16)$$

La resistividad del conductor de aluminio es de $0.0284 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$, la sección transversal del conductor es $253 mm^2$. El perímetro del conductor, de baja tensión, con diámetro de $257 mm$, es de $807.38 mm$. Al contar con 4 conductores se multiplica por 4 y por el número de espiras (12 espiras), obteniendo $38.75 m$. Sustituyendo en la Ec. 16, se obtiene un valor de resistencia de 0.00439Ω .

En este caso, se usan de cuatro conductores, por lo tanto, la resistencia equivalente real en baja tensión, es

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = 0.00109 \Omega \quad (17)$$

Para obtener las pérdidas por el efecto joule se hace uso de

$$P_{cu} = RI_s^2 \quad (18)$$

Sustituyendo los datos de resistencia y corriente se tiene una pérdida por efecto Joule de $P_{cu} = 382.03 W$ a $20^\circ C$.

Corrigiendo el valor de resistencia para una temperatura de $85^\circ C$, con la siguiente ecuación

$$R_c = R[1 + \alpha(T_2 - T_1)] \quad (19)$$

Donde $\alpha = 0.0038$, al realizar los cálculos, se tiene una resistencia $R_c = 0.0013685 \Omega$. Las pérdidas a esta temperatura son de $P_{cu} = 476.40 W$. Al realizar los cálculos se tiene para el lado de alta tensión $P_{cu} = 1092.45 W$.

La eficiencia del transformador, se determina como

$$\eta = \frac{P_1}{P_2 + P_{Fe} + P_{cu}} \quad (20)$$

Donde, P_1 es la potencia absorbida por el primario (VA) y P_2 es la potencia cedida por el secundario, por lo cual $\eta = 97.14\%$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado, se obtiene una eficiencia del 97.14% , superior a la establecida por la norma. Este resultado favorable, nos indica pocas pérdidas, en comparación a otros transformadores, debido a la adecuada elección de materiales.

Una vez fabricado, deberá pasar una serie de pruebas, llamadas FAT, las cuales darán a conocer

si el diseño cumple con lo establecido. El acceso a este tipo de equipo de pruebas es restringido, por ello se debe contar con personal capacitado para la realización de dichas pruebas, y no correr el riesgo de dañar el transformador. En este momento se podrá valorar la eficiencia y conocer las pérdidas del mismo.

Es importante considerar que las pérdidas generan calentamiento en la parte activa del transformador provocando un envejecimiento acelerado y reduciendo la vida útil. Al disminuir las pérdidas en vacío se reducen las pérdidas bajo carga, mejorando la durabilidad. Por lo que en el diseño trata de reducir las pérdidas para evitar el envejecimiento.

En la Tabla 3, se muestran los datos principales para el transformador.

Tabla 3. Datos principales.

Datos principales					
Tensión	480-220/127	Fases	3	Peso	Max: 236 kg
Tipo transformador	Seco	Norma	NMX-J-351-ANCE-2016		
Conexión prim.	Estrella	Conexión sec.	Estrella	YYN1	
Clase	155 °C	Frecuencia	60 Hz	Enfriamiento	"AA"

En la Tabla 4 se da un resumen de las propiedades de los materiales que se emplearon.

Tabla 4. Datos secundarios.

Datos secundarios			
Núcleo (Lamina de acero al silicio)			
Grado	M-4	Factor	100%
Espesor	0.28cm	Densidad	7650 kg/m ³
Resistividad		47.2 × 10 ⁻⁸ Ωm	
Cobre (Solera)			
Resistividad		47.2 × 10 ⁻⁸ Ωm	
Densidad		7650 kg/m ³	

Después de realizar los cálculos para el diseño del transformador, se llegaron a los resultados de la Tabla 5, las dimensiones del núcleo no son grandes en comparación de los transformadores tipo estación o pedestal.

Tabla 5. Dimensiones del núcleo.

Dimensiones núcleo					
Yugo largo	489.4 mm	Altura total	863.50 mm	Altura columna	706.50 mm

Yugo corto	323.20 mm	Ancho total	803.4 mm	Ñ	166.20 mm
-------------------	-----------	--------------------	----------	----------	-----------

En el trabajo se obtuvieron pérdidas muy bajas tanto en el núcleo como en el cobre, que se traduce, en una buena eficiencia como muestra la Tabla 6.

Tabla 6. Pérdidas y eficiencia.

Pérdidas núcleo	635.26 W
Pérdidas en el cobre	1092.45 W
Eficiencia	97.14 %

En Pérez¹, se utilizó como conductor una lámina foil, en nuestro análisis se tomó como conductor una solera con la finalidad de utilizar un conductor fácil de adquirir.

Utilizar una sección cuadrática en el diseño del núcleo es buena opción, se comprueba al comparar las pérdidas con Flores⁴. En el presente trabajo se obtuvo una eficiencia del 97.14%, algo que no coincide con Pérez¹, quien obtuvo una eficiencia del 98%. Esto podría atribuirse que la capacidad del transformador de Pérez¹ fue de 75 KVA, un transformador de menor capacidad.

Si desea que el transformador tipo seco, sea más eficiente, se recomienda el uso de núcleo amorfo y utilizar núcleo a 45 grados. Para disminuir pesos y costo, se recomienda que el diseño se realice con más espiras, ya que disminuirá la sección del núcleo, por consecuencia, disminuye el diámetro del molde a utilizar y el peso del núcleo.

CONCLUSIONES

El transformador diseñado tiene una eficiencia del 97.4%, en la norma NMX-J-351-2016 que es la que se encarga de regular a los transformadores tipo secos, indica que deberá ser mayor al 95% por lo cual cumple con lo requerido por las normas.

Unas de las características por las cuales el consumidor elige un transformador tipo seco, es por el poco espacio que ocupa y que logra que sean instalados cerca del lugar donde se ocupara. Las dimensiones finales obtenidas del transformador son ideales y no es un diseño robusto. Las pérdidas del cobre y del núcleo son las que determinan la eficiencia que llega a tener un transformador, por eso el buen diseño de la parte eléctrica del transformador logró que la eficiencia fuera superior a lo requerido en la NMX-J-351-ANCE-2016⁵.

REFERENCIAS

1. Pérez, P. A. (2020). Transformadores de distribución: teoría, cálculo, construcción y pruebas. México. Reverté.
2. Saldívar Hinojosa, J.J (2018). Estudio de niveles de eficiencia en transformadores de distribución en función del perfil de carga. [Tesis para maestría en ciencias, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey].
3. NOM-063-SCFI-2001. (2001). Norma Oficial Mexicana NOM-063-SCFI-2001, Norma oficial mexicana, productos eléctricos-conductores-requisitos de seguridad. Diario Oficial de la Federación.
4. Flores Camayo, J.M, Inderique Inga, N.R & Javier Meza, C.E (2021). Diseño del núcleo de un transformador trifásico de distribución para la reducción de pérdidas técnicas [Tesis de Ingeniería, Universidad Continental].
5. Asociación de Normalización y Certificación, A.C. (2016). Transformadores de distribución y potencia tipo seco. NMX-J-351-1-ANCE-2016