

Fenómeno de la Remanencia en Transformadores

Óscar Román Tudela¹ Guillermo Aponte¹
Fabio Andrés Muñoz^{1*} Alejandro Cárdenas¹
(1) Universidad del Valle
[*famunoz2705@hotmail.com](mailto:famunoz2705@hotmail.com)

Recibido 15 de febrero de 2011. Aceptado 01 de Mayo de 2011
Received: February 15, 2011 Accepted: May 01, 2011

RESUMEN

En este artículo se presentan los parámetros y variables físicas de los transformadores que influyen en la magnitud de la Remanencia de los núcleos ferromagnéticos de estos, así como los procedimientos prácticos que permiten desmagnetizar el núcleo, es decir, llevar el valor de la Remanencia a cero. Además de lo anterior, se realizó la medición de la Remanencia, el ciclo de histéresis y el proceso de desmagnetización de un transformador de 75kVA.

Palabras clave: Flujo Residual, Remanencia, Transformadores, Magnetización, Ferromagnetismo.

Phenomenon of the Remanence in Transformers

ABSTRACT

In this paper presents the parameters and physical variables of the transformers that influence the magnitude of the remanence of the ferromagnetic cores of these as well as the practical procedures that allow demagnetize the core, ie carry the value of remanence to zero. In addition the above, was performed the measurement of the remanence, the hysteresis loop and demagnetization process of a 75kVA transformer.

Keywords: Residual Flux, Remanence, Transformers, Magnetization, Ferromagnetism.

1. INTRODUCCIÓN

Los transformadores son fabricados con materiales ferromagnéticos debido a que con estos se obtienen altas densidades de flujo con un mínimo gasto de energía. Es por ello, que para obtener un óptimo funcionamiento en estas máquinas surge la necesidad de comprender las propiedades de estos materiales.

Una de las principales propiedades de los materiales ferromagnéticos es la de tener densidad de flujo diferente de cero en ausencia del campo magnético exterior. Esta propiedad, como se verá más adelante, se denomina Remanencia y en este artículo se tratan los diferentes factores que influyen en este fenómeno en los transformadores.

La Remanencia, a pesar de ser una importante propiedad intrínseca, ha sido escasamente estudiada en los transformadores y es por ello, que este trabajo se centra en el estudio del fenómeno y en las variables que influyen sobre ésta en los transformadores.

Así mismo, se presentan a partir de una prueba de laboratorio el método de desmagnetización y medición de la remanencia asiendo uso de un Gaussímetro o medidor de densidad de flujo.

2. REMANENCIA E INDUCCIÓN RESIDUAL.

La Remanencia es la densidad de flujo que permanece en un material magnético después de haber suprimido a la fuerza de magnetización externa [11], como se observa en la Fig. 1.

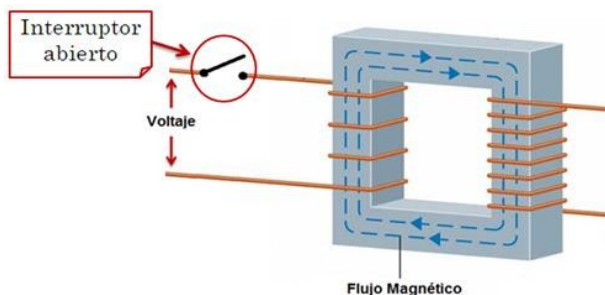


Fig. 1. Remanencia en un transformador.

La Densidad de flujo Residual o Inducción Residual en un material magnético, es el valor de la densidad de flujo correspondiente a la intensidad magnética cero, cuando el material es simétrica y cíclicamente magnetizado [11], como se observa en la Fig. 2.

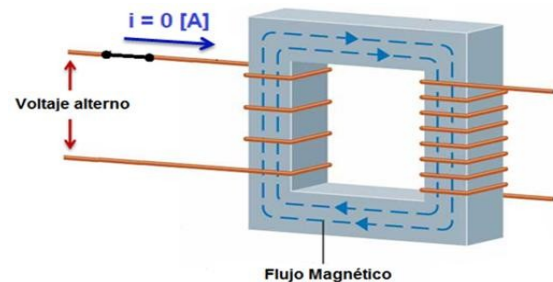


Fig. 2. Densidad de flujo Residual o Inducción Residual en un transformador.

3. CURVA DE INDUCCIÓN RESIDUAL CONTRA CAMPO MÁXIMO APLICADO

La curva de inducción residual (B_r) vs el campo magnético máximo aplicado (H_m) de un material ferromagnético se asemeja en cierta medida a la curva de magnetización, como se observa en la Fig. 3.

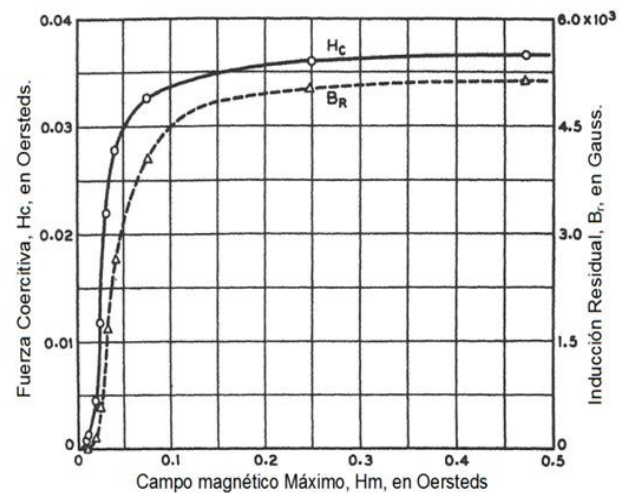


Fig. 3. Curva de B_r vs H_m para el 4-79 Molibdeno Permalloy [1].

Las partes superiores de las curvas son bien representadas por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{H_m}{H_c} = c_1 + c_2 H_m \quad (1)$$

$$\frac{H_m}{B_r} = d_1 + d_2 H_m \quad (2)$$

en donde c_1 , c_2 , d_1 , y d_2 son constantes, c_2 y d_2 son los inversos de la coercitividad y retentividad, respectivamente. Estas relaciones pueden ser utilizadas para una interpolación y extrapolación limitada.

Aunque B_r aumenta continuamente con el aumento en H_m , la relación B_r / B_m pasa por un máximo y luego desciende a su valor límite para grandes valores de H_m . Por lo tanto, se puede decir que la inducción residual se aproxima a su límite más rápidamente que lo que la inducción normal se acerca a B_s (inducción de saturación). Los datos para varios materiales son mostrados en la Fig 4.

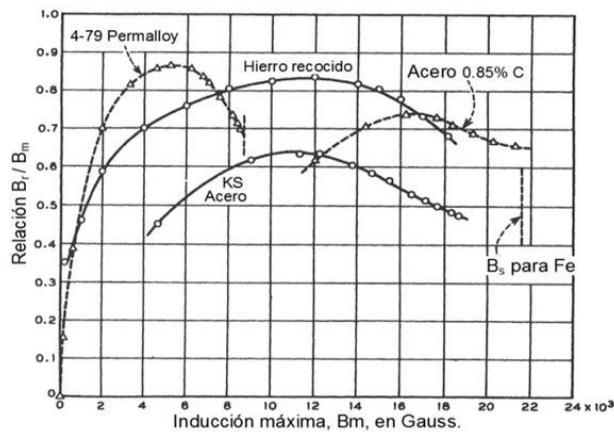


Fig. 4. Relación de inducción residual e inducción máxima vs inducción máxima [1].

En la Tabla 1 se muestran algunos datos relevantes de los materiales que pueden ser considerados como “normales”.

Tabla 1. Densidades de flujo residual de varios materiales. [1]

Material	Tratamiento	B_r (Gauss)	B_s (Gauss)	B_r / B_s
Hierro	Laminado en frío.	8000 - 11000	21600	0.4 - 0.5
	Recocido.	6000 - 14000	21600	0.3 - 0.7

Hierro al silicio 4%	Laminado en frío.	14000	20200	0.7
	Recocido.	6000 - 8000	19800	0.3 - 0.4
Permalloy	Laminado en frío	7000	16000	0,45
	Recocido	7500 - 9500	16000	0,45-0,6
Hierro al silicio 3%	Grano Orientado	15600	17000	0,92

4. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA INDUCCIÓN RESIDUAL.

La inducción residual disminuye con el aumento en la temperatura, como se muestra en la Fig. 5 y 6.

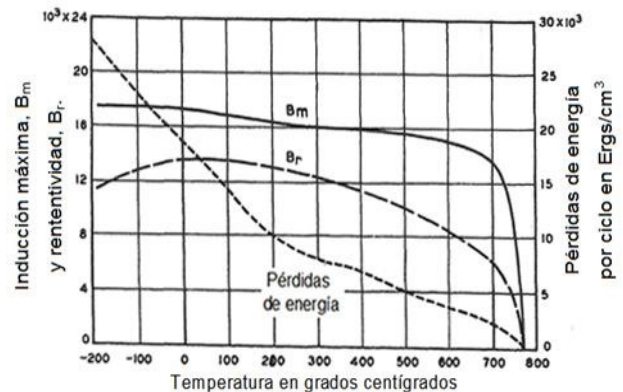


Fig. 5. Variación de la inducción residual del hierro con la temperatura [1].

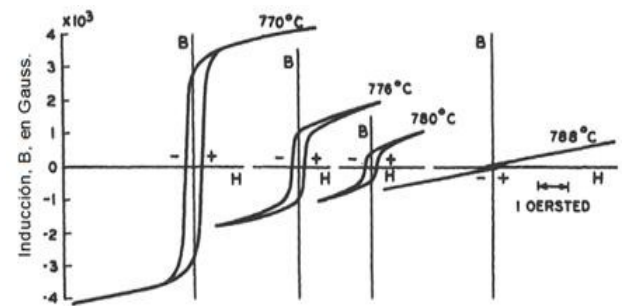


Fig.6. Variación del ciclo de histéresis del hierro con la temperatura [1].

5. EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO SOBRE LA REMANENCIA.

Una cantidad sustancial de envejecimiento puede originarse en las chapas de acero con bajo contenido de silicio, y de manera general, en cualquier aleación de acero comercial puede ocurrir un envejecimiento perceptible si existe una cierta proporción de impurezas. Envejecimiento se traduce, para este caso, en un cambio en la permeabilidad y en las pérdidas en el núcleo con el tiempo y por lo general, este cambio es un deterioro. La prueba estándar para determinar el envejecimiento consiste en mantener la muestra a 100°C durante 600 horas [1]. El comportamiento de las aleaciones con un contenido dado de silicio puede ser errático debido a la variabilidad de la cantidad de impurezas que estas contienen, pero las pérdidas en las aleaciones que contienen entre 0.5 y 1% de silicio pueden incrementarse entre 50 y 20%, respectivamente. Las aleaciones con un contenido de silicio de 1.05% se les considera sin envejecimiento, sin embargo, un incremento en las pérdidas de 5 a 10% con el tiempo es bastante común en los aceros comerciales [1].

Los cambios en las propiedades magnéticas debido al envejecimiento son atribuidas a la precipitación lenta de impurezas, como el carburo o el nitruro, y en el hierro existe una buena evidencia que el

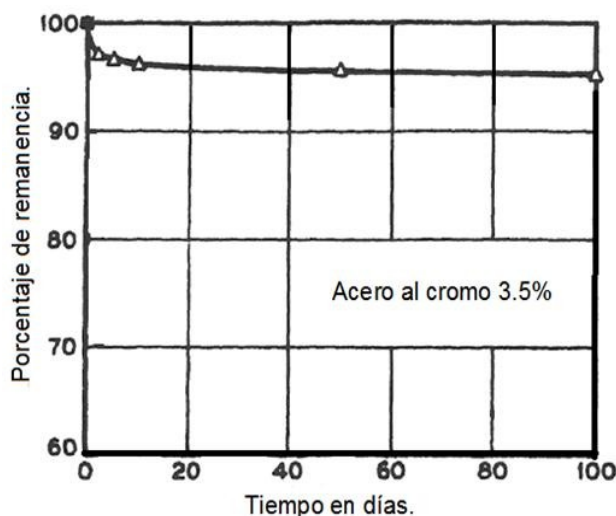


Fig.7. Disminución de la inducción remanente del acero al cromo [1].

nitruro es una impureza activa a 100°C. A temperatura ambiente estos cambios ocurren a diferentes velocidades; a veces ocurren a velocidades mensurables y algunas veces estos cambios son tan lentos que son indetectables [1].

El efecto del envejecimiento en la Remanencia en el acero al cromo es presentado en la Fig. 7. El cambio del flujo remanente es una función exponencial en el tiempo.

6. EFECTO DE LA PRESENCIA DE ENTREHIERROS SOBRE LA REMANENCIA

Cuando un circuito ferromagnético contiene un entrehierro de aire, máquinas rotativas por ejemplo, se produce un cambio en la curva de magnetización del material como se muestra en la Fig. 8. A este cambio se le puede asociar un factor de desmagnetización el cual está asociado directamente a la longitud del entrehierro.

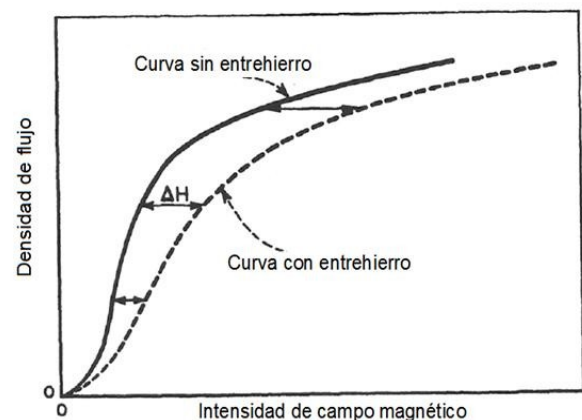


Fig.8. Curva de magnetización con y sin entrehierro [1].

En la Fig. 9 se pueden apreciar los vectores de intensidad de campo en el interior de un circuito ferromagnético con presencia de entrehierro. El campo magnético real H se refiere a la intensidad de campo que se necesitaría para producir, en el circuito ferromagnético sin presencia de entrehierro, la misma inducción magnética B que produciría el campo magnético aplicado H_a en el mismo circuito ferromagnético pero con la presencia del entrehierro.

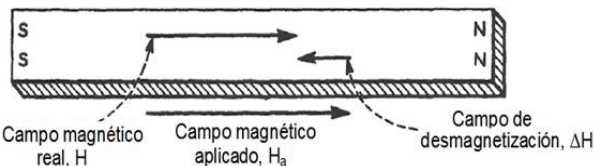


Fig.9. Vectores de intensidad de campo [1].

De lo anterior, se infiere que en los circuitos ferromagnéticos con presencia de entrehierros se tendrán menores niveles de densidad de flujo residual y Remanencia en comparación con estos circuitos sin el entrehierro. Esta reducción es proporcional a la longitud del entrehierro, es decir, a mayor longitud menor densidad de flujo residual y Remanencia.

7. PROCESO DE DESMAGNETIZACIÓN DE ESTRUCTURAS FERROMAGNÉTICAS.

Como se ha visto a través de este artículo la inducción residual es una propiedad intrínseca de los materiales ferromagnéticos, en otras palabras, en los materiales ferromagnéticos siempre se tendrá que convivir con la inducción residual.

Debido a lo anterior, surge en algunos casos especiales la necesidad de desmagnetizar los núcleos ferromagnéticos.

La desmagnetización consiste básicamente en disminuir al máximo el valor de la Remanencia.

Algunos de los procesos de desmagnetización son:

7.1 . Desmagnetización térmica

Es el procedimiento menos utilizado y consiste básicamente en elevar la temperatura de la estructura ferromagnética a un punto superior al de Curie [2].

7.2 . Desmagnetización cíclica.

Consiste en someter al núcleo ferromagnético a un campo magnético alternativo al cual se le reduce lentamente su amplitud. De esta manera la densidad

de flujo B es forzada a seguir lazos más y más pequeños hasta que llega a valores cercanos al origen [2], como se observa en la Fig. 10.

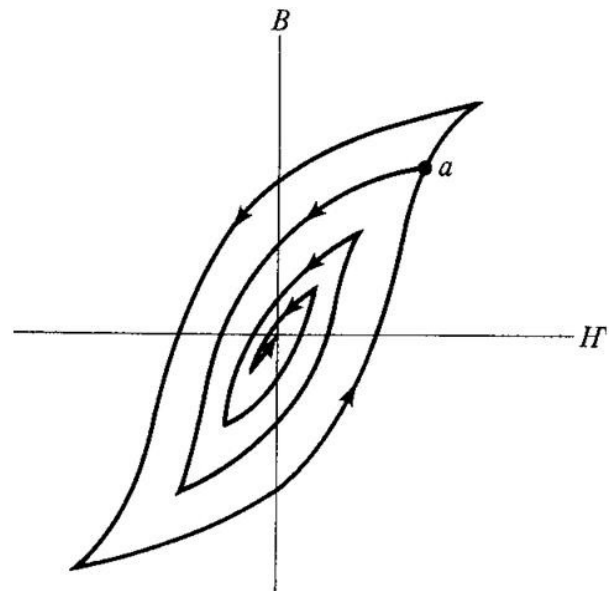


Fig.10. Desmagnetización cíclica [2].

8. OBTENCIÓN DE LA CURVA DE HISTÉRESIS DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 75KVA.

Esta prueba se realizó conjuntamente en el laboratorio de Máquinas Eléctricas y de Alta Tensión de la Universidad del Valle con el objetivo de comprobar el proceso de desmagnetización cíclica y de obtener la gráfica de la curva de histéresis de manera práctica para transformadores.

8.1 . Equipos utilizados

- Máquina de DC.
- Voltímetro.
- Amperímetro.
- Gaussímetro F.W. BELL 5170.
- Variac (autotransformador)
- Transformador Suntec trifásico de 75 kVA.

8.2. Utilización del medidor de densidad de flujo

Para medir la densidad de flujo en cada instante de la prueba se utiliza el medidor de densidad de flujo F.W. BELL 5170, este medidor viene con una sonda que ha de colocarse de manera tal que el flujo sea transversal a esta, para el objeto de esta prueba se abre un entrehierro en el transformador del tal manera que quede en la unión de la pierna y el yugo superior y dentro de este entrehierro se ubicará la sonda, como se observa en las Fig. 11 y 12.

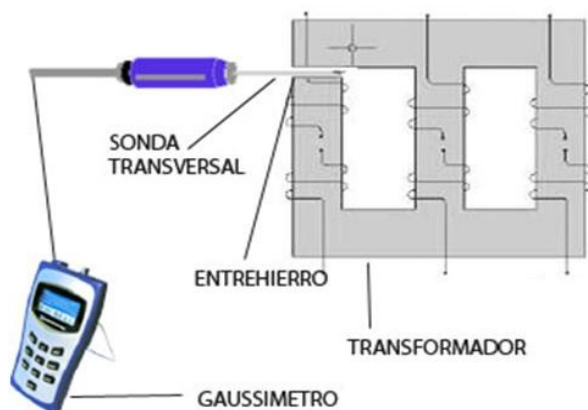


Fig.11. Esquema de medición con el gaussímetro.



Fig.12. Disposición física del gaussímetro en el transformador.

8.3. Desmagnetización del transformador

La primera parte de la prueba consistió en desmagnetizar el transformador con el método de

desmagnetización cíclica, esto con el fin de que la Remanencia no afecte la curva de histéresis y garantice empezar con un valor nulo de densidad de flujo.

Para lograr ello se conecta un autotransformador a las bobinas de baja tensión del transformador de prueba.

Una vez realizada la correcta conexión del autotransformador se procede a llevarlo a 220V de AC con frecuencia 60 Hz con el fin de aplicar el voltaje nominal al transformador de prueba, y luego se reduce la amplitud de la señal de voltaje manteniendo la frecuencia constante y esperando entre reducciones un tiempo de 30 segundos a un minuto aproximadamente y se toman los datos de la densidad de flujo que hay en el núcleo para cerciorarse de que este quede desmagnetizado, como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Desmagnetización cíclica.

VOLTAJE rms(V)	B rms (kG)
220	2.2
110	1.09
53.3	0.528
26	0.26
0	0.001*

*Esta medición fue realizada en DC.

8.4. Curva de Histéresis.

El procedimiento que se llevo a cabo para la obtención de la curva de histéresis fue:

1. Con la fuente de DC energizar la bobina de alta tensión y con ella comenzar a elevar la corriente en pequeños escalones hasta saturar el núcleo. En cada escalón de corriente medir la densidad de flujo.
2. En el punto de máxima corriente se procede a devolverse, es decir, se comienza a disminuir el voltaje aplicado hasta que la corriente sea cero. Nuevamente medir la densidad de flujo.

3. Ahí, invertir la fuente y paulatinamente aumentar la corriente en pequeños escalones hasta saturar el núcleo. Nuevamente medir la densidad.
4. Repetir el ítem 3.

La curva de histéresis obtenida se presenta en la Fig. 13.

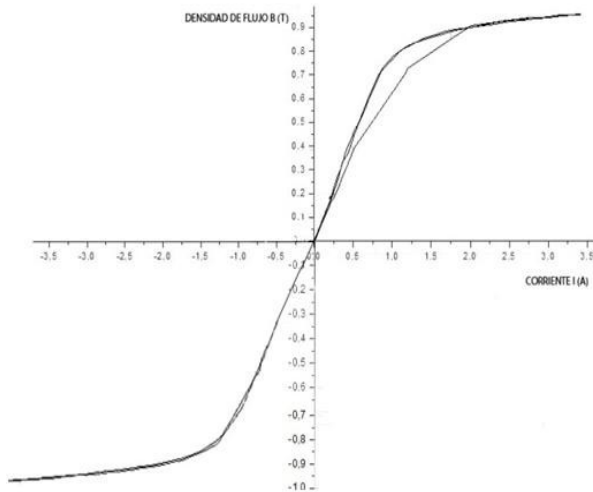


Fig. 13. Curva de histéresis obtenida.

Es notorio que la presencia del entrehierro en el núcleo del transformador produce una desmagnetización de éste, la cual se evidencia en las bajas densidades de flujo alcanzadas en la prueba.

El valor de remanencia obtenido fue de 15.53mT.

A continuación, se calculará la inductancia del devanado de alta tensión durante el primer tramo de la curva de histéresis. Para este cálculo se supondrá que la densidad de flujo es constante en toda el área de la sección del núcleo. La inductancia es igual a:

$$L = N \frac{\Phi}{i} = N \frac{B * A}{i} \quad (3)$$

En el caso del lado de alta tensión del transformador objeto de la prueba $N = 3704$ espiras, la sección transversal $A = 0,009925m^2$ y $R = 60\Omega$. Por lo tanto,

$$L = 36,7622 \frac{B}{i} \quad (4)$$

Ahora, reemplazando los valores de i y B del primer tramo del ciclo de histéresis se obtiene la gráfica de la Fig. 14.

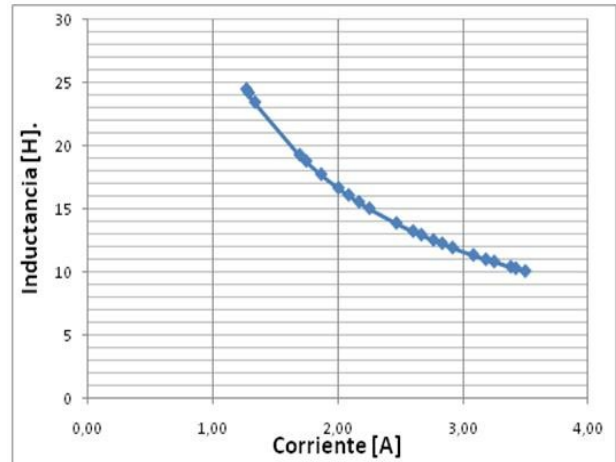


Fig. 14. Inductancia durante el primer tramo del ciclo de histéresis.

El tiempo que tardaría la corriente desde un valor determinado hasta 0A se muestra en la Fig. 15. Este tiempo es aproximadamente igual a 5τ donde

$$\tau = \frac{L}{R}$$

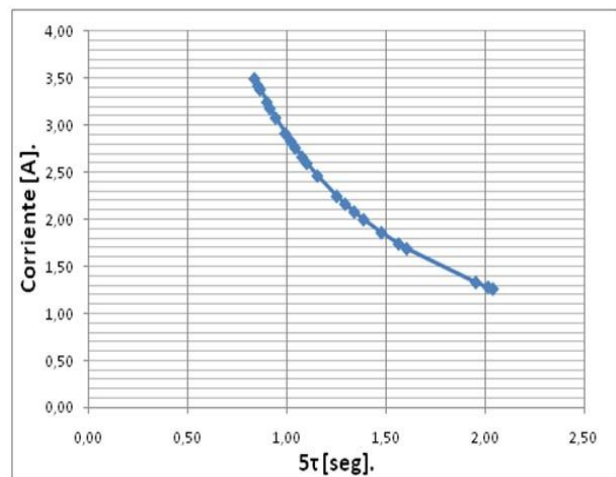


Fig. 15. Tiempo de estabilización de corriente.

9. CONCLUSIONES

Los parámetros y variables del transformador que influyen en la magnitud de la Remanencia son la magnitud de la onda de voltaje, material del núcleo, contenido de impurezas del material, temperatura del núcleo, tiempo de operación del transformador y la inducción máxima.

Se comprobó en el laboratorio que la desmagnetización cíclica sí reduce la Remanencia a valores muy cercanos a cero.

Para efectos prácticos se puede considerar que la Remanencia en un transformador no se ve disminuida debido al envejecimiento del material ferromagnético.

Las estructuras ferromagnéticas con entrehierros de aire, las máquinas eléctricas por ejemplo, presentan niveles de Remanencia menores que las estructuras sin entrehierro.

El tiempo que se espera en el proceso de desmagnetización para disminuir la tensión es el tiempo necesario para que se establezca la corriente, este tiempo depende de la inductancia y la resistencia del devanado, lo que depende del tamaño del transformador y la masa de cobre que este tenga.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Bozorth, *Ferromagnetism*, New York: Wiley, 1993.
- [2] R. O'Handley, *Modern Magnetic Materials, Principles and applications*, John Wiley & Sons, 2000.
- [3] Yi Liu, D. Sellmyer, *Handbook of Advanced Magnetic Materials*, New York: Springer, 2006.
- [4] E. Wohlfarth, *Handbook of Magnetic Materials*, North-Holland Publishing Company, 1980.
- [5] B. Cullity, C. Graham, *Introduction to magnetic materials*, John Wiley & Sons, 2009.
- [6] M. Saduki, *Elements of Electromagnetics*, Oxford University Press, 2001.
- [7] D. Corson, P. Lorrain, *Campos y ondas electromagnéticas*, Freeman and Company, 1988.
- [8] A. N. Matveev, *Electricidad y magnetismo*, Editorial MIR, 1988.
- [9] W. Hayt, *Engineering electromagnetics*, McGraw Hill, 2002.
- [10] M. Emura, *Angular dependence of magnetic properties of 2% silicon electrical steel*, Journal of magnetism and magnetic materials, 2001.
- [11] ASTM, *Standard terminology of symbols and definitions relating to magnetic testing*, ASTM, 1968.
- [12] N. P. Bogoróditiski, *Materiales Electrotécnicos*, Editorial MIR, 1979.