

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

CHARACTERIZATION OF FERROMAGNETIC MATERIALS AND TRANSFORMERS

Juan Andrés Leal Pérez¹

Luis David Pabón Fernández²

Jorge Luis Díaz Rodríguez³

Edison Andrés Caicedo Peñaranda⁴

Resumen

Este artículo presenta una plataforma que caracteriza materiales ferromagnéticos en términos del ciclo de histéresis, nivel de inducción máxima y modelos circuitales, utilizado en materiales ferromagnéticos presentes en el núcleo de los transformadores eléctricos monofásicos y trifásicos. Para la caracterización se utiliza una interfaz gráfica Matlab, que utiliza un sistema de adquisición de la empresa National Instruments (DAQ), complementado por un conjunto de sensores de voltaje y corriente fabricados por la empresa FLUKE. Las magnitudes de corriente y voltaje son utilizadas mediante los fundamentos teóricos del transformador con la ayuda de métodos numéricos para determinar los parámetros eléctricos del material ferromagnético.

Palabras clave: Ferromagnético, Histéresis, inducción, transformador.

Abstract

This paper presents a platform that characterizes ferromagnetic materials in terms of the hysteresis cycle, maximum induction level and circuitual models, used in ferromagnetic materials present in the magnetic core of the single-phase and three-phase electric transformers. For the characterization a Matlab's graphical user interface is used, which uses a National Instruments (DAQ) acquisition system, complemented by a set of voltage and current sensors manufactured by FLUKE. The magnitudes of current and voltage are used by the theoretical foundations of the transformer with the help of numerical methods to determine the electrical parameters of the ferromagnetic material.

Keywords: Ferromagnetic, hysteresis, induction, transformer.

¹Ingeniero Universidad de Pamplona, Programa de Ingeniería Eléctrica. Ciudadela Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia. E-mail: juanlealperez777@gmail.com

²Maestría. Universidad de Pamplona, Programa de Ingeniería Eléctrica. Ciudadela Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia. E-mail: davidpabon@hotmail.es

³Maestría. Universidad de Pamplona, Programa de Ingeniería Eléctrica. Ciudadela Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia. E-mail: jdiazcu@unipamplona.edu.co

⁴Maestría. Universidad de Pamplona, Programa de Ingeniería Eléctrica. Ciudadela Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia. E-mail: edison.caicedo@unipamplona.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento de un circuito magnético es determinado por el carácter sinusoidal de las líneas de inducción magnética ($\text{div } B=0$) y por el hecho de que en los materiales ferromagnéticos la permeabilidad es elevada ($\mu_r \gg \mu_0$). Las propiedades magnéticas macroscópicas de un material lineal, homogéneo e isotrópico se definen en función del valor de la susceptibilidad magnética X_m cociente adimensional que expresa la proporcionalidad entre la magnetización M y la intensidad del campo magnético H (Mora 2005).

El material ferromagnético generalmente se halla en un estado desmagnetizado. Esto es debido a que el interior del bloque se divide en los denominados dominios, cada uno de los cuales está espontáneamente magnetizado en una dirección arbitraria, con lo que la contribución de todos los dominios resulta en una magnetización nula. En ausencia de campo aplicado, los dominios se encuentran al azar. Cuando se aplica un campo exterior, los dominios tienden a alinearse con el campo. Este alineamiento puede permanecer muy fuerte el acoplamiento cuando se retira el campo, creando un imán permanente (fig. 1).

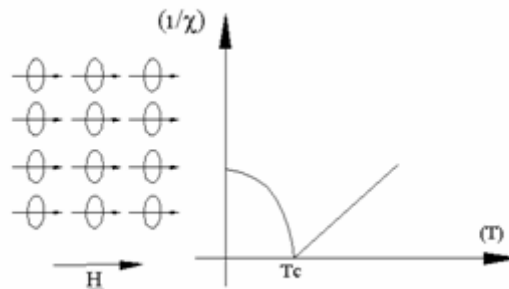


Fig. 1. Material ferromagnético

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES FERROMAGNÉTICOS

Las características esenciales del ferromagnetismo son una susceptibilidad magnética positiva y grande y la permeabilidad relativa es entonces mucho mayor, adicionalmente los materiales ferromagnéticos se magnetizan fuertemente en el mismo sentido que el campo magnético aplicado. Resulta así que aparece una fuerza de atracción sobre el cuerpo respecto del campo aplicado (Del Hoyo 2005).

La magnetización resultante en un espécimen ferromagnético sometido a un campo exterior H . El campo aplicado comienza desde un valor cero hasta un valor H_m tal que lleva al espécimen a la saturación técnica. Los mecanismos que se producen en el proceso de magnetización se pueden agrupar en varias zonas o rangos tal y como se muestra en la figura 2.

- Estado desmagnetizado.
- Rango de permeabilidad inicial.
- Rango de magnetización irreversible.
- Rango de magnetización por rotación coherente.
- Rango de saturación técnica o de aproximación a la saturación

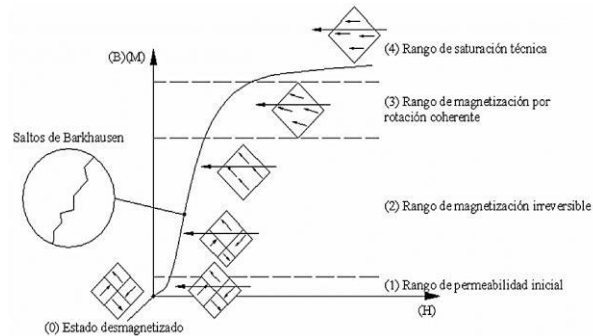


Fig. 2. Curva de magnetización

Estado desmagnetizado: en tal estado los dominios presentan una orientación aleatoria y por tanto una magnetización resultante nula.

Rango de permeabilidad inicial: la magnetización en cada uno de los dominios rota reversiblemente desde sus posiciones estables en los ejes cristalográficos favorables hacia la dirección del campo.

Rango de magnetización irreversible: Si se incrementa el campo aplicado H por encima a los valores de campo correspondientes al rango de permeabilidad inicial, la magnetización experimentará un aumento drástico siguiendo un proceso irreversible. La magnetización aumenta por desplazamientos irreversibles de las paredes de una posición estable a otra. En este rango se producen los saltos de Barkhausen; estos son pequeños cambios discontinuos en la magnetización, inducidos por el desplazamiento irreversible de las paredes y por la rotación irreversible de la magnetización local de los dominios.

Rango de magnetización por rotación coherente: Si el campo aplicado sigue aumentando de valor, la curva de magnetización se vuelve menos empinada y el proceso se torna reversible una vez más. El desplazamiento de los dominios ya se ha completado y la magnetización se produce por rotación coherente. Los dominios que estaban orientados en los ejes cristalográficos favorables más cercanos a la dirección del campo han ocupado todo el espécimen y ahora rotan a la dirección del campo a medida que éste aumenta. Rango de saturación técnica: En esta zona la magnetización se aproxima gradualmente a la saturación. En la saturación técnica la magnetización se incrementa

gradualmente en proporción al campo magnético. Este efecto se produce por el perfecto alineamiento de los espines con el campo. No obstante, el alineamiento de los espines se ve afectado por la agitación térmica, generalmente este efecto es muy pequeño incluso bajo campos considerablemente altos (Del Hoyo, 2005).

2. CICLO DE HISTÉRESIS

La palabra histéresis viene del griego υστέρησις, que significa retraso, quedar atrás. En general, se usa el término para designar procesos en los que la evolución del sistema depende de la preparación anterior, y de una reacción algo así como tardía a la acción (Alarcón-Soria & Serrano, 2004).

Si se observa en la figura 3.a y en la figura 3.b se muestra la curva $B=f(H)$ que se obtiene al aplicar excitaciones magnéticas H de diferente magnitud y signo (Mora 2005).

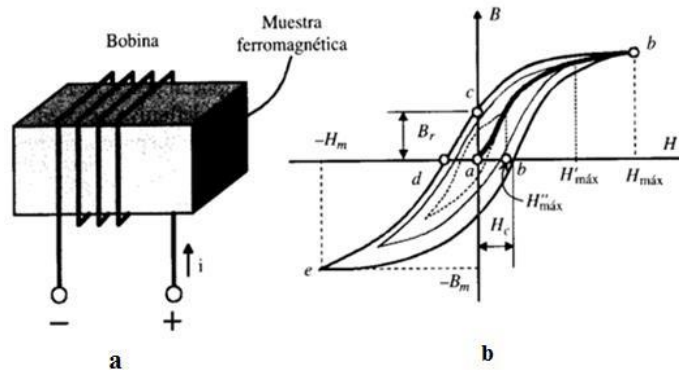


Fig. 3. Material ferromagnético

Cuando se reducen los campos magnéticos asociados con núcleos ferromagnéticos, parte de la energía almacenada se pierde irremediamente en el núcleo en forma de calor (Castro-Galeano et al., 2014). Esta pérdida de energía es debida a dos causas: pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault expresada en la ecuación 1.

$$\frac{PF}{vol} = \pi^2 f^2 B m^2 a^2 \left(\frac{\sigma}{6}\right) = K F f^2 B m^2 a^2 \sigma \quad (1)$$

Donde se ha llamado KF es $\pi^2/6$ y se ha tenido en cuenta que el volumen es: $vol=abL=ab$, al haber considerado una profundidad unidad (Mora 2005).

También se tienen pérdidas de energía en núcleos sujetos a imanaciones y desimanaciones cíclicas por medio de excitaciones periódicas expresadas en la ecuación 2:

$$PH = KHf(vol)Bm^\alpha \quad (2)$$

Los valores de kH (denominado coeficiente de Steinmetz) y α (denominado exponente de Steinmetz) dependen de la naturaleza del núcleo ferromagnético.

3. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR

Las pérdidas que ocurren en los transformadores reales deben tenerse en cuenta en cualquier modelo aproximado del transformador (López-Guayasamín et al., 2016). Los principales criterios a tener en cuenta para la construcción de tal modelo son:

Pérdidas en el cobre: ($I^2 R$). Son pérdidas por calentamiento resistivo en los devanados primario y secundario del transformador.

Pérdidas por corrientes parásitas: pérdidas por calentamiento resistivo en el núcleo del transformador. Son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado al transformador (Alvarez, 2009).

Flujo disperso: los flujos primario y secundario que escapan del núcleo y pasan únicamente a través de uno de los devanados del transformador son flujos dispersos (Chapman, 2007).

Para la obtención del circuito equivalente del transformador referido a su nivel de voltaje primario es determinar experimentalmente los valores de las resistencias e inductancias del modelo del transformador. Una aproximación adecuada para estos valores se puede lograr con solo tres pruebas: la prueba de circuito abierto, la prueba de dc y la prueba de cortocircuito (Chapman, 2007).

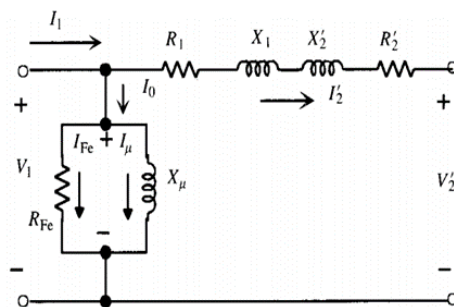


Fig. 4. Circuito equivalente aproximado de un transformador reducido al primario (Chapman, 2007).

Los ensayos de un transformador representan las diversas pruebas que deben prepararse para verificar el comportamiento de la máquina. En la práctica resulta difícil la realización de ensayos reales directos por dos motivos esenciales. Primero la gran cantidad de energía que ha de disiparse en tales pruebas, segundo es prácticamente imposible disponer de cargas lo suficientemente elevadas para hacer un ensayo en situaciones reales (Núñez et al., 2012; Mora-Mendoza et al., 2014). En la práctica para la determinación de los parámetros del circuito

equivalente de un transformador son: ensayo sin carga y ensayo de cortocircuito (Álvarez, 2009).

4. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS

Los pasos que se tuvieron en cuenta para la obtención del ciclo de histéresis a partir de la selección del transformador de trabajo son los descritos a continuación:

Prueba DC.

Dimensiones del núcleo. Resistencia de una espira. Numero de vueltas.

Prueba de vacío al 10%, 50% y 100% del voltaje nominal.

Obtención del ciclo de histéresis Pérdidas presentes del material. Conductividad del material

Prueba DC:

En la prueba dc se obtendrán las muestras adquiridas de voltaje y corriente del transformador, en el que se sacará un promedio para así poder obtener la magnitud de estas variables eléctricas y aplicando la ecuación de ohm podremos obtener el valor de la resistencia en DC, como se presenta en la ecuación 3.

$$R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} [\Omega] \quad (3)$$

Dimensiones del núcleo:

Las dimensiones del transformador están dadas a partir del tipo de núcleo al que se le realizarán las pruebas. Los núcleos con los que se trabajará en este proyecto son los acorazados y los de columna, estableciendo sus parámetros como ancho, profundidad, área, y longitud media magnética de acuerdo a cada tipo (Vega-Soto, 2010).

La longitud media se obtendrá a través del siguiente análisis transformador monofásico:

$$R_l = \frac{2 \cdot L_l}{A \cdot \mu}$$

$$R_{paralela} = \frac{1}{2} * 2 \frac{L_l}{A \cdot \mu} = \frac{L_l}{A \cdot \mu}$$

$$R_{central} = \frac{L_c}{A \cdot \mu}$$

$$R_{total} = \frac{1}{\mu \cdot A} (L_c + L_l)$$

Dónde: $F=R*\phi$

$$F = \left[\frac{1}{\mu * A} (Lc + Ll) \right] * \phi \quad (4)$$

La longitud media magnética es:

$$L_{media} = L_{central} + L_{lateral} \quad [cm] \quad (5)$$

Núcleo tipo columna

$$AREA = Ancho \times Profundidad \quad [cm]$$

Ecuación 8

La longitud media se obtendrá a través del siguiente análisis transformador trifásico. La reluctancia paralela de las dos columnas es:

$$R_{paralela} = \frac{1}{\frac{\mu * A}{Lc} + \frac{\mu * A}{Ll}} = \frac{1}{\frac{(Lc+Ll) * \mu * A}{Lc * Ll}} = \frac{Lc * Ll}{(Lc+Ll) * \mu * A}$$

$$R_{Total} = \frac{Ll}{\mu * A} + \frac{Lc * Ll}{(Lc + Ll) * \mu * A}$$

$$R_{Total} = \frac{1}{\mu * A} \left[Ll + \frac{Lc * Ll}{(Lc + Ll)} \right]$$

$$R_{Total} = \frac{1}{\mu * A} \left[\frac{LlLc * LlLc + Ll^2}{(Lc + Ll)} \right]$$

$$R_{Total} = \frac{1}{\mu * A} \left[\frac{Ll^2 + 2Ll * Lc}{Lc + Ll} \right] \quad (6)$$

$$F = \frac{1}{\mu * A} \left[\frac{Ll^2 + 2Ll * Lc}{Lc + Ll} \right] * \phi \quad (7)$$

La longitud media magnética es:

$$L_{media} = \frac{Ll^2 + 2Ll * Lc}{Lc + Ll} \quad [cm] \quad (8)$$

Resistencia de una espira:

Para hallar la resistencia de una espira partimos sabiendo la longitud del conductor teniendo en cuenta los siguientes parámetros como es su ancho y profundo del transformador, y así poder aplicar la siguiente ecuación:

$$L = ((2 * ancho) + (2 * profundidad)) * 1.25 \quad (9)$$

La resistividad del cobre es un parámetro que conocemos que tiene un valor de: $1.71 * 10^{-8}$ [Ωm]

Número de vueltas:

El número de vueltas del transformador se halla

teniendo el valor de la resistencia total obtenida a partir de la prueba de DC, y el valor de la resistencia de una espira, la expresión utilizada para poder obtener el número de vueltas del devanado se muestra en la siguiente expresión:

$$\text{Numero de vueltas} = \frac{\text{Resistencia total}}{\text{resistencia una espira}} \quad (10)$$

El número de vueltas se puede hallar tanto para el devanado primario como para el secundario de la manera descrita anteriormente. Lo único que podría variar es el conductor para el cálculo de una espira y la prueba de DC presente en el lado en que se desee realizar la prueba.

Ensayo sin carga:

La realización de los ensayos de la prueba sin carga se realizará en tres etapas al 10%, 50% y 100% de la tensión nominal. Para cada uno de los ensayos se adquirirán los siguientes parámetros voltaje y corriente donde la onda será vista de manera de datos discretos. Después de pasar la señal del tiempo discreto, se continúa la realización de los pasos pertinentes para obtener el nivel de inducción máximo para cada variación de tensión, siendo necesario para obtener el valor de las pérdidas presentes en el núcleo del transformador.

Obtención del ciclo de histéresis:

Primero se adquirirán los datos de tensión y corriente de una manera discreta, luego se les realizará un análisis numérico a estos datos obteniendo así el área bajo la curva pudiendo trabajar de una manera continua.

El valor de la inducción del campo magnético ya obtenido, a partir del análisis mostrado anteriormente, teniendo en cuenta la variación del flujo magnético a través del valor de tensión, se podrá obtener el valor de intensidad de campo magnético, se realizará el siguiente análisis:

Se obtendrá el valor de corriente a través del tiempo

Se tendrá el valor de la longitud media magnética.

Teniendo presente estos dos criterios, se calcula el valor de la intensidad de campo magnético (H) [AV/m]

$$F.m.m = A * V_{(11)}$$

Al graficar el flujo magnético vs fuerza magnetomotriz podremos obtener el ciclo de histéresis, como se muestra en la siguiente figura

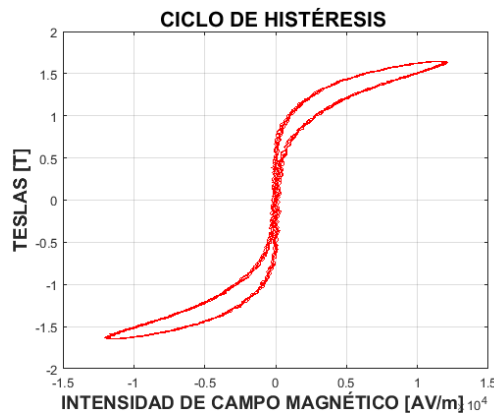


Fig. 5. Ciclo de hstéresis obtenido de un transformador ferorresonante

Pérdidas presentes en el material:

La metodología para la obtención de estas pérdidas se llevará a cabo teniendo en cuenta las pruebas de vacío realizadas al 10%, 50% y a la tensión nominal, obteniendo así el nivel máximo de inducción magnética para cada caso, como la frecuencia a la que se realizó la prueba. Planteando las siguientes ecuaciones:

$$Ph1 + Pf1 = P_{vacio} \text{ al } 10\% Vn$$

$$Ph2 + Pf2 = P_{vacio} \text{ al } 50\% Vn$$

$$Ph3 + Pf3 = P_{vacio} \text{ a } Vn$$

$$Ph1 = MfB_{max}1^{\alpha}$$

$$Ph2 = MfB_{max}2^{\alpha}$$

$$Ph3 = MfB_{max}3^{\alpha}$$

$$Pf1 = Nf^2B_{max}1^2$$

$$Pf2 = Nf^2B_{max}2^2$$

$$Pf3 = Nf^2B_{max}3^2$$

Tenemos así un sistema de ecuaciones no lineales donde:

B_{max1}: Inducción máxima obtenida en la prueba de vacío al 10% de la tensión nominal.

B_{max2}: Inducción máxima obtenida en la prueba de vacío al 50% de la tensión nominal

B_{max3}: Inducción máxima obtenida en la prueba de vacío a la tensión nominal.

F: Frecuencia con la que se desarrollaron las pruebas.

α: Exponente de Steinmetz

M: Representa parámetros constantes en este caso es (KHVol), KH varia con respecto al material, Vol es el volumen del material ferromagnético.

N: Representa parámetros constantes (KF²σ), KF es igual a π²/6, a es el ancho de la lámina y σ es la conductividad del material.

Al tener el sistema de ecuaciones observamos que es un sistema no lineal; por ello se utilizará el método de Newton Raphson que es un método para resolver ecuaciones algebraicas no lineales. Creando un algoritmo para encontrar aproximaciones de los ceros o raíces de una función real. También puede ser usado para encontrar el máximo o mínimo de una función, encontrando los ceros de su primera derivada (Cornejo-Zúñiga & Rebolledo-Vega, 2016).

Conductividad del material:

Para poder obtener el valor de la conductividad del material ferromagnético es necesario recurrir a las pérdidas de Foucault presentes en el material a caracterizar, y al despejar el valor de conductividad de la ecuación obtenemos la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{Pf}{KfB_{max}^2 f^2 a^2 Vd} [S/m] \quad (21)$$

Donde:

P_f = Pérdidas de Foucault a tensión nominal.

$K_f = \pi^2/6$.

B_{max} = Valor máximo de inducción magnética a tensión nominal.

f = Frecuencia en la que se realizó la prueba.

a = Ancho de la lámina que conforma el núcleo del transformador.

V_d = Volumen del núcleo del transformador (Hayt y Durbin 2007).

Para la obtención de los modelos circuitales del transformador, como son:

Circuito equivalente del transformador exacto. Circuito equivalente del transformador aproximado.

Circuito equivalente del transformador aproximado.

Circuito corriente de falta.

Se llevarán a cabo las pruebas de DC, como la de vacío descritas anteriormente, como también la prueba de cortocircuito en las que se obtienen cada uno de los parámetros que conforman el circuito como son:

Parámetros prueba de vacío:

Esta prueba consiste en alimentar el primario del transformador, con la tensión nominal y dejando el secundario a circuito abierto. En esta situación el flujo magnético en el núcleo es el nominal y por lo tanto las pérdidas en el mismo son las nominales.

Además, al circular la corriente por el primario, en el mismo vamos a tener pérdidas en el cobre, aunque estas se pueden despreciar frente a las del hierro, debido a que la corriente de vacío es del orden del 5% de la corriente nominal (o de plena carga), y como las pérdidas en el cobre son proporcionales al cuadrado de la corriente, en este caso, siendo la corriente 20 veces más chica, las pérdidas en el cobre serán de 400 veces menores que las nominales.

Luego se adquieren los datos de manera discreta a una frecuencia de 24KS/s por canal con los equipos pertinentes (Altamirano-Santillán et al., 2017; Ramírez-Hurtado et al., 2016).

Se multiplicará el vector de tensión y el vector de corriente obteniendo así el vector de potencia, luego se procede a sacar el valor promedio y así obtenemos la magnitud de la potencia de vacío, que tendrá inmersa las pérdidas tanto de histéresis como de Foucault presentes en el núcleo del transformador. Luego se hallará el valor del factor de potencia de la siguiente manera:

$$Fp = \frac{P_{vacio}}{V_{rms} * I_{rms}} \quad (22)$$

Teniendo el factor de potencia se hallan las corrientes que atraviesan la resistencia de magnetización como la inductancia de magnetización presentes en el núcleo del transformador. Las ecuaciones son las mostradas a continuación.

$$IFE = I_o \cos \phi_o \quad ; \quad I_{\mu} = I_o \sin \phi_o \quad (23)$$

Obteniendo ya las corrientes que atraviesan los elementos presentes en el núcleo partimos hallar el valor de la resistencia de magnetización como la inductancia de magnetización de la siguiente manera:

$$RFE = \frac{V_1}{IFE} \quad ; \quad X_{\mu} = \frac{V_1}{I_{\mu}} \quad (24)$$

Parámetros prueba de cortocircuito:

Esta prueba consiste en cortocircuitar el secundario del transformador y alimentar el primario mediante una tensión reducida, cuyo valor es tal que la corriente que circule sea la nominal del transformador.

Luego se adquieren los datos de manera discreta a una frecuencia de 24KS/s por canal con los equipos pertinentes.

Se multiplicará el vector de tensión y el vector de corriente obteniendo así el vector de potencia, luego se procede a sacar el valor promedio y así obtenemos la magnitud de la potencia de cortocircuito.

Luego se hallará el valor del factor de potencia de la siguiente manera:

$$Fp = \frac{P_{cortocircuito}}{V_{cortocircuito} * I_{nominal}} \quad (25)$$

De donde obtenemos las siguientes expresiones:

$$R_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \cos \phi_{cc} \quad (26)$$

$$X_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \text{sen}\phi_{cc} \quad (27)$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} = \frac{V_{1corto}}{I_{1corto}} \quad (28)$$

$$P_{CC} = R_{cc} * I_{1n}^2 \quad (29)$$

De donde se deduce:

$$V_{1cc} = V_{1corto} \frac{I_{1n}}{I_{1corto}} \quad (30)$$

El ensayo de cortocircuito debe distinguirse de la falta o fallo de cortocircuito, que puede suceder en un transformador alimentado por su tensión asignada primaria cuando por accidente se unen entre si los bornes del devanado secundario. Al estar conectado el transformador a una tensión V_{1n} aparece una corriente de circulación denominada I_{1FALTA} o I_{2FALTA} en el secundario, muy peligrosa para la vida de la máquina debido a los fuertes efectos térmicos y electrodinámicos que produce. Desde el punto de vista de circuito equivalente, el valor de I_{1falta} que vendrá expresado de la siguiente forma:

$$I_{1falta} = \frac{V_{1n}}{Z_{cc}} \quad (31)$$

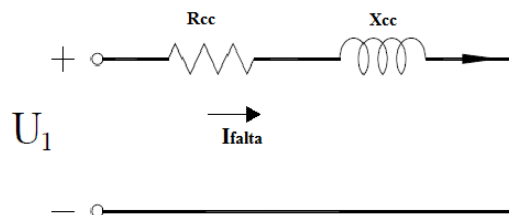


Fig. 7. Circuito corriente de falla (Tudela et al., 2010)

5. SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE DE ADQUISICIÓN

Los sensores con los que se llevará a cabo la realización de este trabajo, son los siguientes:

- Sonda Fluke 80i-110s.
- Sonda Fluke DP120
- Tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6009

El USB-6009 brinda funcionalidad DAQ básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Es accesible para uso de estudiantes y lo suficientemente poderoso para aplicaciones de medida más sofisticadas.

Hardware a implementar

El proyecto del diseño e implementación de una plataforma para la caracterización de materiales ferromagnéticos y transformadores, se desarrolló con el hardware mostrado en la siguiente figura. El ensayo de cortocircuito debe distinguirse de la falta o fallo de cortocircuito que puede suceder en un transformador alimentado por su tensión asignada primaria cuando por accidente se unen entre sí los bornes del devanado secundario. Al estar conectado el transformador a una tensión V_1n aparece una corriente de circulación denominada I_1FALTA o I_2FALTA en el secundario, muy peligrosa para la vida de la máquina debido a los fuertes efectos térmicos y electrodinámicos que produce. Desde el punto de vista de circuito equivalente, el valor de I_1falta que vendrá expresado de la siguiente forma:



Fig. 8. Tarjeta de adquisición de datos.

Acondicionamiento

El escalamiento que se llevará a cabo para una mejor visualización de los datos adquiridos por las dos sondas de trabajo, se realizará de acuerdo a los parámetros propios de adquisición de cada equipo:

Sonda Fluke 80i-110s rango de 10 A: 100 mV/A; rango de 100 A: 10 mV/A. el escalamiento que se realizara para las pruebas del transformador (DC, vacío y cortocircuito). Se adquirirán a una relación de 100 mV/A, el valor que se aplicará para realizar su escalamiento para una visualización real de la corriente que está transitando por el transformador y que se visualizará en la plataforma será de:

$$I = \frac{1}{100 \frac{mV}{A}} * V_{sens} \quad (32)$$

Sonda Fluke DP120 El rango de la sonda diferencial tiene una atenuación de: 200x y 20x el escalamiento que se realizará para las pruebas del transformador (DC, vacío y cortocircuito). La forma de realizar este escalamiento será de acuerdo al nivel de tensión y a la visualización de la señal, para la prueba de DC se realizará un escalamiento de 200x; para las pruebas de vacío se utilizara a una escala de 200x y para la realización de la caracterización del material ferromagnético a la hora de adquirir los datos a una tensión del 10% de la tensión nominal se realizara una atenuación de la onda de 20x, y para el 50% y 100% de la tensión nominal se realizará a una atenuación de 200x. la expresión requerida para obtener la visualización de las muestras que se están adquiriendo, se dan a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{20mV} * Vsens \quad (33)$$

VIII Algoritmo de caracterización

Teniendo presente las diferentes pruebas realizadas a transformadores, se desarrollará una interfaz gráfica en una herramienta del software de Matlab llamada GUIDE (Graphical Use Interface Development Environment). Esta herramienta ésta pensada para desarrollar GUI's (Graphical User Interfaces) fácil y rápidamente haciendo sencillo el diseño y presentación de los controles de la interfaz, reduciendo la labor en el momento de seleccionar, deshacer, arrastrar y centrar controles, así como la personalización de las propiedades de estos (Pabón-Fernández et al., 2016; Avila et al., 2012). El proceso a seguir para el desarrollo de un programa mediante GUIDE es que una vez se tienen los controles en posición, se editan las funciones de llamada (Callback) de cada uno de ellos, escribiendo el código de Matlab que se ejecutara cuando el control sea utilizado.

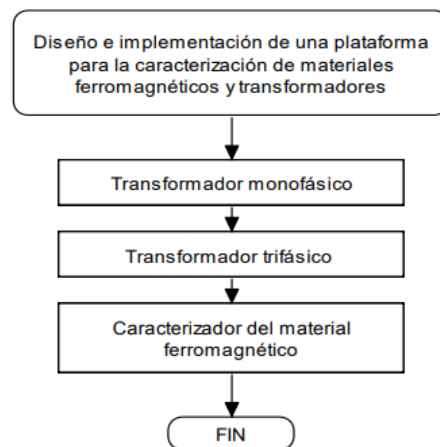


Fig. 9. Diagrama de flujo para la plataforma principal

En este diagrama de flujo se muestran las ramas que conforman la plataforma para caracterizar el material ferromagnético, como la obtención de los modelos circuitales propios del transformador

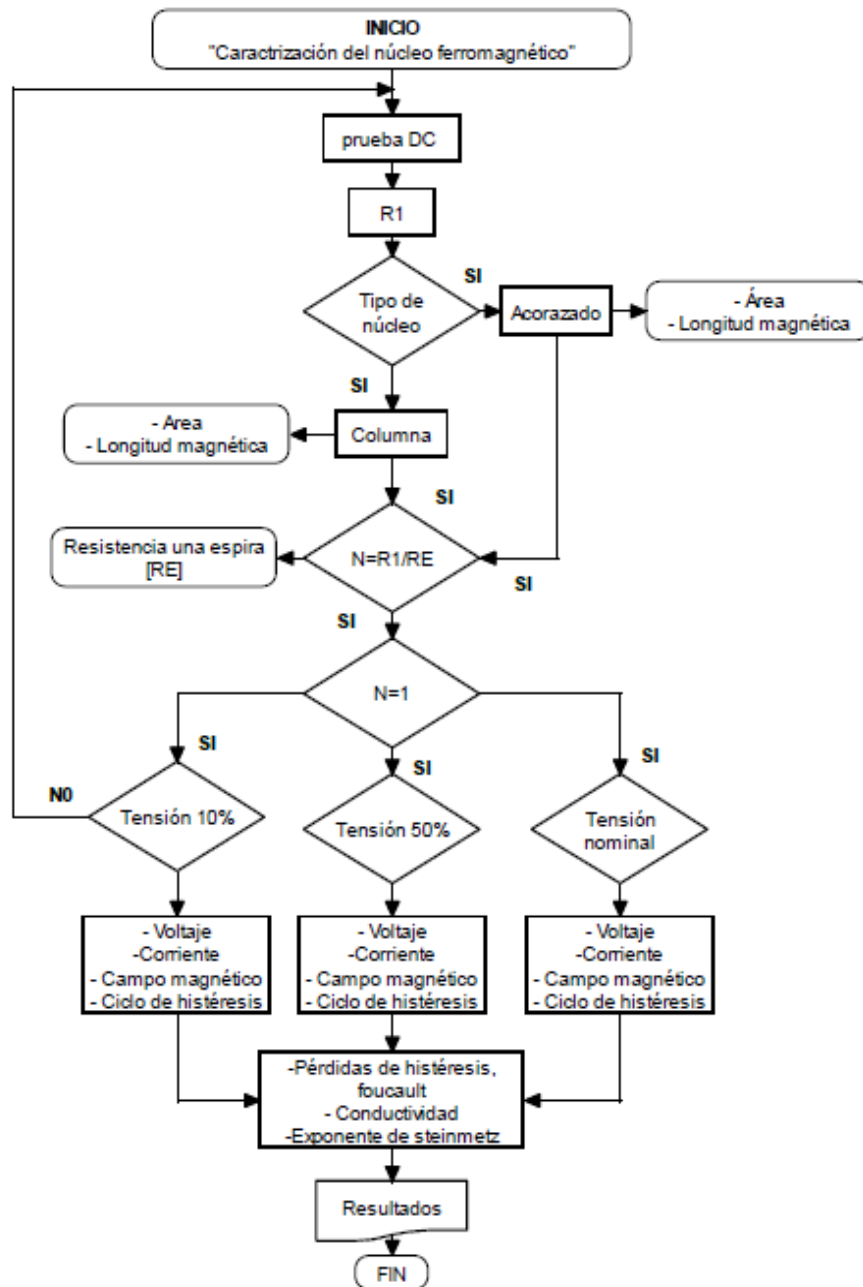


Fig. 10. Diagrama de flujo caracterización del material ferromagnético.

Las adquisiciones de la señal se tomaron a 0.1 s obteniendo una cantidad de muestras de 800 para dos ciclos: se observa la onda de tensión, la de corriente, y el ciclo de histéresis.

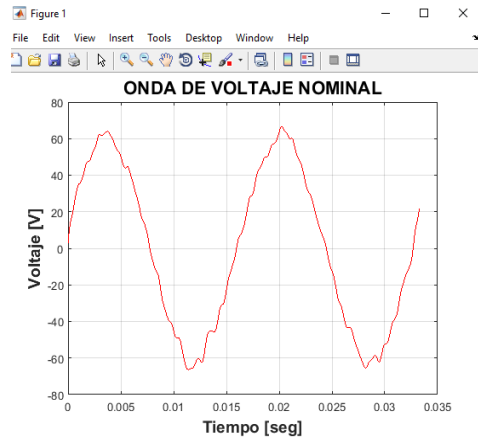


Fig. 11. Onda de tensión prueba de vacío caracterización de material ferromagnético.

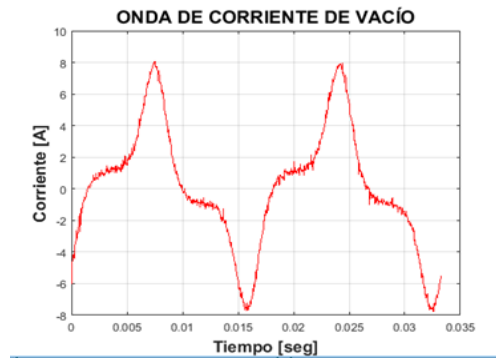


Fig. 12. Onda de corriente prueba de vacío caracterización de material ferromagnético.

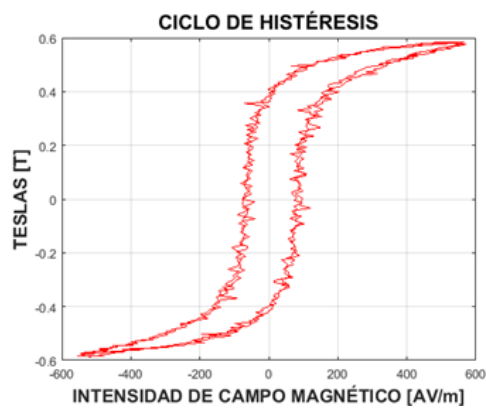


Fig. 13. Ciclo de histéresis.

6. Conclusiones

Se obtuvo el ciclo de histéresis propio del transformador con la interfaz, utilizando como datos las características intrínsecas de un transformador (tipo de núcleo, área y longitud magnética); así como las respectivas pruebas de DC, vacío y cortocircuito. Se logró la obtención de los modelos circuitales del transformador, haciendo uso de la interfaz, a partir de las pruebas de DC, vacío y cortocircuito teniendo en cuenta el devanado (primario/secundario) en que se realizaron las mediciones.

El diseño de la interfaz permite obtener el valor máximo de inducción (teslas), el cual es utilizado para el diseño de transformadores, permitiendo así la optimización de estos según el campo de aplicación donde sean requeridos. En la caracterización del material presente en el núcleo del transformador, se consigue el valor de las pérdidas de histéresis, así como las pérdidas de Foucault presentes en el núcleo del transformador. También se obtiene el valor de conductividad del material y el exponente de Steinmetz.

Referencias

Alarcón-Soriano, J. M., & Serrano, M. A. (2004). Ciclo de histéresis. Murcia, España: Universidad de Murcia.

Altamirano-Santillán, E., Vallejo-Vallejo, G., & Cruz-Hurtado, J. (2017). Monitoreo volcánico usando plataformas Arduino y Simulink. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 7(2), 317-329. doi: <https://doi.org/10.19053/20278306.v7.n2.2017.6073>

Álvarez, P. M. (2009) Cálculo fácil de transformadores y autotransformadores monofásicos y trifásicos de baja tensión. México: Alfaomega.

Ávila, A. A., Flórez-Serrano, E., & Gualdrón-Guerrero, O. (2012). Diseño e implementación de un curso interactivo multimedia para el aprendizaje de los procesos CAM en un centro de mecanizado leadwell v30. *REVISTA COLOMBIANA de Tecnologías de Avanzada*, 2 (20). Recuperado de: http://ojs.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RCTA/article/view/188

Castro-Galeano, J. C., Pinto-Salamanca, M. L., & Amaya-Quitián, M. F. (2014). Diseño y construcción de una Bobina Tesla de 1680 W, para la enseñanza de conceptos básicos en sistemas eléctricos de potencia. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 5(1), 66–74. doi: <https://doi.org/10.19053/20278306.3142>

Chapman, S. J. (2007) Máquinas eléctricas, McGraw Hill.

Cornejo-Zúñiga, Ó., & Rebolledo-Vega, R. (2016). Estimación de parámetros en modelos no lineales: algoritmos y aplicaciones. *Revista EIA*, 13(25), 81-98. doi: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2016.13.25.81-98>

Del Hoyo, A. (2005). Modelización de la histéresis magnética y su aplicación al cálculo numérico en máquinas eléctricas, Universidad politécnica de Cataluña, Barcelona-Soria.

Tudela, Ó., Aponte, R. G., Muñoz, F. A., & Cárdenas, A. (2010). Fenómeno de la Remanencia en Transformadores, . Energía y Computación, 18, 1-8.

López-Guayasamin, M. R., Castrillón, O. D. & Cano, E. (2016). Análisis de eventos sobre transformadores de distribución en una empresa del sector eléctrico en Colombia. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 1(27), 112-117.

Mora, J. (2005). Máquinas Eléctricas, McGraw Hill.

Mora-Mendoza, E. Y. , Sarmiento-Santos, A., & Casallas-Caicedo, F. M. (2014). Implementación de un sistema de tratamiento con plasma para gases utilizando una celda de descarga de barrera dieléctrica. Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación, 5(1), 56–65. doi: <https://doi.org/10.19053/20278306.3141>

Núñez, P., Hincapié, R., & Gallego-Rendón, R. (2012). Metodología para reubicación de transformadores de distribución considerando el sistema de protección. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 2 (20). Recuperado de: http://ojs.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RCTA/article/viewFile/185/184

Pabón-Fernández, L., Díaz-Rodríguez, J., & Pardo-García, A. (2016). Simulación del inversor multinivel de fuente común como variador de frecuencia para motores de inducción. Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación, 7(1), 165-180. doi: <https://doi.org/10.19053/20278306.v7.n1.2016.5636>

Ramírez-Hurtado, A. L., Gil-Monsalve, J., Medina-Barreto, M. H., & Cruz-Muñoz, B. (2016). Implementación en entorno Labview de un sistema multifuncional de medidas magnetoópticas y magnetoeléctricas para caracterización de materiales. BISTUA Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, 14 (2), 116-125. doi: <https://doi.org/10.24054/01204211.v2.n2.2016.2188>

Vega-Soto, A. (2010) Transformadores trifásicos. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.