

COMPARACIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN UN TRANSFORMADOR TIPO SECO DE 5 KVA ANTE CARGA LINEAL Y NO LINEAL

COMPARISON OF LOSSES IN A 5 kVA DRY-TYPE TRANSFORMER WITH A LINEAR AND NON-LINEAR LOAD

Israel González Pérez

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
israel_gonzpe@yahoo.com

José Antonio Álvarez Salas

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
jaas@uaslp.mx

Juan Segundo Ramírez

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
juan.segundo@uaslp.mx

Resumen

En este trabajo se presentan algunos resultados en simulación y mediciones de laboratorio de un transformador tipo seco de 5 kVA con carga lineal y no lineal. Se propone comparar el efecto en las pérdidas del transformador cuando éste alimenta a un arreglo de resistencias trifásicas como carga lineal, así como un arreglo monofásico y dos arreglos trifásicos de rectificadores de potencia como carga no lineal. Por medio de la diferencia de potencias entre la salida y la entrada se determinaron las pérdidas del transformador. Adicionalmente, se presentan las mediciones de temperatura en el transformador ante diferentes niveles de carga lineal obtenidas mediante dos termopares que se encuentran incluidos entre los devanados y su núcleo.

Palabras clave: Carga lineal, carga no lineal, pérdidas, transformador seco.

Abstract

This paper presents the simulation and laboratory results of a dry-type transformer of 5 kVA operating with linear and nonlinear loads. The effect of these types of loads on the transformer power losses is analyzed. The linear load is a three-phase

resistance arrangement, while the nonlinear loads are three single-phase and two three-phase rectifiers. The power losses are the difference between the input and the output power of the transformer obtained under the different loading conditions. In addition to this, through two thermocouples included within the windings and core, temperature measurements against different loading levels of the linear load are reported.

Keywords: Linear load, non-linear load, transformer, transformer losses.

1. Introducción

Los transformadores son uno de los dispositivos más empleados en los sistemas eléctricos industriales, de distribución y de potencia. Existen en diferentes capacidades y tamaños, del tipo seco o inmersos en algún medio (p. ej., aceite, gas), capaces de aislar y mantener su temperatura adecuada de operación.

Su apropiado dimensionamiento determina la correcta operación del transformador; se busca mantener el valor de sus pérdidas por debajo de su límite térmico [Cazacu, 2017]. Típicamente las pérdidas presentes en los transformadores varían en función de su capacidad y tipo de cargas que se conectan a éste; sin embargo, cuando se consideran cargas que son no sinusoidales se modifica la cantidad de pérdidas en el transformador [IEEE C57.120-2017]. En general, un transformador en el que la corriente distorsionada excede el 5% de contenido armónico puede producir un mayor calentamiento en sus devanados y núcleo [IEEE C57.110-1986].

Prácticamente hoy en día las cargas en los sistemas industriales y comerciales son una mezcla de cargas con comportamiento sinusoidal y no sinusoidal de su voltaje y corriente. Lo anterior se debe al amplio uso de dispositivos electrónicos en equipos que procesan la energía eléctrica en forma conmutada. Las cargas antes mencionadas son alimentadas generalmente por transformadores, los cuales acondicionan los niveles de voltaje y corriente para un mejor desempeño de sus respectivos circuitos. Por lo anterior, es importante evaluar el comportamiento de las pérdidas ante condiciones no sinusoidales, ya que en este escenario se puede considerar un ajuste en su capacidad, así como una mejora en su eficiencia [Nicolae, 2016].

Las pérdidas en los transformadores pueden ser divididas en: pérdidas en vacío (P_{SC}) y pérdidas con carga (P_{PC}), como se indica en la ecuación 1.

$$P_T = P_{SC} + P_{PC} \quad (1)$$

Las pérdidas en vacío son función del voltaje en el transformador, en la presencia de armónicos depende de la distorsión del voltaje aplicado y del diseño del núcleo del transformador. Debido a que este tipo de pérdidas son más difíciles de cuantificar, se han desarrollado algunas técnicas que buscan corregir los errores en su medición [Arseneau, 2005]. Las pérdidas con carga dependen de los calibres de los conductores con que se forman las bobinas del primario y secundario, y son generalmente pérdidas por efecto Joule. Debido a la resistencia en corriente directa, se les conoce como pérdidas en el cobre. Si el transformador sólo se especifica para la potencia en kVA de la carga, las corrientes armónicas hacen que el valor eficaz sea mayor que su capacidad, lo que tendrá un incremento en las pérdidas de los conductores [Harper, 1999].

Otras pérdidas con carga son las pérdidas por corrientes circulantes. Son corrientes muy pequeñas en el transformador y son causadas por el flujo magnético; fluyen en el devanado, en el núcleo y en otras partes conductoras sujetas al campo magnético. Se incrementan con el cuadrado de la frecuencia de la corriente, por lo que es una componente significativa de las pérdidas en el transformador [Elmoudi, 2006]. Debido a lo anterior, las pérdidas con carga en el transformador tienen dos componentes: pérdidas en el cobre (P_{CU}) y las pérdidas por corrientes circulantes (P_{CC}), como se indica en la ecuación 2.

$$P_{PC} = P_{CU} + P_{CC} \quad (2)$$

El propósito de este trabajo es analizar, por medio de simulación digital y con pruebas de laboratorio, el incremento en las pérdidas del transformador bajo condiciones de carga lineal y no lineal. Se eligieron tres configuraciones con diodos de potencia que típicamente se utilizan en procesos de rectificación industrial.

El proceso de rectificación demanda la utilización de transformadores de potencia que modifiquen los niveles de tensión y corriente que llegan al convertidor. Los

procesos de rectificación monofásico y trifásico suministran corriente continua a partir de una señal de corriente alterna. Son muy demandados en diferentes aplicaciones industriales. Sus configuraciones, especificaciones y formas de onda de voltaje y corriente se han estudiado ampliamente [Hart, 2001].

Debido a que es la primera etapa del proyecto en el cálculo de pérdidas del transformador, y que al momento de realizar este trabajo no se contó con los elementos necesarios para implementar la carga no lineal en el laboratorio, se procedió a realizar en PSIM la simulación digital de las diferentes configuraciones monofásicas y trifásicas de los diodos de potencia. Los parámetros del circuito por fase del transformador fueron incorporados al modelo digital para analizar el comportamiento de los voltajes, corrientes y potencias de entrada y salida. En el laboratorio se realizaron mediciones de potencia con diferentes porcentajes de la carga lineal.

2. Métodos

Cálculo de pérdidas

Para el cálculo de pérdidas se utilizó un transformador tipo seco de 5 kVA, los datos nominales aparecen en la tabla 1.

Tabla 1 Valores nominales del transformador.

Fases	Capacidad	Tipo	Frecuencia	% Eficiencia
3	5 kVA	Seco	60 Hz	98.1
Tensión	Corriente	Conexión	% Impedancia	Elev.-Temp.
220/440 V	13.2/6.56 A	Delta-Estrella	3.75	65° C

En la figura 1 se muestra el transformador tipo seco de 5 kVA y sus indicadores de temperatura conectados a termopares tipo “J” colocados entre las bobinas del primario y secundario, y en la estructura del núcleo. Su diseño fue proyectado para evaluar el impacto de la carga no lineal con el incremento de su temperatura.

La metodología para evaluar las pérdidas corresponde al análisis de la transferencia de potencia de un circuito con una fuente sinusoidal a una carga no lineal.

En la figura 2 se muestra esta configuración. Si el voltaje de alimentación es sinusoidal, la corriente será no sinusoidal debido a la carga no lineal. La corriente

de la carga no lineal es no sinusoidal, por lo que su valor eficaz se define por la ecuación 3 [IEEE Std 1459-2010].

$$I_{rms} = \sqrt{I_0^2 + I_{rms-1}^2 + I_{rms-2}^2 + I_{rms-3}^2 + I_{rms-4}^2 \dots I_{rms-h}^2} \quad (3)$$



Figura 1 Transformador de 5 kVA.

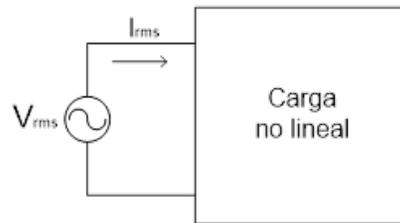


Figura 2 Fuente sinusoidal y carga no lineal.

En la corriente no sinusoidal se puede calcular la contribución de los armónicos en la deformación de la señal a través del cálculo de la distorsión armónica total (*THD*), de acuerdo a la ecuación 4 [IEEE Std 1459-2010].

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_0^2 + I_{rms-2}^2 + I_{rms-3}^2 + I_{rms-4}^2 \dots I_{rms-h}^2}}{\sqrt{I_{rms-1}^2}} * 100 \quad (4)$$

Se realiza una ponderación entre los valores eficaces de los armónicos $I_0, I_{rms-2}, I_{rms-3}, \dots, I_{rms-h}$, y el valor eficaz de la componente fundamental I_{rms-1} . Entre más distorsionada esté la forma de onda mayor será su *THD* de corriente.

Si en la fuente sinusoidal de la figura 2 se considera el secundario del transformador y la carga no lineal con las diferentes configuraciones de los rectificadores, entonces las pérdidas expresadas por la ecuación 2 serán afectadas por la distorsión de su corriente.

Las pérdidas en el cobre y las pérdidas por corrientes circulantes dependen del valor eficaz de la corriente, así como del cuadrado del orden de armónico presente en las señales distorsionadas como se indica en ecuaciones 5 y 6 [IEEE C57.110-1986].

$$P_{CU} = I_{rms}^2 R_{cd} \quad (5)$$

$$P_{CC} = P_{CC-R} \sum_{h=1}^{h=\max} h^2 \left(\frac{I_{rms-h}}{I_{rms-1}} \right)^2 \quad (6)$$

Por otro lado, la potencia de entrada de cualquier transformador debe ser capaz de suministrar la potencia de salida más las pérdidas internas que se generan en éste. Si se mide la diferencia de potencias en la entrada y la salida se obtendrá la potencia pérdida de acuerdo con la ecuación 7 [Guru, 2002].

$$P_{PÉRDIDAS} = P_{ENTRADA} - P_{SALIDA} \quad (7)$$

Para la simulación y medición de las pérdidas en el transformador, se implementó el circuito de prueba de la figura 3. En este circuito se mide la potencia activa trifásica en la entrada y salida del transformador por el método de los dos wáttmetros, como se indica en ecuaciones 8 y 9 [Sen, 2010].

$$P_{ENTRADA} = W_1 + W_2 \quad (8)$$

$$P_{SALIDA} = W_3 + W_4 \quad (9)$$

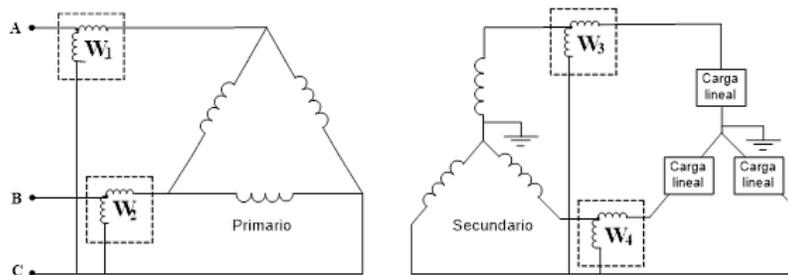


Figura 3 Circuito de medición de pérdidas en el transformador con carga lineal.

Los wáttmetros W_1 , W_2 , W_3 y W_4 , son equipos monofásicos de medición digital de potencia con capacidad de registrar corrientes y voltajes no sinusoidales.

Sustituyendo las ecuaciones 8 y 9 en la ecuación 7 se obtiene la ecuación 10.

$$P_{PERDIDAS} = (W_1 + W_2) - (W_3 + W_4) \quad (10)$$

La ecuación 10 representa la forma a través de la cual se simularon y midieron las pérdidas en el transformador con carga lineal y no lineal en este trabajo. En esta etapa del proyecto no se analizan por separado las pérdidas que se indican en la ecuación 2. Estas pérdidas tienen afectación con el cambio de carga y la modificación de la carga no lineal.

Parámetros del transformador

Los parámetros del transformador que se utilizaron en las simulaciones de PSIM y Matlab se presentan en la tabla 2, a través de la implementación en el laboratorio de la prueba de circuito abierto y cortocircuito en el transformador. La prueba de circuito abierto se realizó en el lado de bajo voltaje (conexión en delta) con el lado de alto voltaje en circuito abierto. La prueba de cortocircuito se realizó en el lado de alto voltaje a tensión reducida de la fuente de alimentación trifásica (conexión en estrella) con el lado de bajo voltaje en cortocircuito [Pérez, 1985].

Tabla 2 Parámetros del circuito equivalente por fase.

Rama de magnetización	Impedancia del primario	Impedancia del secundario
$X_M = 266.310 \Omega$	$X_1 = 0.04 \Omega$	$X_2 = 0.160 \Omega$
$R_C = 565.102 \Omega$	$R_1 = 0.13 \Omega$	$R_2 = 0.515 \Omega$

Circuitos rectificadores

En las tres configuraciones de los diodos como carga no lineal, se generó un cambio en la distorsión armónica total de las corrientes del transformador, por lo que se eligieron las siguientes configuraciones:

- Tres rectificadores monofásicos onda completa.
- Rectificador trifásico en puente completo.
- Rectificador trifásico en medio puente.

En la tabla 3 se muestran los diferentes porcentajes de THD en las corrientes de entrada y salida del transformador. El valor más bajo de THD en las corrientes le

corresponde a la configuración de los tres puentes monofásicos de diodos. Sin embargo, sus pérdidas en el transformador mantuvieron una pequeña diferencia respecto a las pérdidas con carga lineal como se muestra en los resultados de simulación.

Tabla 3 Distorsión armónica de las corrientes de entrada salida.

Puente monofásico % THD		Puente trifásico % THD		Medio puente trifásico % THD	
Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
10.3	0.135	30	28.5	63.7	105.4

La carga resistiva de los rectificadores que se utilizaron en las simulaciones se modificó en incrementos de 20 a 120%, como se muestra en la tabla 4. En la parte experimental a través de un banco de resistencias de potencia de $16.3 \Omega @ 1000 \text{ W}$ se realizaron arreglos serie-paralelo para obtener los porcentajes de cambio en la carga resistiva en 60, 80 y 120%.

Tabla 4 Porcentajes de cambio de carga.

Configuración	Resistencia (Ω)					
	20%	40%	60%	80%	100%	120%
Puente completo trifásico	345.06	172.53	115.02	86.26	69.01	57.51
Medio puente trifásico	86.72	43.36	28.91	21.68	17.34	14.45
Tres puentes monofásicos	193.59	96.80	64.53	48.40	38.72	32.27
En estrella con carga resistiva	192.04	96,02	64.01	48.01	38.41	32.01

3. Resultados

Los resultados para el cálculo de las pérdidas se realizaron con carga lineal en simulación y mediciones de laboratorio y para la carga no lineal sólo en simulaciones. En las siguientes secciones se describen las formas de onda y gráficas de las pérdidas del transformador en estos dos escenarios.

Carga lineal

En el laboratorio se realizaron pruebas para la medición del incremento de temperatura en el transformador tanto en las bobinas como en el núcleo. En la figura 4 se muestran las mediciones del transformador en el laboratorio. Se utilizaron los medidores digitales de potencia como se indica en el circuito de la figura 3.

Con la variación de carga en los porcentajes indicados en la tabla 4, se tomó lecturas de la temperatura proveniente de los termopares en intervalos de diez minutos durante cincuenta minutos.



Figura 4 Medición de pérdidas en el transformador con carga lineal.

Como se puede observar en las figuras 5 y 6, es más rápido el crecimiento de la temperatura en los devanados del transformador que en el núcleo. Los devanados tienen que soportar principalmente el efecto de calentamiento de las pérdidas en el cobre de acuerdo con la ecuación 5. El transformador permite la elevación de temperatura de 65 °C sobre la temperatura ambiente, como se indica en la tabla 1. De ahí la posibilidad de sobrecargarlo en un 20% durante la prueba.

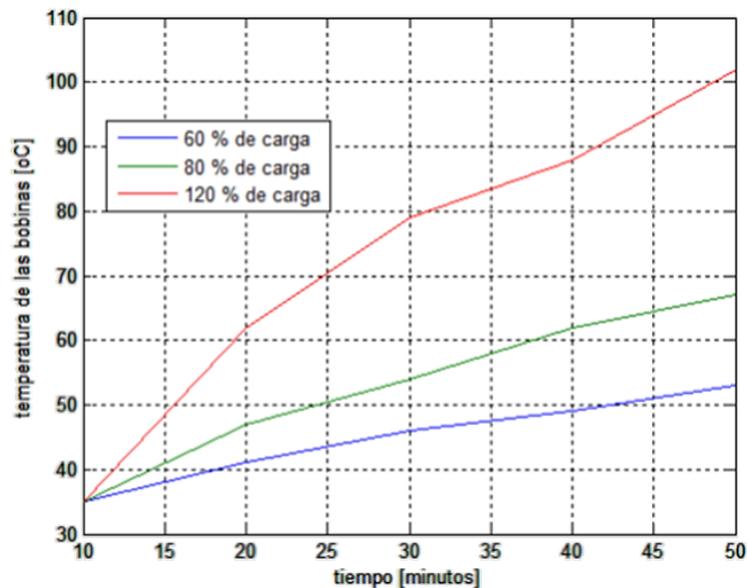


Figura 5 Gráfica del incremento de temperatura en las bobinas.

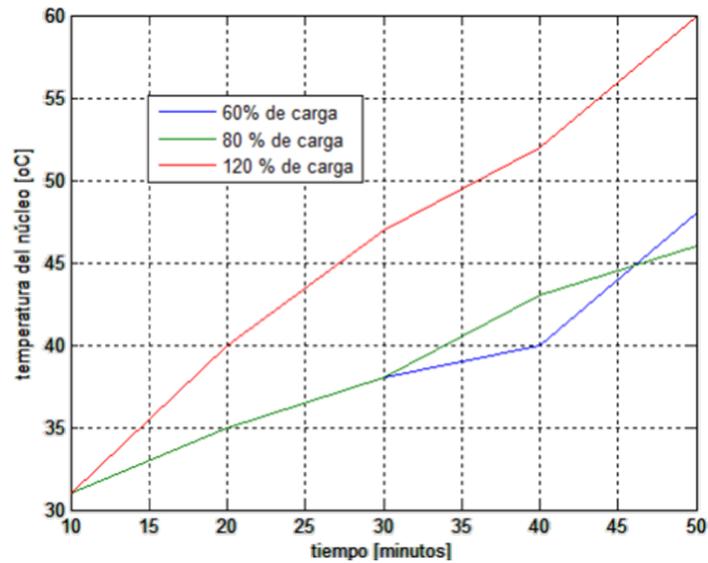


Figura 6 Gráfica del incremento de temperatura en el núcleo.

En la figura 7 se presenta una comparación entre la medición y la simulación de la eficiencia del transformador con carga lineal. En las gráficas se considera un 1.5% de error debido a la exactitud del modelo empleado en la simulación.

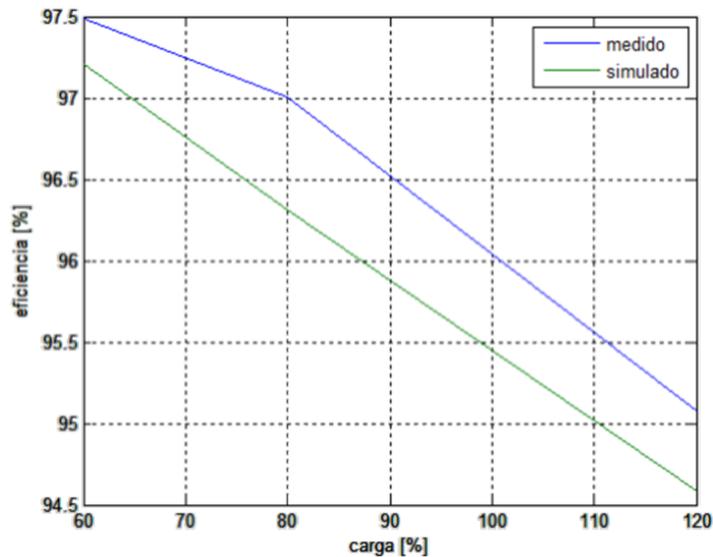


Figura 7 Cambio de la eficiencia del transformador en función de la carga lineal.

Carga no lineal

En la figura 8 se comparó la eficiencia entre los dos rectificadores trifásicos de diodos conectados al transformador. Se compararon los rectificadores, por el valor

del THD que existen entre sus corrientes de línea. El rectificador de medio puente trifásico presenta una pendiente en descenso debido a la deformación de sus corrientes de línea que tiene que suministrar el transformador.

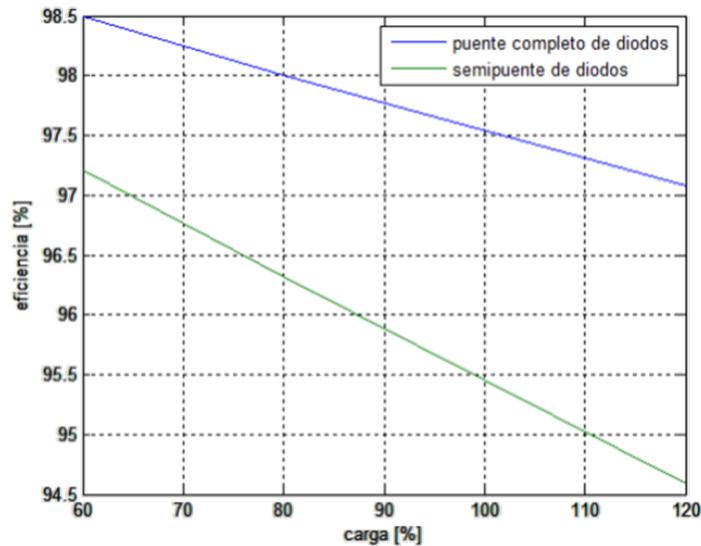


Figura 8 Eficiencia del transformador en función de la carga no lineal.

En la figura 9 se muestran las formas de onda del voltaje y la corriente de terminales en el transformador cuando alimenta el rectificador de medio puente trifásico. El voltaje de terminales de la figura 9 presenta una pequeña deformación por el proceso de polarización de los diodos de potencia en cada una de sus ramas, esta perturbación se denomina “notching”. Sin embargo, no contribuye en las pérdidas de la ecuación 10.

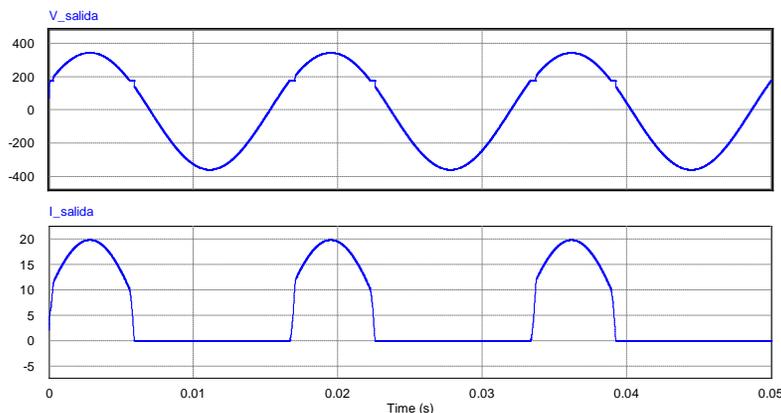


Figura 9 Voltaje y corriente de línea (THD= 105.4 %) en el secundario.

Algo similar sucede con las formas de onda del rectificador trifásico de puente completo, como se muestran en la figura 10. Su voltaje de terminales presenta la perturbación “notching” y su corriente de terminales tiende a formar una señal cuadrada, por lo que su contribución a las pérdidas de la ecuación 10 es también considerable.

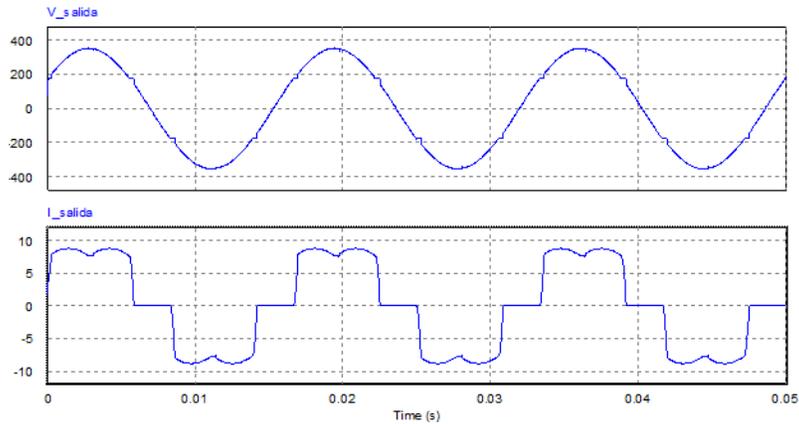


Figura 10 Voltaje y corriente de línea (THD=28.5%) en el secundario.

En la figura 11 se compararon las pérdidas de potencia en el transformador para las diferentes configuraciones de carga lineal y no lineal.

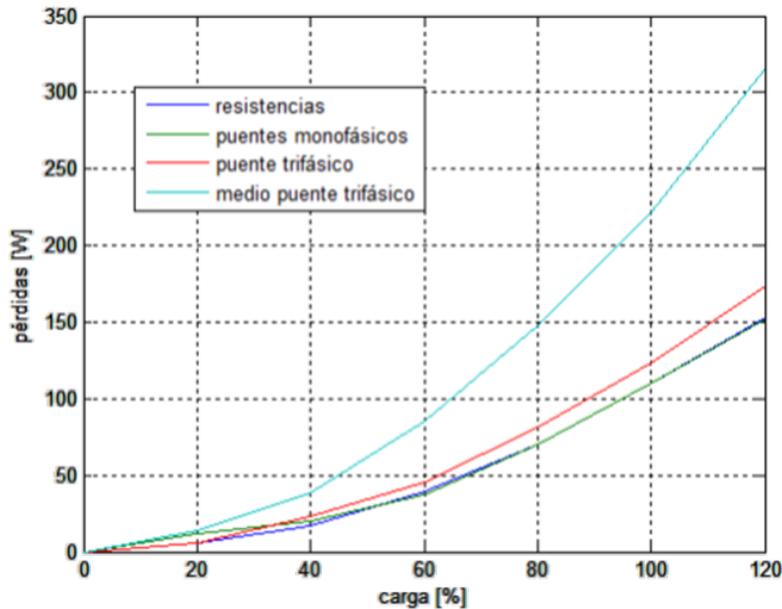


Figura 11 Comparación de las pérdidas en el transformador con carga lineal y no lineal.

Por medio de la ecuación 10 se graficaron las pérdidas con variación de carga de acuerdo con la tabla 3. El propósito de esta comparación es conocer las pendientes de ascenso de las gráficas de pérdidas en función de su carga lineal y no lineal.

La gráfica con mayor pendiente fue la asociada al medio puente trifásico, su alto contenido armónico de las corrientes contribuye a las pérdidas por efecto Joule y corrientes circulantes en el transformador.

4. Discusión

Los valores simulados y medidos de las potencias en el transformador tipo seco de 5 kVA son un indicativo del comportamiento de las pérdidas respecto al tipo de carga lineal y no lineal. En este momento se tiene un avance sobre la experiencia en la simulación del transformador, sus formas de onda en voltaje y corriente y su relación con las pérdidas. El comportamiento del modelo en simulación y las mediciones en pérdidas son aceptables para la carga lineal, el porcentaje de error no es mayor al 2%, como se muestra en la gráfica de la figura 7. La proporción de pérdidas en con la carga no lineal es mayor para el medio puente trifásico, la deformación de sus formas de onda condiciona el incremento de las pérdidas en el cobre del transformador.

Se han calibrado los termopares incluidos en el transformador para obtener lecturas de temperatura. El incremento de las temperaturas en los devanados y el núcleo se asocian con el incremento de las pérdidas en el transformador. A pesar de no desarrollar un modelo térmico del transformador, la concentración del calor en sus devanados se asocia con el incremento de las pérdidas en el cobre.

Para las gráficas de las figuras 5 y 6 el tiempo de prueba y la elevación de temperatura del transformador se limitó por la capacidad térmica de los arreglos de las resistencias conectadas en las terminales del transformador. El límite térmico de este transformador es un incremento de 65° C sobre la temperatura ambiente como lo especifica el fabricante. Si este límite térmico se sobrepasa se disminuye su capacidad y eficiencia como se indica en la gráfica de la figura 7.

Respecto a la carga no lineal, la siguiente etapa de este proyecto es comparar las pérdidas en el transformador que generan las diferentes configuraciones de los

diodos en laboratorio. Desarrollar estas configuraciones permitirá identificar el comportamiento de las pérdidas debido a la circulación de corrientes armónicas como se establece en IEEE C57.110-1986. El apoyo técnico y didáctico de este proyecto, permitirá capacitar a los alumnos del área de licenciatura y posgrado involucrados con sistemas eléctricos y electrónicos de potencia.

5. Conclusiones

Se han presentado los resultados de la simulación y resultados parciales de laboratorio de un transformador de 5 kVA. Los resultados que se presentan aquí son la primera etapa de un proyecto que se ha venido desarrollando para estimar y medir las pérdidas en transformadores secos de uso industrial que típicamente alimentan a convertidores de electrónica de potencia o algún equipo electrónico el cual se considera como carga no lineal.

Las normas vigentes son claras al respecto de las cargas no lineales en el transformador. Sin embargo, desarrollar infraestructura que permita visualizar de forma práctica las pérdidas, contribuye en una mejor formación y capacitación del personal involucrado. Lograr entender el comportamiento de las pérdidas en los transformadores permite a estudiantes e ingenieros la especificación correcta de estos equipos.

Se agradece al Fondo de Apoyo de la Investigación de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (C17-FAI-06-62.62), el apoyo económico brindado para la realización de este proyecto.

6. Bibliografía y referencias

- [1] Arseneau R., So E., Hanique E. Measurements and Correction of No-Load Losses of Power Transformers, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol 54, No 2, pp 503-506, 2005.
- [2] Elmoudi A., Lethonen M. Effect of harmonics on transformers loss of life, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp 408-411, 2006.
- [3] Guru B. S., Hizirolu H.R. Máquinas Eléctricas y Transformadores, Alfaomega, 3ª Ed, 2002.

- [4] Cazacu E., Petrescu L., Lonita V. Losses and temperature rise within power transformers subjected to distorted currents, 15th International Conference on Electrical Machines Drives and Power Systems, 2017.
- [5] Hart D. W. *Electrónica de Potencia*, Prentice Hall, 2001.
- [6] Harper E. *El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica*, LIMUSA, 1999.
- [7] IEEE Std. 1459-2010, Definitions for the Measurement of Electrical Power Quantities Under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced, Unbalanced Conditions.
- [8] IEEE Std. C57.120-2017, Guide for Loss Evaluation of Distribution and Power Transformers and Reactors.
- [9] IEEE Std. C57.110-1986, Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Non-Sinusoidal Load Currents.
- [10] Nicolae P.-M., Smarandescu I.D., Nicolae M.E., Popa D.-L., Nicolae I.-D. Considerations on a MV/LV transformer which supplies distorting load, IEEE International Power Electronics on Motion Control Conference (PEMC), pp 354-359 2016.
- [11] Perez Amador V., *Pruebas de equipo eléctrico, transformadores de distribución y potencia*, LIMUSA ,1985.
- [12] Sen P.C., *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, John Wiley and Sons, 3a ed, 2010.