

## Diseño, Construcción y Pruebas Básicas de un Transformador de Pequeña Capacidad

M.C. Onofre A. Morfín Garduño<sup>1</sup>, M.I. David García Chaparro<sup>2</sup>, M.I. Gabriel Bravo Martínez<sup>3</sup>

### RESUMEN

Básicamente se reportan algunas de las actividades teórico-prácticas que se han desarrollado en el tema de Sistemas Magnéticos de la materia de Máquinas y Fuentes de Corriente Directa ofertada en la carrera de Ingeniería Eléctrica del Instituto de Ingeniería y Tecnología en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua. Se inicia con el proceso de diseño de un transformador de pequeña capacidad, posteriormente se presentan las etapas de su fabricación y en la parte final se realizan procedimientos prácticos, para establecer su circuito equivalente y poder así cuantificar analíticamente su regulación de voltaje, su eficiencia, pérdidas en los conductores y pérdidas magnéticas.

### 1. Diseño del Transformador

Se utilizan laminaciones tipo E, en la fabricación del transformador de pequeña capacidad tipo acorazado con núcleo cuadrado, sus medidas están en función del ancho de la columna central. Para la laminación 100 esta medida es de una 1.0 pulgada (ver Figura 1). La información de entrada al proceso de diseño consiste en: a) registrar el número de identificación de la laminación, b) los valores eficaces de la corriente y el voltaje de salida del transformador, c) el voltaje eficaz de entrada y d) el nivel de pérdidas deseado

de los conductores en porcentaje (valor por omisión: 5%). En el proceso de diseño se dimensiona el sistema magnético del transformador (longitud media, área transversal), se cuantifican las resistencias de los devanados primario y secundario, la inductancia de magnetización y el nivel de pérdidas en los conductores. En la etapa de resultados se reporta: el calibre del conductor, el número de vueltas y el peso en gramos de cable requerido para cada devanado. Además, se reporta el tipo de laminación.

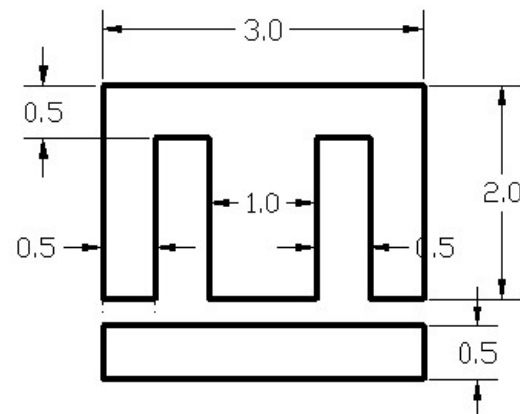


Figura 1. Laminación tipo E.

Algunas de las ecuaciones que se aplican en el proceso de diseño son:

*Voltaje Inducido en el primario*

$$V_p = 4.44 N_p f B_{\max} A_c \quad (1)$$

donde:

<sup>1</sup> Depto. de Eléctrica y Computación, IIT. UACJ. [omorfin@uacj.mx](mailto:omorfin@uacj.mx)

<sup>2</sup> Depto. de Eléctrica y Computación, IIT. UACJ. [dagarcia@uacj.mx](mailto:dagarcia@uacj.mx)

<sup>3</sup> Depto. de Eléctrica y Computación, IIT. UACJ. [gbravo@uacj.mx](mailto:gbravo@uacj.mx)

$V_p$  = Voltaje inducido en el primario.  
 $N_p$  = Número de vueltas del primario.  
 $f$  = Frecuencia.  
 $B_{max}$  = Densidad de campo magnético máxima.  
 $A_c$  = Área de la sección transversal del núcleo, donde se montan las bobinas.

*Relación de vueltas del transformador*

$$a = \frac{V_p}{V_s} \quad (2)$$

donde:

$V_p$  = Voltaje inducido en el primario.  
 $V_s$  = Voltaje inducido en el secundario.

*Resistencia en un devanado*

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3)$$

donde:

$\rho$  = Resistividad del alambre magneto.  
 $l$  = longitud del alambre.  
 $A$  = Área de su sección transversal.

*Pérdidas en el conductor, en Watts*

$$P_R = RI^2 \quad (4)$$

donde:

$R$  = Resistencia del devanado.  
 $I$  = Corriente en el devanado.

*Inductancia de magnetización*

$$L_m = \frac{\mu_c N_p^2 A_c}{l_c} \quad (5)$$

donde:

$N_p$  = Número de vueltas del primario.  
 $\mu_c$  = permeabilidad del núcleo magnético  
 $A_c$  = Área de su sección transversal.  
 $l_c$  = longitud media del núcleo.

Para calcular la longitud media y definir el área de la sección transversal del núcleo del transformador tipo acorazado que tiene dos ventanas, se debe determinar el sistema magnético equivalente a un transformador tipo columna, el cual solo tiene una ventana.

## 1.1 Interfaz de usuario del programa de diseño

El proceso de diseño del transformador de pequeña capacidad fue desarrollado en el lenguaje orientado a objetos C#, teniendo el objetivo de diseñar una aplicación fácil de manejar por parte del usuario.

*Datos de entrada.* Los parámetros de entrada comprenden: tipo de laminación, voltaje de entrada, voltaje y corriente de salida y el nivel de pérdidas en el cobre deseado. Ver Figura 2.

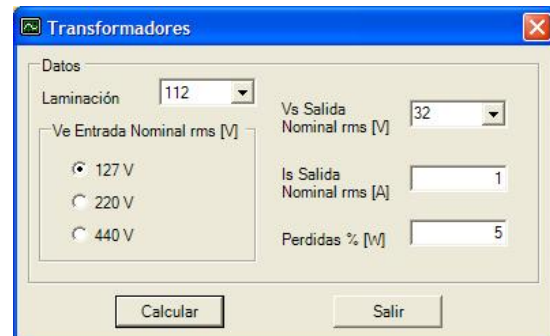


Figura 2. Datos de entrada

*Parámetros de diseño.* Se reportan los parámetros más importantes del sistema magnético y de los devanados primario y secundario. Ver Figura 3.

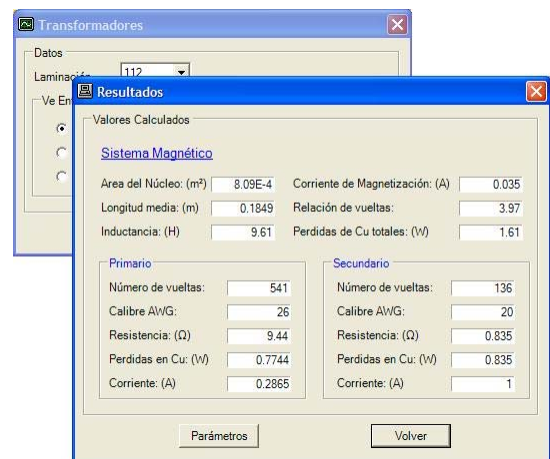


Figura 3. Parámetros de diseño

*Parámetros de Fabricación.* Se reportan los parámetros necesarios a considerar en el proceso de fabricación del transformador. Ver Figura 4.

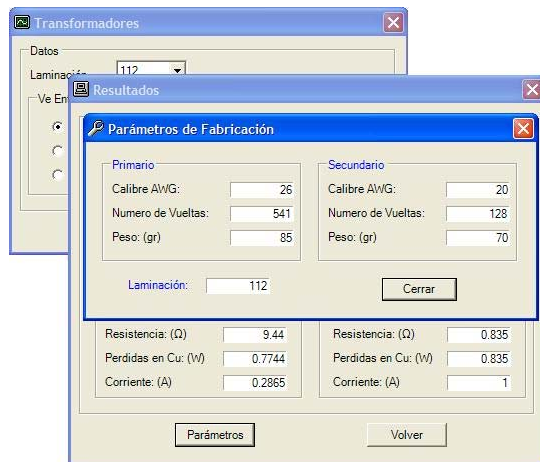


Fig. 4 Parámetros de fabricación.

## 2. Construcción del Transformador

El material requerido para la fabricación del transformador de pequeña capacidad consiste en las laminaciones de acero al silicio tipo “E” y tipo “I”, un carrete de plástico donde se alojan ambos devanados, dos calibres AWG de alambre magneto para los devanados primario y secundario, y accesorios para la sujeción del transformador. Ver Figura 5.



Fig. 5 Material requerido para la fabricación.

El carrete de plástico donde se alojan ambos devanados es de sección cuadrada, por lo que primero tiene que enrollarse el devanado primario, el cual es de menor calibre y más fácil de maniobrar. Posteriormente se aplica una capa de cinta aislante, para después enrollar el devanado secundario, teniendo la previsión de que si debe contar con una derivación central, debe prepararse una terminal de salida a la mitad del número de vueltas. En la figura 6, se presenta el carrete con los dos devanados enrollados.

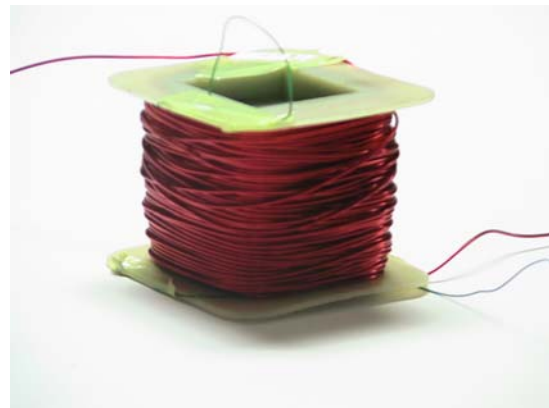


Fig. 6 Carrete con ambos devanados enrollados.

En la figura 7, se muestra la herramienta manual con la que se enrollaron los devanados del transformador, la cual

tiene un contador mecánico a base de engranes.

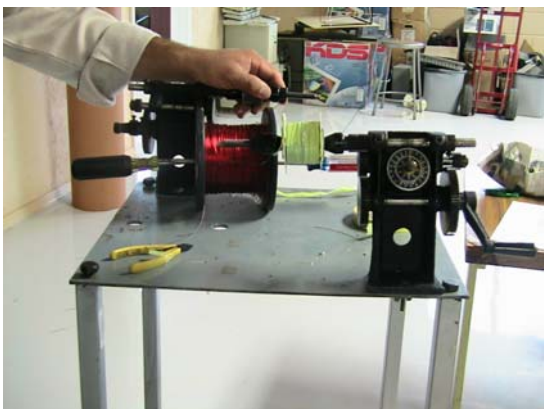


Fig. 7 Herramienta utilizada para embobinar.

En la Figura 8, se muestra el transformador fabricado cuyas variables de salida son: 1 Ampere y 32 volts.



Fig. 8 Transformador construido.

### 3. Pruebas Eléctricas

Se realizaron pruebas estándar al transformador construido, se destaca el procedimiento para determinar la inductancia mutua entre los devanados, el circuito eléctrico utilizado para emular el lazo de histéresis, y la utilización del osciloscopio para distinguir el defasamiento de la corriente respecto al voltaje, en la prueba en vacío y en la de corto circuito.

### 3.1 Relación de vueltas

Se conecta un autotransformador de laboratorio (variac) al primario del transformador, con un voltmetro se mide el voltaje en el primario y el voltaje inducido en el secundario, como es mostrado en el circuito de la figura 9.

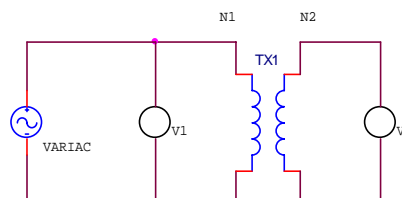


Figura 9. Determinación de la relación de vueltas.

*Relación de vueltas del transformador*

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (6)$$

V1	V2
119.8	29.9

Tabla 1. Mediciones de la relación de voltajes.

Por lo que la relación de vueltas del primario respecto al secundario del transformador corresponde a 4.

$$a = \frac{V_1}{V_2} = 4$$

### 3.2 Número de vueltas del primario

El procedimiento consiste en aplicar el voltaje nominal al devanado correspondiente, para medir el voltaje inducido en una o varias vueltas, de alambre previamente enrollado, sobre los devanados del transformador. La relación del voltaje de alimentación y la (s) vuelta (s) establece el número de vueltas del devanado. En esta prueba se enrollaron

cuatro vueltas a través de la ventana del transformador.

*Numero de vueltas del primario*

$V_1$	$V_{4vueltas}$
119.8	0.8858

Tabla 2. Medición del número de vueltas del primario.

$$N_1 = \frac{119.8}{0.8858} \times 4 = 541 \text{ vueltas}$$

*Numero de vueltas del secundario*

$V_2$	$V_{4vueltas}$
29.89	0.8842

Tabla 3. Medición del número de vueltas del secundario.

$$N_2 = \frac{29.89}{0.8842} \times 4 = 135 \text{ vueltas}$$

### 3.3 Identificación de las marcas de polaridad

Para realizar esta prueba se alimenta al primario del transformador con voltaje nominal, previamente se conecta una terminal del primario con la del secundario como se muestra en la figura 10. Se conecta un voltmetro entre las terminales del primario y secundario que están disponibles. Si la lectura obtenida corresponde a la resta del voltaje del primario y del secundario, las marcas se colocan en las terminales donde está conectado el voltmetro. Si la lectura es la suma, las marcas de polaridad deberán estar una en la terminal donde está el voltmetro y la otra en la terminal donde se unió el primario y el secundario.

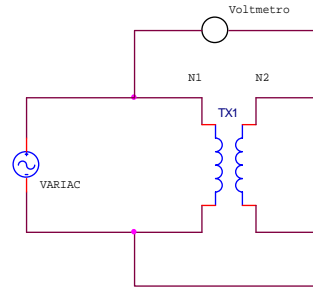


Figura 10. Identificación de las marcas de polaridad.

$V_1$	$V_{\text{Voltmetro}}$
120	150

Tabla 4. Identificación de Marcas de polaridad.

Debido a que la medición registrada por el voltmetro corresponde a la suma de los voltajes del primario y secundario, las marcas de polaridad están cruzadas, respecto a la presentación física de las terminales de ambos devanados.

### 3.4 Resistencias de los devanados

Se mide la resistencia de cada devanado, previamente con un multímetro para tener una referencia de su valor. Posteriormente se aplica el método volt-amperímetro alimentando con una fuente de corriente directa al devanado de manera que circule la corriente nominal. Al aplicar la ley de Ohm se relacionan las mediciones del voltmetro y del amperímetro y se determina la resistencia. Este proceso debe de realizarse para ambos devanados.

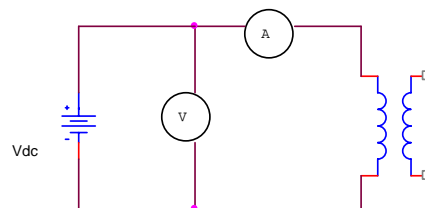


Figura 11. Medición de la resistencia de un devanado.

*Resistencia del devanado primario*

V	I
2.5708 V	0.2588 A

Tabla 5. Medición de la resistencia del primario.

$$R_1 = \frac{V}{I} = \frac{2.5708}{0.2588} = 9.93 \ \Omega$$

*Resistencia del devanado secundario*

V	I
0.418 V	0.547 A

Tabla 6. Medición de la resistencia del secundario.

$$R_2 = \frac{V}{I} = \frac{0.418}{0.547} = 0.76 \ \Omega$$

**3.5 Inductancias propias del devanado primario y secundario**

*Circuito Acoplado.*

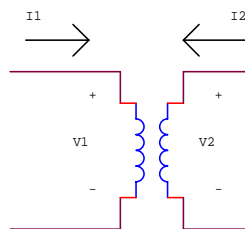


Figura 12. Circuito acoplado magnéticamente.

Relaciones de voltaje en función del tiempo, para un circuito magnéticamente acoplado:

$$\begin{aligned} v_1(t) &= L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \\ v_2(t) &= L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

donde:

$L_{11}$  es la inductancia propia del primario.

$L_{22}$  la inductancia propia del secundario.

$L_{12}$  la inductancia mutua de ambos devanados.

Para determinar la inductancia propia de un devanado, preliminarmente se aplica el método volt-amperímetro, alimentando con corriente alterna a voltaje nominal, para definir la impedancia, Figura 13. Posteriormente se calcula la reactancia en función de la impedancia y de la resistencia del devanado. La reactancia al relacionarla con la frecuencia de alimentación establece la inductancia del devanado.

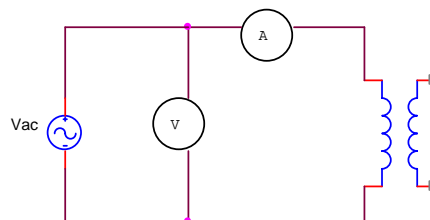


Figura 13. Medición de la inductancia propia de un devanado.

Se aplican las siguientes relaciones:

$$X_{devanado} = \sqrt{\left(\frac{V}{I}\right)^2 - (R_{devanado})^2} \quad (8)$$

$$L_{propia} = \frac{X_{devanado}}{2\pi f} \quad (9)$$

*Inductancia propia del devanado primario*

V	I
120.75 V	45 mA

Tabla 7. Inductancia propia del primario.

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{120.75}{0.045} = 2683.3 \ \Omega$$

$$L_1 = \frac{\sqrt{2683.3^2 - 9.93^2}}{2\pi(60 \text{ Hz})} = 7.1 \text{ H}$$

*Inductancia propia del devanado secundario*

V	I
30.33 V	180.4 mA

Tabla 8. Inductancia propia del secundario.

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} = \frac{30.33}{0.180} = 168.1 \ \Omega$$

$$L_2 = \frac{\sqrt{(168.1)^2 - (0.76)^2}}{2\pi(60 \text{ Hz})} = 0.446 \text{ H}$$

**3.6 Procedimiento para determinar la inductancia mutua**

Utilizando el método volt-amperímetro se determina la inductancia  $L_a$  del arreglo mostrado en la figura 14, en donde de acuerdo a la ubicación de las marcas de polaridad, el voltaje de alimentación debe de corresponder a la diferencia de los

voltajes nominales de los devanados, esto con la finalidad de que no se sature el núcleo por sobrevoltaje.

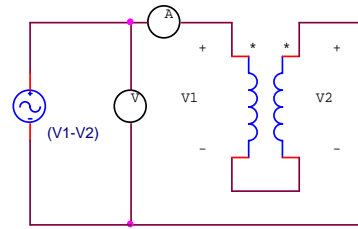


Figura 14. Medición de la inductancia, arreglo a).

V	I
150.2 V	0.035 A

Tabla 9. Mediciones en el arreglo a)

Para la inductancia  $L_b$  del arreglo mostrado en la figura 15, las marcas de polaridad están cruzadas, por lo que el voltaje de alimentación debe de corresponder a la suma de los voltajes nominales de los devanados, esto con la finalidad de establecer el mismo grado de saturación del inciso anterior.

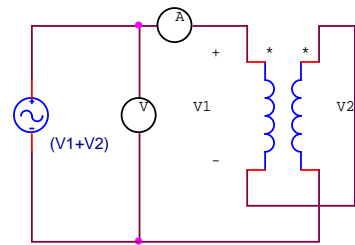


Figura 15. Medición de la inductancia, arreglo b).

V	I
150.2 V	0.035 A

Tabla 10. Mediciones en el arreglo b)

Se aplican las siguientes relaciones, para ambos arreglos:

$$L_a = \frac{\sqrt{\left(\frac{V}{I}\right)^2 - (R_r)^2}}{2\pi f} \quad (10)$$

$$L_{12} = \frac{|L_a - L_b|}{4} \quad (11)$$

	L
Arreglo a)	11.25 H
Arreglo b)	4.12 H

Tabla 11. Inductancias de cada arreglo

Cálculo de la inductancia mutua, ec. 11

$$L_{12} = \frac{|11.25 - 4.12|}{4} = 1.78 \text{ H}$$

### 3.7 Prueba en vacío

Se realiza a voltaje nominal aplicado al lado más conveniente, regularmente es el lado de baja. Como el transformador utilizado es de pequeña capacidad, se alimenta el primario. Debido a que el nivel de potencia consumido por el transformador en esta prueba es muy bajo, se optó por distinguir el defasamiento entre la corriente y el voltaje con un osciloscopio. Ver Figuras 16 y 17.

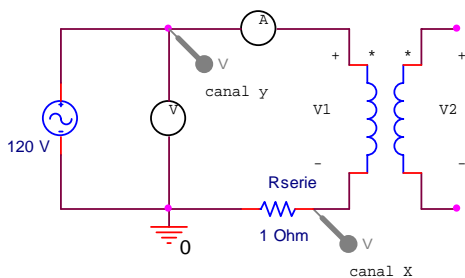


Figura 16. Conexión de la prueba en vacío.

V	I
120.7 V	44.6 mA

Tabla 12. Mediciones de la prueba en vacío.

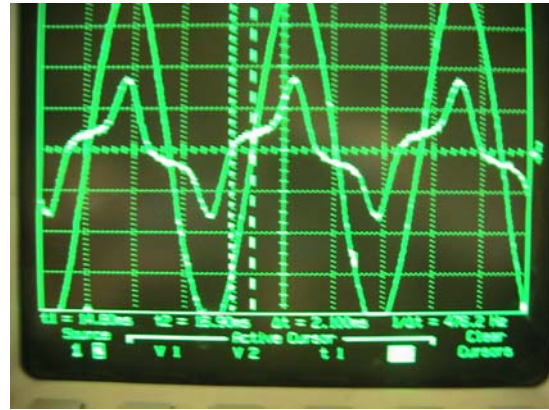


Figura 17. Defasamiento de la corriente de magnetización respecto al voltaje.

En la figura 17, se muestra el defasamiento de la corriente de magnetización respecto al voltaje, se registro un retardo de 2.1 ms que corresponde a 45.3° a la frecuencia de 60 Hz, ecuación 13.

$$\theta = \omega t \times \frac{180^\circ}{\pi \text{ rad}} = 2\pi f t \times \frac{180^\circ}{\pi \text{ rad}} \quad (12)$$

Ecuaciones utilizadas en esta prueba:

Factor de Potencia

$$f.p. = \cos \theta \quad (13)$$

Potencia consumida en la prueba:

$$P_{oc} = V_{oc} I_{oc} f.p. \quad (14)$$

Resistencia de pérdidas magnéticas

$$R_{oc} = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} \quad (15)$$

Corriente de pérdidas

$$I_c = \frac{V_{oc}}{R_c} \quad (16)$$

Corriente de magnetización

$$I_m = \sqrt{I_{oc}^2 - I_c^2} \quad (17)$$

Reactancia de magnetización



$$X_m = \frac{V_{oc}}{I_m} \quad (18)$$

Inductancia de magnetización

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} \quad (19)$$

Por lo tanto, los resultados de la prueba en vacío son:

Angulo de defasamiento	$\theta$	45.3°
Factor de potencia	f.p.	0.7026
Perdidas en vacío	P <sub>OC</sub>	4 Watts
Resistencia de perdidas	R <sub>OC</sub>	4077 Ω
Corriente de pérdidas	IC	0.031 A
Corriente de magnetización	Im	0.032 A
Reactancia de magnetización	X <sub>m</sub>	3991 Ω
Inductancia de magnetización	L <sub>m</sub>	10.6 H

Tabla 13. Resultados de la prueba en vacío.

### 3.8 Prueba en corto circuito

Esta prueba se realiza a corriente nominal, se conecta el lado de baja en corto y se aumenta gradualmente desde cero el voltaje alimentado al primario. En esta prueba, las pérdidas en el núcleo se desprecian debido a que el voltaje es muy bajo.

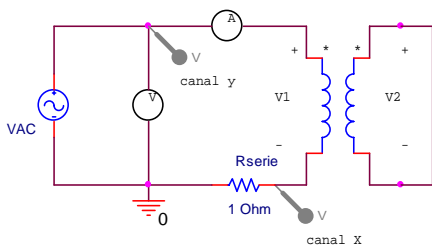


Figura 18. Conexión de la prueba en corto circuito.

V	I	Retraso de corriente
5.528 V	0.255 A	2.1 ms

Tabla 14. Mediciones de la prueba en corto circuito.

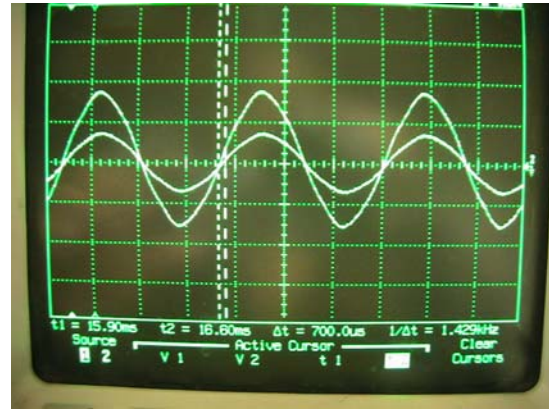


Figura 19. Defasamiento de la corriente respecto al voltaje, en la prueba de corto circuito.

se registro un retardo de 700 μs que corresponde a 15.1° a la frecuencia de 60 Hz, ecuación 13.

Ecuaciones utilizadas en esta prueba:

Resistencia de pérdidas en el cobre

$$R_{eq1} = \frac{P_{sc}}{I_1^2} = \quad (20)$$

Impedancia de la prueba

$$Z_{eq1} = \frac{V_1}{I_1} \quad (21)$$

Reactancia de dispersión magnética

$$X_{eq1} = \sqrt{Z_{eq1}^2 - R_{eq1}^2} \quad (22)$$

Resistencias del primario y del secundario

$$R_1 = R_2 = \frac{R_{eq1}}{2} \quad (23)$$

Reactancias de dispersión de ambos devanados

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{eq1}}{2} = \frac{5.72}{2} = 2.8 \Omega \quad (24)$$

donde R'₂ y X'₂ son la resistencia y reactancia del secundario referidas al primario.

Por lo tanto, los resultados de la prueba en corto circuito son:

Factor de potencia	f.p.	0.965
Perdidas en corto circuito	$P_{SC}$	1.36 W
Resistencia equivalente total	$R_{eq1}$	20.9 $\Omega$
Impedancia equivalente total	$Z_{eq1}$	21.7 A
Reactancia equivalente total	$X_{eq1}$	5.72 A
Resistencia de cada devanado	$R_1=R'_2$	10.4 $\Omega$
Reactancia de cada devanado	$X_1=X'_2$	2.8 H

Tabla 15. Resultados de la prueba en vacío.

A partir de las mediciones de las pruebas en vacío y en corto circuito y de su análisis, se establecen los parámetros del circuito equivalente eléctrico de operación del transformador. Ver Figura 20.

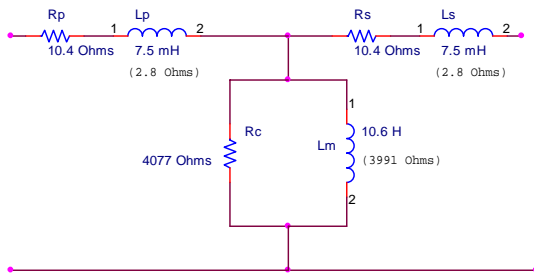


Figura 20. Circuito Eléctrico Equivalente

### 3.9 Pérdidas de energía en el núcleo

Las pérdidas en el núcleo en los sistemas electromagnéticos comprenden dos componentes, las pérdidas por corrientes inducidas (corrientes de Eddy) y las pérdidas por histéresis. Las pérdidas por corrientes de Eddy se deben a lazo de corriente inducida debido al campo magnético variante en el tiempo a una frecuencia de 60 Hz y a las características de conductividad eléctrica del núcleo magnético.

### 3.10 Pérdidas de energía en el núcleo por efecto del lazo de histéresis

Cuando los sistemas electromagnéticos tales como relevadores, motores y transformadores se alimentan con corriente alterna, el efecto de magnetización y desmagnetización no se establece en el mismo lugar geométrico de la curva de magnetización y es así como se establece el lazo de histéresis cuya área representa una de las componentes de pérdidas en el núcleo, Figura 21.

#### Características del Lazo de Histéresis

- El lazo de histéresis muestra que la relación entre B y H es una relación no lineal y multivaluada. El concepto básico de función no aplica, ya que para un valor de la variable independiente, H, le corresponden dos diferentes valores de la función, uno que corresponde al proceso de magnetización y otro para la desmagnetización.

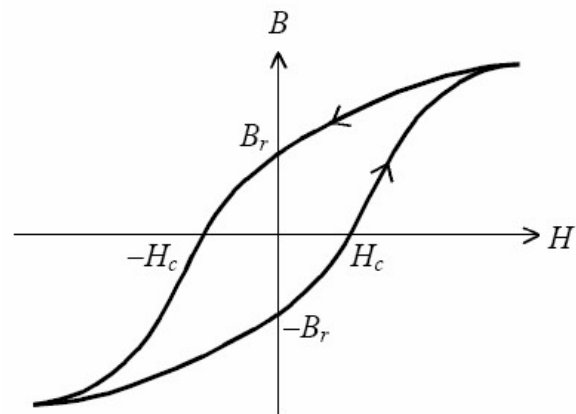


Figura 21. Lazo de histéresis.

- A través de todo el ciclo de magnetización la densidad de flujo atrasa a la intensidad magnética. Al

desmagnetizarse positivamente el núcleo, cuando la fuerza magnetizante cruza por cero la densidad de campo magnético, todavía tiene un valor importante el cual se denomina magnetismo remanente. Una vez que la densidad cruza por cero, el valor de la intensidad magnética es negativo y se denomina fuerza coerciva, necesaria para desmagnetizar el núcleo.

- c) El lugar geométrico de los valores máximos de H de varios lazos, alimentando con una fuente de voltaje variable al devanado, establecen la curva de magnetización del material ferromagnético, Figura 22.
- d) Debido a la no linealidad del lazo de histéresis, la forma de la corriente de magnetización se distorsiona, y debido al ancho de histéresis, provoca que la distorsión no sea simétrica respecto a la vertical. Ver Figura 25.

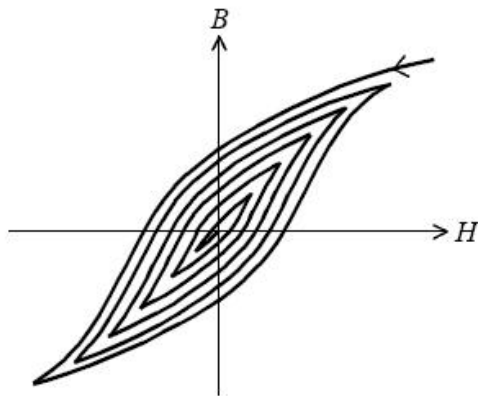


Figura 22. Familia de lazos de histéresis.

### 3.11 Obtención del lazo de histéresis en forma experimental

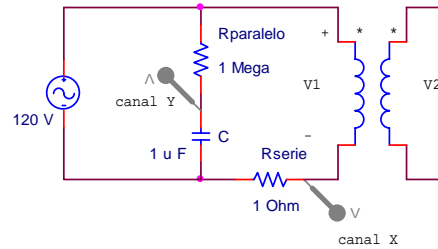


Figura 23. Circuito que emula el lazo de histéresis.

#### Intensidad magnética, H.

Aplicando la ley de Amper y despejando H, se obtiene

$$H = \frac{N_{\text{primario}}}{l_c} i_{\text{primario}} \quad (25)$$

Conectando una resistencia de 1 Ω en serie con el transformador, se establece una relación directa entre su voltaje en terminales y la intensidad magnética H, ecuación

$$H = \frac{N_{\text{primario}}}{R_{\text{serie}} l_c} V_R \quad (26)$$

El número de vueltas del primario,  $N_{\text{primario}}$  y la longitud media del circuito magnético,  $l_c$ , se obtienen de los parámetros de diseño. Ver Figura 3.

$$H = \frac{541}{(1)(0.1849)} V_R = 2926 V_R$$

Por lo tanto, la ganancia para hacer corresponder la corriente de magnetización con la intensidad de campo magnético es de 2926.

#### Densidad Magnética, B

Aplicando la Ley de Inducción de Faraday y despejando B, se obtiene

$$B = \frac{1}{NA} \int V_p dt \quad (27)$$

de la rama en paralelo del circuito que emula la curva de magnetización, fig. 23.

$$V_p = R_p C \frac{dV_c}{dt} + V_c \quad (28)$$

donde:

$$\int (V_p - V_c) dt = R_p C \int dV_c$$

si  $V_C \ll V_p$ , entonces

$$\int V_p dt \approx R_p C V_c \quad (29)$$

substituyendo la ecuación 29 en la 27,

$$B = \frac{C R_{paralelo}}{N A_c} V_c \quad (30)$$

Substituyendo los valores de  $N_p$  y  $A_c$ , obtenidos del programa de diseño, Fig. 3.

$$B = \frac{(1E-6)(1E6)}{(541)(8.093E-4)} V_c = 2.28 V_c$$

De la anterior ecuación, la ganancia para hacer corresponder el voltaje sentido en terminales del capacitor con la densidad de campo magnético es de 2.28.

En la figura 24, se muestra el lazo de histéresis del transformador, en donde el punto máximo tiene como coordenadas a ( $V_R = 86.7$  mV,  $V_C = 437$  mV) que corresponde a ( $H = 253$  A.v/m,  $B = 1.0$  Teslas). En la Figura 25 se presenta la corriente de magnetización del transformador.

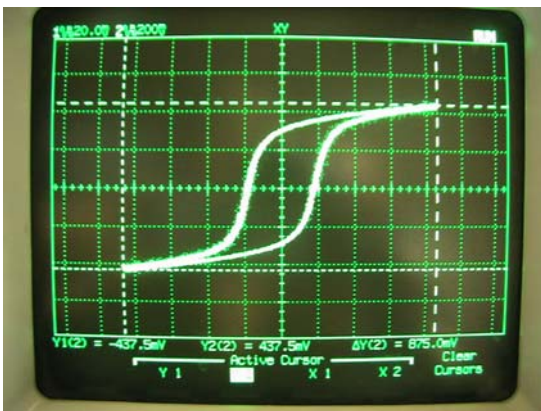


Figura 24. Lazo de histéresis emulado.

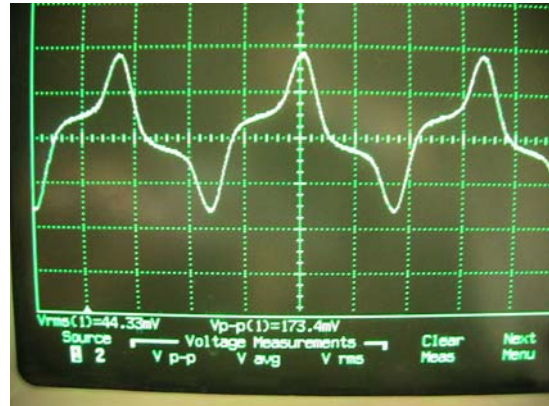


Figura 25. Corriente de magnetización.

#### 4. Conclusiones

En la presente investigación se presenta en forma integral las etapas de diseño y construcción de un transformador de pequeña capacidad, además de establecer las pruebas físicas y eléctricas estándar de los transformadores, las cuales pueden extrapolarse a transformadores de mayor capacidad.

#### Referencias Bibliográficas

- Paresh, Sen C. 1997. *"Principles of Electric Machines and Power Electronics"*. U.S. John Wiley and Sons.
- Huelsman, Lawrence P. 1991. *"Basic Circuit Theory"*, 3<sup>rd</sup> edition. U.S. Prentice Hall.