

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE  
MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES  
AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y  
TELECOMUNICACIONES PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN  
DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ  
DIRECTOR: MSc: LUIS DAVID PABÓN FERNÁNDEZ  
DIRECTOR DEL PROGRAMA: MSc. YESID SANTAFÉ RAMÓN

PAMPLONA (N.S.)- COLOMBIA  
JUNIO 2017

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE  
MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y  
TELECOMUNICACIONES

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

TITULO

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN  
DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS TRANSFORMADORES

FECHA DE INICIO DEL TRABAJO: MARZO 06 DEL 2017  
FECHA DE TERMINACIÓN DEL TRABAJO: JUNIO 15 DEL 2017

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

---

PAMPLONA (N. S.) - COLOMBIA  
JUNIO 2017

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN  
DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS TRANSFORMADORES

NOMBRES Y FIRMAS DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTAR:

**AUTOR:** JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

---

**DIRECTOR:** MSC: LUIS DAVID PABÓN FERNÁNDEZ

---

**DIRECTOR DE PROGRAMA:** MSC. YESID SANTAFÉ RAMÓN

---

**JURADO CALIFICADOR**

**JURADO 1:** MSC: LUIS DAVID PABÓN FERNÁNDEZ

---

**JURADO 2:** MSC. JORGE LUIS DÍAZ RODRÍGUEZ

---

**JURADO 3:** ING. PHOL PATIÑO ROJAS

---

## TABLA DE CONTENIDO

<b>I. GENERALIDADES DEL PROYECTO</b>	<b>7</b>
I.1 Introducción	7
I.2 Resumen	7
I.3 Objetivos	7
I.4 Acotaciones	8
<b>II. MARCO TEÓRICO</b>	<b>9</b>
II.1 Materiales magnéticos	9
II.2 Curva de magnetización	12
II.3 Ciclo de histéresis	14
II.4 Efectos dependientes del tiempo	17
II.5 Pérdidas de energía en los núcleos ferromagnéticos	18
II.6 Transformadores	22
II.7 Ensayos del transformador	26
II.8 Transformador trifásico.	31
<b>III. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL FERROMAGNÉTICO Y EL CIRCUITO EQUIVALENTE EN TRANSFORMADORES</b>	<b>37</b>
III.1 Metodología para la obtención de las características del material ferromagnético.	37
III.2 características del transformador monofásico	49
III.3 Características transformador trifásico	54
<b>IV. SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE DE ADQUISICIÓN</b>	<b>65</b>
IV.1 Selección de la sensórica	65

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE  
MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES  
AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

IV.2 Adquisición de datos	70
IV.3 Acondicionamiento	76
<b>V. ALGORITMOS DE CARACTERIZACIÓN</b>	<b>78</b>
V.1 Entorno de trabajo en Matlab	78
V.2 Interfaz grafica	79
<b>VI. RESULTADOS</b>	<b>106</b>
VI.1 Caracterización del material ferromagnético	106
VI.2 Pruebas transformador monofásico	116
VI.3 Transformador trifásico	130
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>131</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>133</b>

## DEDICATORIA

*En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, quienes han estado siempre apoyándome incondicionalmente, preocupándose por mi bienestar, son mi mayor motivación para seguir esforzándome; a mi padre Rubén Darío Leal que con su carácter me ha enseñado la importancia de la dedicación, el esfuerzo, la creatividad y la honestidad, a mi madre Isbelia Pérez ejemplo de amor sacrificio y esperanza. A mi hermano Pedro David más que eso es mi compañero en las duras batallas, modelo de pasión por el conocimiento.*

*Deseo expresar mi gratitud al docente Luis David Pabón quien acepto dirigirme durante la realización de este trabajo de grado, dispuesto a explicar y enseñar de la manera más clara y sencilla conceptos de gran complejidad, gracias por su tiempo dedicación y por ser más que mi tutor, un buen amigo.*

*Agradezco a la universidad de pamplona por permitirme realizar mis estudios de pregrado, a todos los profesores a quienes tuve el gusto de conocer dado que, con su ejemplo, su dedicación sus exigencias y su amor a la enseñanza, contribuyeron a formarme como un profesional y como persona, para que así pueda contribuir con el mejoramiento de esta sociedad.*

*Finalmente quiero agradecer a todas las personas que fueron apareciendo a lo largo de mi camino como variables, constantes, operadores, resultados en la ecuación de mi vida permitiéndome ser quien soy como persona.*

*Como dice Albert Einstein. "Somos arquitectos de nuestro propio destino".*

## I. GENERALIDADES DEL PROYECTO

### I.1 Introducción

En la actualidad el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad de Pamplona no cuenta con una plataforma para llevar a cabo la caracterización de los materiales ferromagnéticos presentes en el núcleo del transformador, donde se parte de la evaluación del comportamiento del ciclo de histéresis presente en dichos materiales. Lo que conlleva a que los estudiantes a la hora de elaborar un transformador utilicen valores teóricos dados por las empresas, los cuales difieren de los presentados realmente en el transformador, ya que este se ve afectado por el desgaste debido a su continuo uso, originando pérdidas en el aislamiento, impurezas en el material, disminución de la eficiencia, etc.; implicando que se tenga un margen de error considerable en la elaboración del transformador y uso de este.

### I.2 Resumen

El presente proyecto busca desarrollar una plataforma para la obtención del ciclo de histéresis, nivel de inducción máximo, modelos circuitales y otras características de los materiales ferromagnéticos presentes en el núcleo de los transformadores, partiendo de la selección adecuada de los sensores de tensión y corriente, conectados a la tarjeta de adquisición, lo cual derivara en la obtención de unos datos numéricos correspondiente a los parámetros eléctricos propios de cada sensor; donde serán tratados en el software de Matlab, bajo un algoritmo sustentado en las bases teóricas pertinentes al estudio del transformador, todo esto bajo el objetivo de obtener el comportamiento del ciclo de histéresis y el circuito equivalente propio de los transformadores a ser caracterizados ya sean monofásicos o trifásicos.

### I.3 Objetivos

Diseñar e implementar una plataforma para la caracterización de materiales ferromagnéticos y transformadores.

- Objetivos específicos
  - Establecer la metodología para la obtención de las características del material ferromagnético y el circuito equivalente en transformadores.
  - Diseñar la sensórica para la plataforma.
  - Desarrollar los algoritmos correspondientes para la adquisición y caracterización de los materiales ferromagnéticos al igual que los requeridos para el modelo circuital de los transformadores.
  - Implementar la interfaz gráfica de usuario.
  - Implementar el hardware requerido para la plataforma.
  - Realizar pruebas de funcionamiento y guías de laboratorio.

#### **I.4 Acotaciones**

- Los sensores que se van utilizar son los que se disponen en el programa de ingeniería eléctrica de la Universidad de Pamplona.
- Las tarjetas de adquisición de datos serán las que se disponen en el programa de ingeniería eléctrica de la Universidad de Pamplona.
- La interfaz gráfica de usuario se desarrollará en la herramienta del software de Matlab llamada GUIDE (Graphical Use Interface Development Environment).
- Los transformadores y núcleos a utilizar en el proyecto son los disponibles en el programa de ingeniería eléctrica de la Universidad de Pamplona.



## II. MARCO TEÓRICO

### II.1 Materiales magnéticos

Cuando se trata de estudiar las maquinas eléctricas, electroimanes y otros dispositivos electromagnéticos, se plantea un problema similar de canalizar y concentrar altas densidades de flujo magnético, un circuito magnético está formado generalmente por una estructura de hierro, sobre la que se arrollan una o más bobinas por las que circulan corrientes, que dan lugar a los flujos que aparecen en el sistema.

El comportamiento de un circuito magnético viene determinado fundamentalmente por el carácter solenoidal de las líneas de inducción magnética ( $\text{div } \mathbf{B}=0$ ) y por el hecho de que en los materiales ferromagnéticos la permeabilidad es elevada y muy superior a la del vacío ( $\mu \gg \mu_0$ ). Estas condiciones corresponden, en el caso de circuitos eléctricos, a la consideración de que la densidad de corriente  $\mathbf{J}$  es solenoidal, es decir, la  $\text{div } \mathbf{J}=0$  (lo cual es siempre cierto, en todos aquellos puntos en donde no existan almacenamiento de carga), ya que la conductividad  $\alpha$  de un conductor es muy elevada frente a la de un aislador o dieléctrico.

Las propiedades magnéticas macroscópicas de un material lineal, homogéneo e isotrópico se definen en función del valor de la susceptibilidad magnética  $X_m$  que es un constante adimensional que expresa la proporcionalidad entre la magnetización o imanación  $\mathbf{M}$  y la intensidad del campo magnético  $\mathbf{H}$  de acuerdo con la ecuación:

$$\mathbf{M} = X_m \mathbf{H} \text{ [A/m]} \quad \text{Ecuación 1}$$

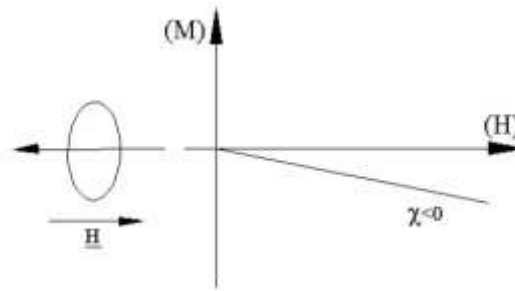
Donde quiera que la inducción magnética  $\mathbf{B}$  está relacionada con los campos  $\mathbf{H}$  y  $\mathbf{M}$  por:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \text{ [Teslas]} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $\mu$  representa la permeabilidad magnética del medio ( $\mu = \mu_0 \mu_r$ ) y  $\mu_r$  la permeabilidad relativa, que a su vez es igual a  $1 + X_m$ ;  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío y que en unidades del SI tiene un valor de  $4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$ . De acuerdo con el valor de  $\mu_r$ , los materiales se clasifican en: [1]

**Diamagnetismo:** [si  $\mu_r \approx 1$  ( $X_m$  es del orden de  $-10^{-5}$ )].

En un material diamagnético, el momento magnético neto debido a los movimientos orbitales de los electrones y a sus espines en cualquier átomo particular es cero en ausencia de campo magnético externo. El efecto macroscópico del proceso es equivalente a una imanación negativa que se puede describir por medio de una susceptibilidad negativa del orden de  $-10^{-5}$ . El bismuto, el cobre, plomo plata y el oro presentan estos efectos. El diamagnetismo se debe principalmente al momento orbital de los electrones dentro de un átomo y está presente en todos los materiales. En la mayoría de ellos el efecto es muy débil y es por lo que a veces este fenómeno queda enmascarado por otros más fuertes. Estos materiales no presentan magnetismo remanente, lo que significa que el momento magnético inducido desaparece cuando se anula el campo exterior aplicado.



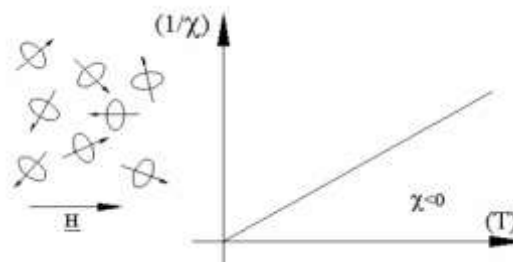
**Figura 1 Diamagnetismo [2].**

**Paramagnetismo:** si  $\mu_r \approx 1$  ( $X_m$  es del orden de  $10^{-3}$ ).

los momentos magnéticos debidos a los movimientos de los electrones, orbital y de espín, no se cancelan completamente y los átomos y moléculas tienen un momento magnético neto. Al aplicar un campo magnético externo, además de producirse un efecto diamagnético débil, el campo tiende a alinear los momentos magnéticos moleculares en el sentido del mismo, lo que provoca un aumento de la inducción. El efecto macroscópico es entonces equivalente a una imanación positiva, es decir, a una susceptibilidad magnética positiva. El proceso de alineamiento es considerablemente contrarrestado por las vibraciones térmicas aleatorias del material. Siendo entonces la susceptibilidad magnética del orden de  $10^{-3}$ . Los materiales que presentan este comportamiento se denominan paramagnéticos, destacando entre ellos: aluminio, magnesio, titanio y wolframio. El paramagnetismo se produce fundamentalmente por los momentos dipolares magnéticos de los espines de los electrones. Las fuerzas de alineamiento del campo actuando sobre los dipolos moleculares son contrarrestados por la distorsión que producen la agitación térmica. La susceptibilidad paramagnética sigue la ley de Curie:

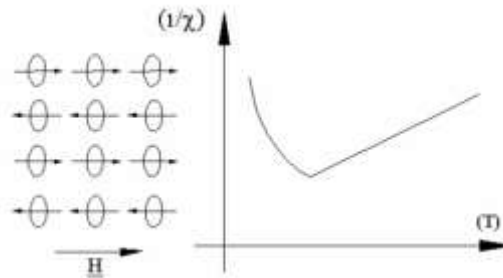
$$X_m = \frac{C}{T} \quad \text{Ecuación 3}$$

En la C es una constante y T la temperatura absoluta. A la temperatura ambiente el valor anterior es, como se ha mencionado antes, es decir de cien veces la susceptibilidad diamagnética. Esto significa que las sustancias paramagnéticas se pueden prescindir del efecto diamagnético debido su bajo valor.



**Figura 2 Paramagnetismo [2].**

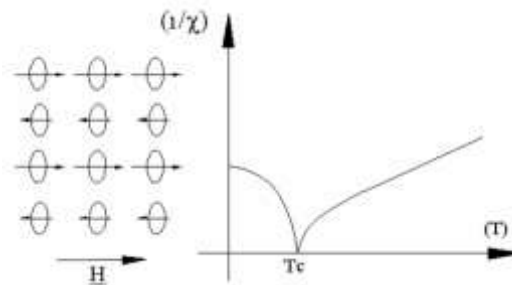
**Antiferromagnetismo:** los materiales antiferromagnéticos tienen un estado natural en el cual los espines atómicos de átomos adyacentes son opuestos, de manera que el momento magnético neto es nulo. Este estado natural hace difícil que el material se magnetice, aunque de todas formas adopta una permeabilidad relativa ligeramente mayor que uno. La variabilidad de la susceptibilidad con la temperatura presenta un pico denominado temperatura de Néel. Cuando se aplica un campo, por debajo de la temperatura de Néel los espines se alinean de forma antiparalela, de forma que la tendencia a magnetizarse con el campo exterior de los espines orientados en el sentido del campo aplicado experimenta la oposición de los espines orientados en sentido contrario. Por encima de la temperatura de Néel el comportamiento es el de un material paramagnético. [2]



**Figura 3 Antiferromagnetismo [2].**

**Ferrimagnetismo:** Es el término propuesto por Néel para describir el comportamiento magnético de las ferritas. En estos materiales los iones magnéticos ocupan dos tipos de red cristalina en un tipo de red denominémosle A los espines se orientan en un sentido. En la otra red cristalina la B por ejemplo los espines se orientan en sentido contrario a la de la red A. como el número de iones en la red A y B no tiene por qué ser el mismo, el balance es favorable a una de las direcciones y se produce una configuración de espines orientados que puede producir magnetización. Como que esta orientación se produce sin intervención de un campo externo se le denomina magnetización espontánea.

A medida que la temperatura aumenta, la configuración de los espines se deforma por agitación térmica, lo cual implica un descenso de la magnetización espontánea. Hasta llegar a ciertas temperaturas, denominada temperatura de Curie  $T_c$ , para la cual la configuración de los espines se vuelve totalmente aleatoria, desapareciendo la magnetización espontánea. Por encima de la temperatura de Curie el comportamiento del material es de un paramagnético. [2]



**Figura 4 Ferrimagnetismo [2].**

**Ferromagnetismo:**  $\mu_r \gg 1$  ( $X_m$  tiene un valor elevado).

El ferromagnetismo es similar al del ferrimagnetismo, con la diferencia que ahora los espines se orientan en paralelo el uno con el otro como resultado de una interacción que actúa entre espines vecinos. Al igual que en el ferrimagnetismo, sin aplicar un campo externo aparece una magnetización espontánea que desaparece cuando la temperatura del material llega a la temperatura de Curie, por encima de la cual el material se comporta como un paramagnético. A pesar de la magnetización espontánea, un bloque de material ferromagnético generalmente no está magnetizado, sino que 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 en algunos casos de muy fuerte acoplamiento cuando se retira el campo, creando un imán permanente.

Las características esenciales del ferromagnetismo son:

- La susceptibilidad magnética es positiva y grande y la permeabilidad relativa es entonces mucho mayor que 1.
- 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. [2]

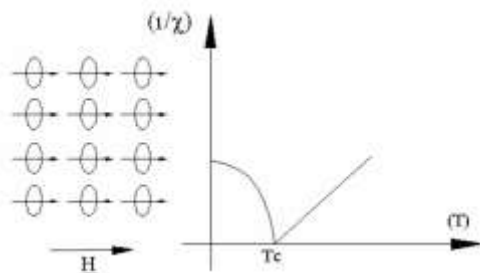


Figura 5 Ferromagnetismo [2].

## II.2 Curva de magnetización

Se analizan a continuación los procesos en los dominios, así como 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 6.

- 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.

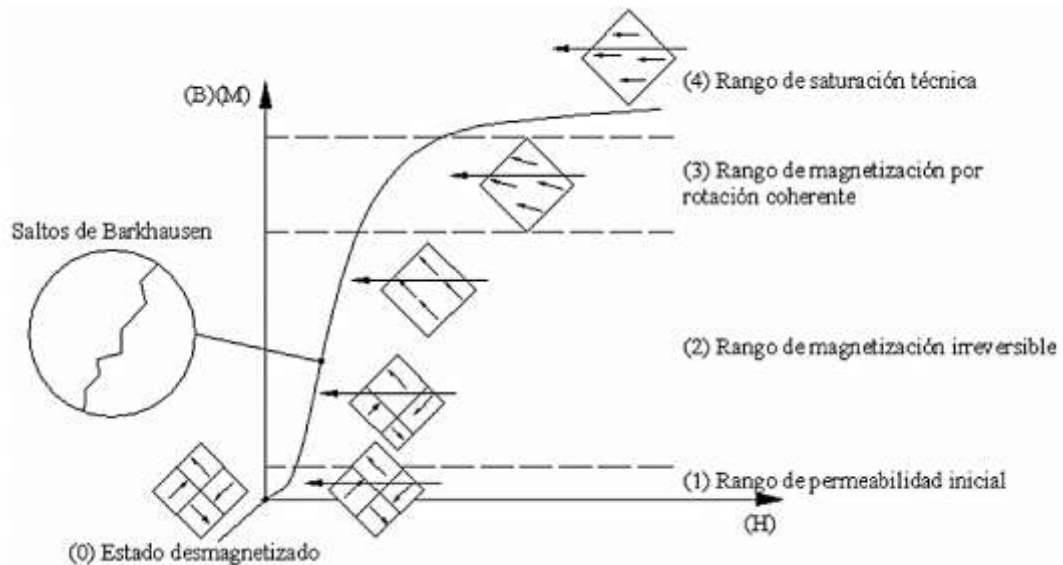


Figura 6 Curva de magnetización [2].

- **II.2.1 Estado desmagnetizado**

El espécimen no ha sido previamente expuesto a un campo exterior, se encuentra en su estado natural. En tal estado los dominios presentan una orientación aleatoria y por tanto una magnetización resultante nula.

- **II.2.2 Rango de permeabilidad inicial**

La magnetización cambia reversiblemente. La magnetización en cada dominio rota reversiblemente partiendo de las direcciones estables. Simultáneamente las paredes de los dominios se desplazan reversiblemente desde sus posiciones estables en los ejes cristalográficos favorables hacia la dirección del campo.

El proceso de magnetización reversible de esta zona se produce por desplazamientos así mismo reversibles de las paredes de los dominios. Se produce un crecimiento de los dominios

alineados favorablemente con el campo siguiendo los criterios de minimización energética. Como quiera que el desplazamiento de las paredes está determinado por la homogeneidad del material, la contribución de dichos desplazamientos a la permeabilidad inicial depende enteramente del tipo de material estudiado.

- **II.2.3 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 materiales muy heterogéneos, con gran cantidad de inclusiones magnéticas, la magnetización es irreversible. Esto es debido a los desplazamientos irreversibles de las paredes y a la rotación irreversible de la magnetización de los momentos. Los dominios rotan de su dirección original a una de las direcciones de los ejes cristalográficos favorables que están cercanos a la dirección del campo aplicado.

En este rango se producen los saltos de Barkhausen, de los cuales hablaremos más adelante. Los saltos de Barkhausen 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.

También se produce el efecto magneto-térmico, que consiste en la generación de calor en el proceso de magnetización. Parte del trabajo realizado por el campo en el proceso de magnetización discontinua se disipa en calor. Esta disipación de calor es la que se denomina pérdidas por histéresis.

- **II.2.4 Rango de magnetización por rotación coherente**

Si el campo aplicado sigue aumentado 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 de valor.

- **II.2.5 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, con lo que en la práctica no se logra la saturación total, de ahí la denominación de saturación técnica. Generalmente este efecto es muy pequeño incluso bajo campos considerablemente altos. [2]

### **II.3 Ciclo de histéresis**

La palabra histéresis viene del griego  $\upsilon\sigma\tau\acute{\epsilon}\rho\eta\sigma\iota\varsigma$ , que significa retraso, quedar atrás. En general, se usa el termino 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. [3]

Los materiales magnéticos se definen en función del valor de la susceptibilidad magnética y la intensidad de campo magnético, de acuerdo con el valor de la permeabilidad relativa los

materiales se clasifican en diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos, donde se trabajarán con los materiales ferromagnéticos. Reciben esta denominación aquellas sustancias que tienen imanaciones grandes aun en presencia de campos magnéticos muy débiles, solo tres elementos hierro, cobalto, níquel, son ferromagnéticos, casi todas las aleaciones y compuestos ferromagnéticos contienen uno o más de estos tres elementos o de manganeso, que pertenecen al mismo grupo de elementos de transición en la tabla periódica.

Si se observa en la figura 7.a y en la figura 7.b se muestra la curva  $B=f(H)$  que se obtiene al aplicar excitaciones magnéticas  $H$  de diferente magnitud y signo. Se parte del material desmagnetizado indicado por el punto a de la figura 7.b, y se aplica un campo  $H$  creciente introduciendo en la bobina una corriente en la dirección indicada en la figura 7.a hasta que se alcanza el punto b. Cuando se hace disminuir  $H$ , se reduce el valor de  $B$ , al volver  $H$  a cero persiste una cierta magnetización (punto c). al valor de  $B$  en este punto se le conoce con el nombre de magnetismo remanente y constituye el estado de magnetización permanente de la muestra. El punto d determina el campo coercitivo, que es el campo opuesto que resulta necesario aplicar para desmagnetizar la muestra (debido a la inversión en el sentido de la corriente de la bobina en la figura 7.a). Si continua hasta el punto e y después invertimos el sentido de cambio de  $H$ , se llega a formar una curva cerrada denominada ciclo de histéresis. [1]

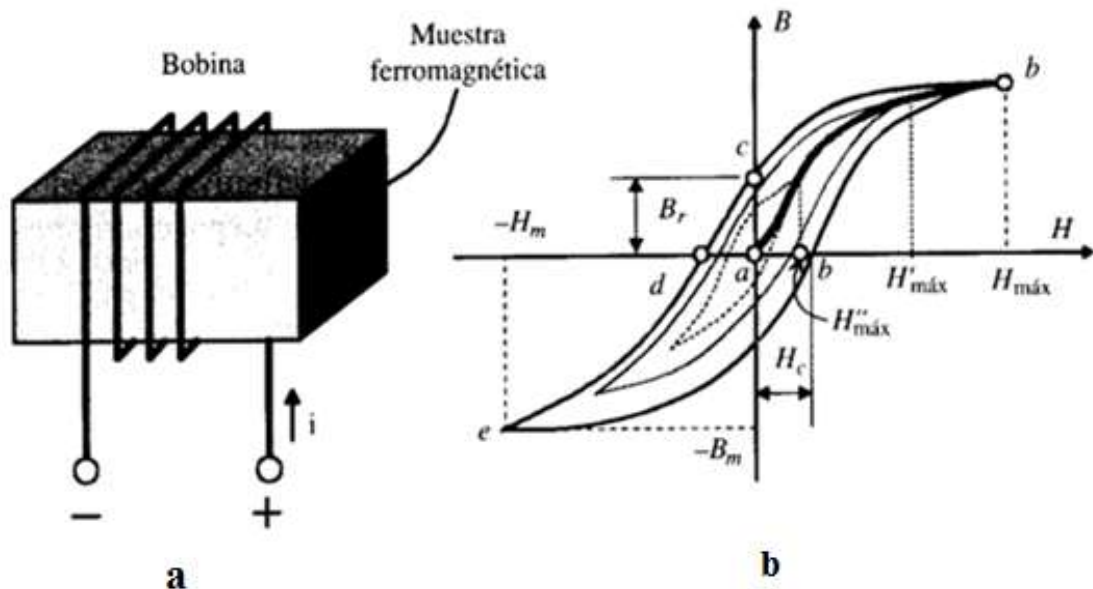


Figura 7 Ciclo de histéresis [1].

Las sustancias ferromagnéticas con mucha histéresis se llaman duras, mientras que las que presentan poca se denominan blandas o dulces. Se observa en la figura 8 que para un valor de  $H$  corresponden varios valores de  $B$ , lo que matemáticamente expresa una función multiforme y que indica, como ya se adelantaba antes, que el estado magnético depende de la historia del material. [4]

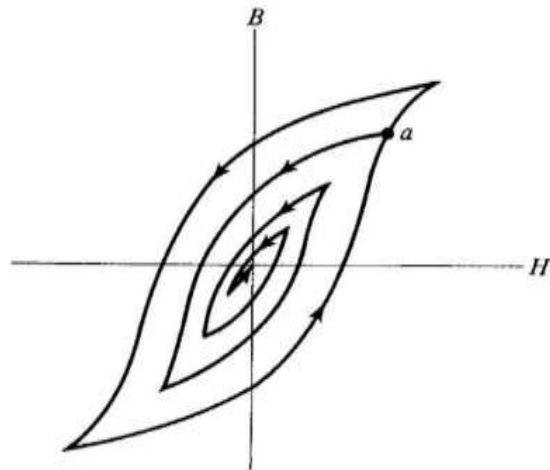


Figura 8 Sustancias ferromagnéticas [4].

- **II.3.1 El efecto Barkhausen**

El efecto Barkhausen es el fenómeno de cambios discontinuos de la magnetización cuando el campo cambia de forma continua. Estos cambios aparecen en la región de magnetización irreversible y son debidos a los desplazamientos irreversibles de las paredes y la rotación irreversible de los dominios. A cada cambio discontinuo de magnetización se le denomina salto de Barkhausen. En la figura 9 se muestra el detalle de la curva de histéresis en el rango de magnetización irreversible con los saltos de Barkhausen y la señal de tensión obtenida por saltos de Barkhausen. [2]

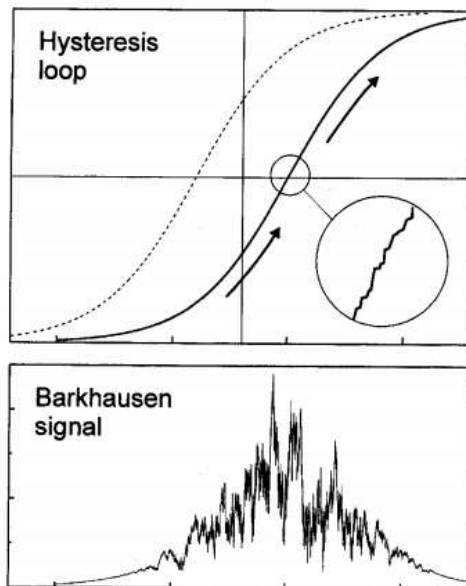


Figura 9 Efecto Barkhausen. Arriba: Detalle de la curva de histéresis en la zona de magnetización irreversible con los saltos de Barkhausen. Abajo: señal de tensión de los saltos de Barkhausen [2].



Los saltos de Barkhausen se ven afectados por los cambios en la estructura del material y por la tensión mecánica.

Ya se ha comentado que el campo y la magnetización dan una descripción incompleta del estado del espécimen ferromagnético. Esto es lógico pues la magnetización  $\mathbf{M}$  es el promedio sobre un volumen que contiene muchos dominios. En la escala de los dominios, el estado de un cuerpo está definido por su estructura, y pueden existir muchas estructuras para los mismos valores de campo y magnetización promedio. En un sistema magnético macroscópico hay una gran cantidad de imperfecciones que provocan un desorden estructural: granos, dislocaciones y deformaciones de red, fluctuaciones de composición, presencia de inclusiones, precipitados, separaciones de fase, etcétera. Estas fuentes de desorden están acopladas a la magnetización a través de las interacciones de intercambio, anisotropía e interacciones magnetostáticas. El resultado es que el perfil de energía en el cual se desenvuelve el sistema exhibe una estructura muy complicada, con un gran número de mínimos locales y puntos de inflexión que reflejan la presencia del desorden estructural.

La magnetización está acoplada al campo aplicado por la energía  $-\mu_0\mathbf{M}\cdot\mathbf{H}$ , que continuamente altera el balance energético del sistema a medida que  $\mathbf{H}$  varía con el tiempo. La estabilidad de una configuración de dominios dada, tarde o temprano se destruirá por variación del campo aplicado. El mínimo de energía se transforma en un punto de inflexión, el patrón de dominios se vuelve inestable, y espontáneamente evoluciona a alguna configuración nueva. Estos reajustes se pueden localizar en el espacio como una pared de dominio dando un pequeño salto a otra posición estable, o puede implicar a toda la estructura de dominios en partes sustanciales del cuerpo. Este mecanismo fundamental del proceso de magnetización es el efecto Barkhausen. [3]

## II.4 Efectos dependientes del tiempo

- **II.4.1 Corrientes inducidas**

Aun cuando el campo aplicado cambie de forma instantánea, la magnetización de un espécimen no llega a su equilibrio instantáneamente, esta es retardada por las corrientes inducidas, y las paredes de los dominios se mueven a una velocidad finita.

Esto se traduce en que existe un retardo entre la magnetización y el campo. El proceso más importante que provoca el retardo es el siguiente. El campo, por la ley de Faraday, induce una fuerza electromotriz en el material. Como que los materiales ferromagnéticos son relativamente buenos conductores, fluyen corrientes ciertamente apreciables por dicho material, estas corrientes se denominan corrientes inducidas. Las corrientes inducidas, según la ley de Lenz, tendrán una dirección tal que se oponen a un cambio del campo. El resultado es que el campo tarda un cierto tiempo en penetrar en el material, por ello el cambio en la magnetización es más lento. Si el campo aplicado varía de forma sinusoidal en el tiempo, la amplitud del campo es considerablemente menor en el centro que en la superficie. A esto se le denomina efecto corona magnético (o efecto pelicular magnético). Sólo cuando el campo se mantiene constante las corrientes inducidas decaen a cero y el campo en el interior se iguala con el campo en la superficie.

- **II.4.2 Envejecimiento magnético ( Magnetic ageing)**

Cambios irreversibles en las propiedades magnéticas debidas a cambios en la estructura, como la formación de precipitados; puede acompañar a un envejecimiento mecánico.

- **II.4.3 Pos-efecto magnético (Magnetic alter-effect)**

Si se aplica un campo y se registra la respuesta de magnetización, en algunos casos puede apreciarse que el tiempo transcurrido para llegar al equilibrio es mayor que el retardo causado por las corrientes inducidas. Esta diferencia de tiempo es lo que denominamos pos-efecto magnético. Cuando aparece, o más bien, cuando se puede registrar, el pos-efecto magnético está asociado con la difusión de átomos, iones, electrones o huecos.

- **II.4.4 Viscosidad magnética**

El término viscosidad magnética se suele emplear para designar al mismo proceso que el pos-efecto magnético. No obstante, parece más conveniente reservar el término para aquellos cambios lentos en la magnetización que no están relacionados con algún efecto de difusión. Se emplea para este concepto la designación viscosidad irreversible, mientras que se denomina viscosidad reversible como sinónimo de pos-efecto de difusión.

- **II.4.5 Desacomodación**

En algunos especímenes desmagnetizados, la permeabilidad inicial decrece con el tiempo. A este efecto se le denomina desacomodación. La desacomodación también es un efecto de la difusión de átomos intersticiales. También se suele emplear el término envejecimiento reversible como sinónimo de desacomodación. [2]

## **II.5 Pérdidas de energía en los núcleos ferromagnéticos**

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. Esta pérdida de energía es debida a dos causas: pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas o corrientes de Foucault. También se tienen pérdidas de energía en núcleos sujetos a imanaciones y desimanaciones cíclicas por medio de excitaciones periódicas.

- **II.5.1 Pérdidas por histéresis.**

El ciclo de histéresis del material magnético es el que se muestra en la figura 10. Supóngase que la amplitud del campo magnético varía entre  $+H_m$  y  $-H_m$ , correspondiendo a variaciones de la inducción entre  $+B_m$  y  $-B_m$ . Si se considera inicialmente que la inducción en el núcleo varía desde  $-B_r$  (punto a) hasta  $B_m$  (punto c) siguiendo el tramo de curva  $\langle abc \rangle$ , se tendrá un aumento de

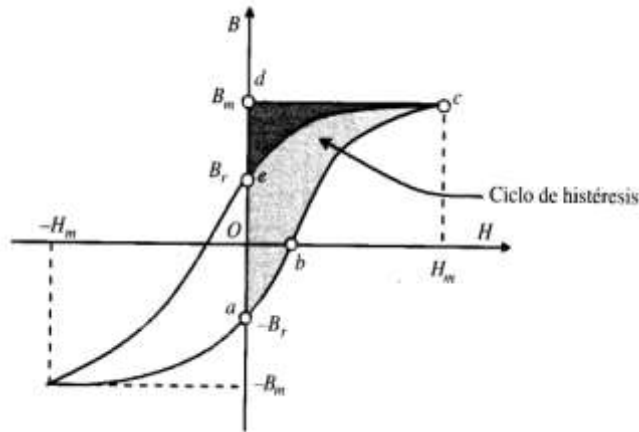
inducción en el núcleo, lo que corresponde a una energía absorbida por el campo magnético y almacenada durante esta parte del ciclo se hallará de la siguiente manera:

$$W_{ac} = vol \int_{-B_r}^{B_m} H dB = Vol * w_1 \quad \text{Ecuación 4}$$

La integral  $w_1$  de la expresión anterior representará, el área de la superficie <abcdea> si se considera ahora que la inducción se reduce desde  $B_m$  (punto c) hasta  $B_r$  (punto e), siguiendo el tramo <ce> de la curva de histéresis, entonces resultará una energía devuelta a la fuente durante esta parte del ciclo porque es negativa, y cuyo valor es:

$$W_{ce} = vol \int_{B_m}^{B_r} H dB = Vol * w_2 \quad \text{Ecuación 5}$$

El área <cdec> de la figura 10 representará la densidad de energía correspondiente, que es el valor  $w_2$  de la parte integral de la expresión anterior. es evidente entonces que, si se somete al núcleo a una inducción creciente entre  $B_m$  y  $B_r$ , siguiendo el camino <ce>, la superficie resultante <abcea> de la figura 10 representara la densidad de energía adsorbida por el núcleo ferromagnético en esta excitación cíclica y que no es devuelta a la red, sino que es disipada en el núcleo en forma de calor.



**Figura 10 Área del ciclo de histéresis [1].**

Es evidente, según se muestra en la figura 10, que el área más clara corresponde a la mitad del ciclo de histéresis y representa la diferencia de energías  $w_2 - w_1$ . De acuerdo con la conclusión anterior, que si las variaciones de campo se producen entre  $\pm H_m$  correspondiendo a variaciones de inducción  $\pm B_m$ , la energía total disipada en el núcleo en forma de calor en este ciclo completo, y que se designaremos por  $W_H$  será:

$$W_H = (Vol) \oint H dB \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde la integral curvilínea se extiende a todo el ciclo de histéresis, por lo que el resultado de la integral representa el área que encierra el ciclo de histéresis, que según la expresión anterior significara la energía perdida por histéresis por ciclo y por unidad de volumen del material magnético.

Experimentalmente, C.P. Steinmetz propuso en 1892 una formula empírica para definir el cálculo de perdida de energía por segundo en el núcleo y que viene expresada por la siguiente ecuación.

$$PH = KHf(vol)Bm^\alpha \quad \text{Ecuación 7}$$

Los valores de  $k_H$  (denominado coeficiente de Steinmetz) y  $\alpha$  (denominado exponente de Steinmetz) depende de la naturaleza del núcleo ferromagnético.

- **II.5.2 Pérdidas por corrientes de Foucault**

En la figura 11 se muestra una bobina arrollada sobre un núcleo de hierro macizo. Al alimentar la bobina con corriente alterna se producirá, de acuerdo con la ley de ampere, un campo magnético alterno de inducción  $B_z = B_m \cos \omega t$  que atravesará toda la masa de hierro en el sentido del eje Z (eje de la bobina).

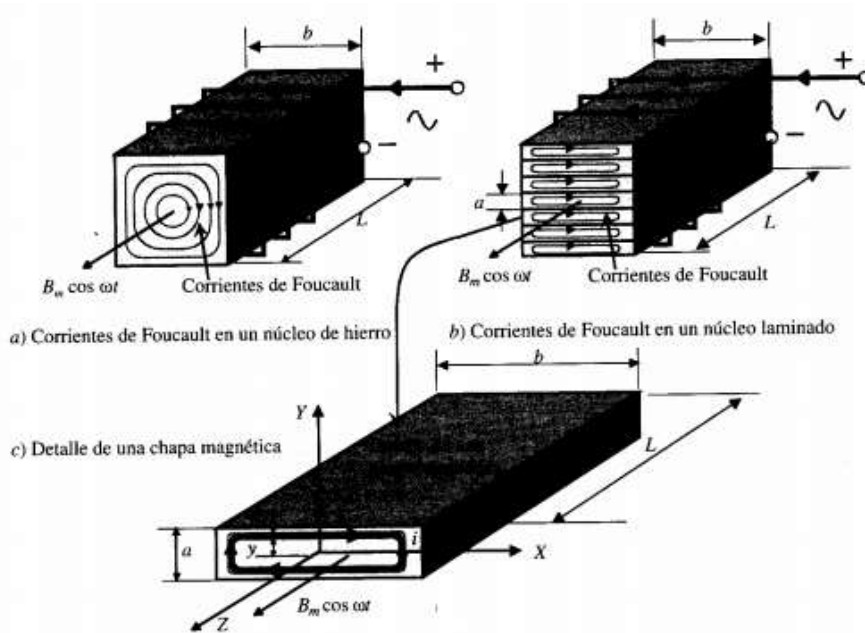


Figura 11 Corrientes de Foucault [1].

De acuerdo con la ley de Faraday, aparecerán en el material unas f.e.m.s. inducidas que dan lugar a unas corrientes parásitas que circulan por el material. Téngase en cuenta que el hierro es conductor de la electricidad, y aunque su conductividad es pequeña en comparación con la del cobre, las f.e.m.s. inducidas provocan corrientes de circulación por la masa del hierro. Estas corrientes, denominadas corrientes de Foucault se han señalado en la figura 11 a por medio de círculos

concéntricos en planos perpendiculares al flujo inductor y cuyo sentido de circulación es tal, que el flujo producido por estas corrientes se opone (Ley de Lenz) al flujo inductor de la bobina. Estas corrientes pueden originar grandes pérdidas de potencia, con el consiguiente calentamiento de los núcleos. Para prevenir estas pérdidas, el hierro empleado en los circuitos magnéticos suele estar laminado, en forma de chapas magnéticas de pequeño espesor, tal como se señala en la figura 11 b. El plano de las chapas es paralelo al flujo, por lo que las corrientes parasitas quedan confinadas a trayectorias de sección transversal pequeña. Consideremos una de estas chapas de dimensiones transversales  $axb$  (donde  $a \ll b$ ) y profundidad  $L$ , tal como se señala 11 c, que es atravesada por el campo magnético  $B_z = B_m \cos \omega t$ .

Suponiendo que el campo es uniforme en la sección transversal de la chapa, el flujo que atraviesa la espira sombreada de la figura 11 c es:

$$\Phi = 2byB_m \cos \omega t \quad \text{Ecuación 8}$$

Ya que la superficie cerrada de la espira es  $2by$ . Por la ley de Faraday, la f.e.m. inducida tiene un valor modular dado por:

$$e = 2wbyB_m \sin \omega t \quad \text{Ecuación 9}$$

tomando una longitud unidad en la dirección del eje Z, la f.e.m.s. anterior produce una corriente de alrededor de la espira indicada, cuya resistencia vale.

$$R = \frac{2b}{\sigma dy} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde se ha tenido en cuenta que  $a \ll b$  y que la conductividad del material es  $\sigma$ . La potencia instantánea en la espira será:

$$dPF = R * i^2 = \frac{e^2}{R} = \frac{4w^2b^2y^2B_m^2\sigma \sin^2 \omega t dy}{2b} \quad \text{Ecuación 11}$$

Que corresponde a un valor medio:

$$dPF = w^2by^2B_m^2\sigma dy \quad \text{Ecuación 12}$$

Y a una potencia disipada total:

$$PF = \int_0^{a/2} w^2B_m^2b\sigma y^2 dy = \frac{w^2}{24} * BM^2a^3b\sigma \quad \text{Ecuación 13}$$

Lo que representa una potencia disipada por unidad de volumen:

$$\frac{PF}{vol} = \pi^2 f^2 B m^2 a^2 \left(\frac{\sigma}{6}\right) = K F f^2 B m^2 a^2 \sigma \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde se ha llamado  $KF$  a  $\pi^2/6$  y se ha tenido en cuenta que el volumen es:  $vol=abL=ab$ , al haber considerado una profundidad unidad. [1]

## II.6 Transformadores

Un transformador es una máquina eléctrica estática que transforma la energía eléctrica recibida en otra energía eléctrica de características distintas, bien sea de tensión, intensidad. El transformador es uno de los equipos eléctricos más útiles, de los utilizados en la electricidad, puede aumentar o disminuir la tensión, puede aislar un circuito de otro. El transformador se utiliza, la mayoría de las veces, para rebajar la tensión de alimentación a valores más bajos y así poder manipular los circuitos sin riesgos para los usuarios. El devanado primario es el que recibe la energía y el devanado secundario es el que la cede. Un transformador, al ser una máquina estática, no tiene pérdidas mecánicas y por tanto puede alcanzar rendimientos del 98%. [5]

### II.6.1 Aspectos constructivos

**Núcleo:** El núcleo del transformador está compuesto por un circuito magnético está compuesto por las columnas que son las partes que realizan la unión entre las columnas. Los espacios entre las columnas y las culatas, por los cuales pasan los devanados, se llaman ventanas del núcleo. Según sea la posición relativa entre el núcleo y los devanados los transformadores se clasifican en acorazados figura 12.a, y de columna figura 12.b como se muestra en la figura 12.

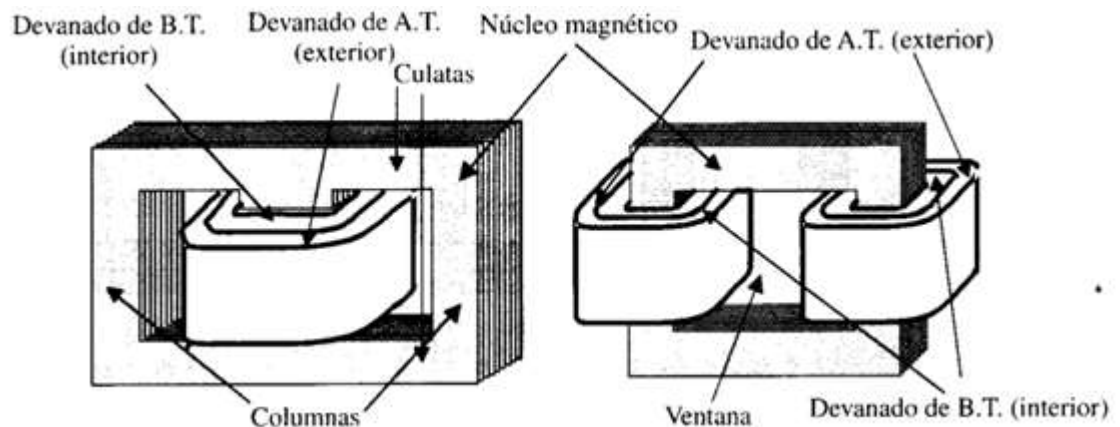


Figura 12 Circuito magnéticos de transformadores monofásicos [1].

a) Acorazado

b) De columnas

Cuando se trata de transformadores trifásicos, el circuito magnético consta de tres columnas idénticas como se muestra en la figura 13.

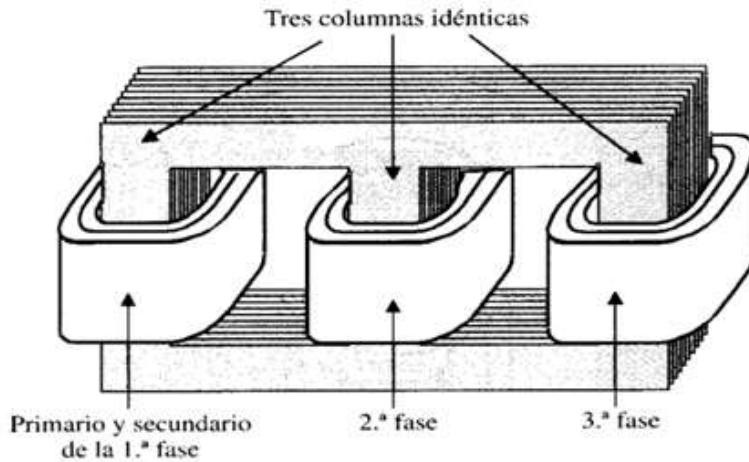


Figura 13 . Circuito magnético de un transformador trifásico [1].

La invención del transformador y el desarrollo simultáneo de las fuentes de potencia alterna eliminaron para siempre las restricciones referentes al rango y el nivel de los sistemas de potencia. Un transformador cambia, idealmente un nivel de voltaje alterno a otro nivel de voltaje sin afectar la potencia que está suministrando. Se eleva su voltaje para transmitirlo a largas distancias con muy bajas pérdidas y luego se reduce para dejarlo nuevamente en el nivel de utilización final.

**Devanados:** Constituyen el circuito eléctrico del transformador; se realizarán por medio de conductores de cobre, en forma de hilos redondos o de sección rectangular cuando se requieren secciones mayores. Los conductores están recubiertos por una capa aislante, que suele ser de barniz en los pequeños transformadores y que en el caso de pletinas está formado por una o varias capas de fibra de algodón o cinta de papel. Según sea la disposición relativa entre los arrollamientos de A.T y B.T. los devanados pueden ser concéntricos o alternados.

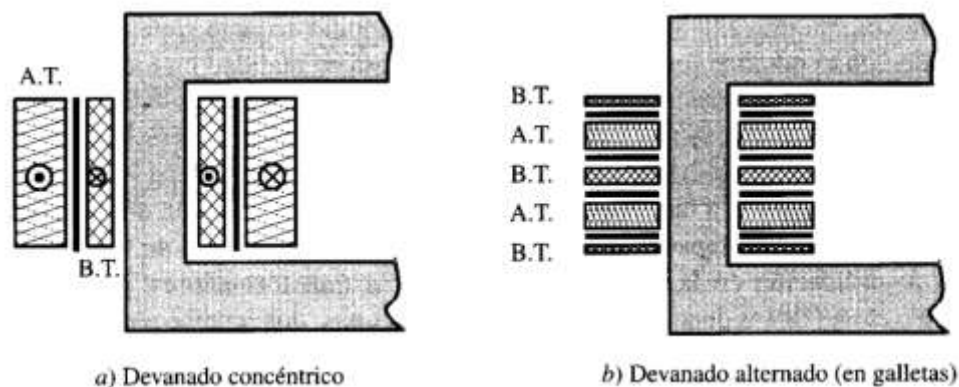


Figura 14 Devanados concéntrico y alternado [1].

**Sistema de refrigeración:** En un transformador, existe una serie de pérdidas que se transforman en calor y que contribuyen al calentamiento de la máquina. Para evitar que se consigan altas temperaturas que puedan afectar la vida de los aislamientos de los devanados es preciso dotar al transformador de un sistema de refrigeración adecuado. Para potencias pequeñas, la superficie externa de la máquina es suficiente para lograr la evacuación de calor necesaria. Lo que da lugar a los llamados transformadores en seco. Para potencias elevadas se emplea como medio refrigerante el aceite, resultando los transformadores en baño de aceite, eliminando así el calor presente por medio de radiación y convección natural.

**Placa de características del transformador:** La placa característica de un transformador es una cartulina metálica serigrafiada que incluye los datos de potencia asignada, tensiones asignadas, frecuencia e impedancia equivalente en tanto por ciento, o caída de tensión relativa de cortocircuito, si el transformador tiene tomas variadores de tensión, se incluyen asimismo las tensiones de las diferentes derivaciones. También se indica el esquema de conexiones internas, la especificación del tipo de transformador, clase de refrigeración, nombre del fabricante, serie código. [1]

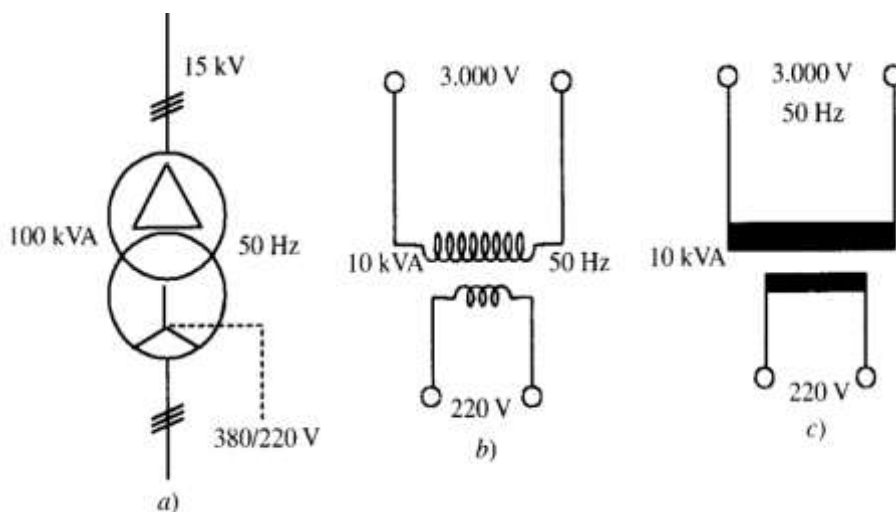


Figura 15 Símbolos empleados para designar un transformador [1].

### • II.6.2 Circuito equivalente de un transformador

Las pérdidas que ocurren en los transformadores reales deben tenerse en cuenta en cualquier modelo aproximado del transformador. Los principales criterios a tener en cuenta para la construcción de tal modelo son:

- Pérdidas en el cobre: ( $I^2R$ ). Son pérdidas por calentamiento resistivo en los devanados primario y secundario del transformador. Son proporcionales al cuadrado de la corriente en los devanados.
- Pérdidas por corrientes parásitas: pérdidas por calentamiento resistivo en el núcleo del transformador. Son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado al transformador.



- Pérdidas por histéresis: Están relacionadas con los reordenamientos de los dominios magnéticos en el núcleo durante cada semiciclo, son una función compleja no lineal de voltaje aplicado al transformador.
- 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. Esta fuga de flujos produce una autoinductancia en las bobinas primarias y secundaria, y sus efectos deben tenerse en cuenta. [6]

### II.6.2.1 Circuito equivalente aproximado de un transformador.

Para la obtención del circuito equivalente del transformador referido a su nivel de voltaje primario mostrado en la figura 17 donde se tenga en cuenta las principales imperfecciones de los transformadores reales. El efecto más sencillo 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. En este circuito responde fielmente al comportamiento del transformador real y por ello se denomina circuito equivalente exacto mostrado en la figura 16. En la práctica, y debido al reducido valor de  $I_0$  frente a las corrientes  $I_1$  e  $I_2$ , se suele trabajar con un circuito equivalente aproximado que se obtiene trasladando la rama en paralelo por la que se deriva la corriente de vacío a los bornes de entrada del primario, resultando el esquema de la figura 17 con este circuito no se introducen errores apreciables en el cálculo y sin embargo se simplifica enormemente el estudio de la máquina. Si se denomina:

$$R_{CC}=R_1 + R'_2: \text{ Resistencia de cortocircuito} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$X_{CC}=X_1 + X'_2: \text{ Reactancia de cortocircuito} \quad \text{Ecuación 16}$$

El circuito de la figura 17 se convierte al de la figura 18 con ayuda de este último circuito equivalente simplificado pueden resolverse una serie de problemas prácticos que afectan a la utilización del transformador; en particular para el cálculo de la caída de tensión y el rendimiento [1]

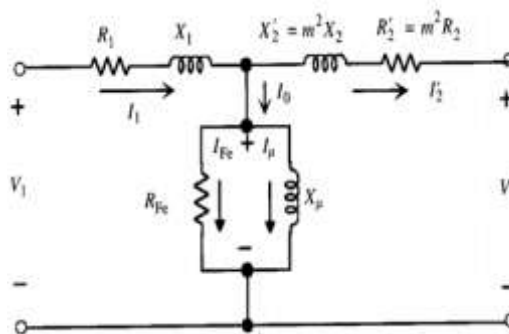


Figura 16 Circuito equivalente exacto de un transformador real reducido al primario [1].

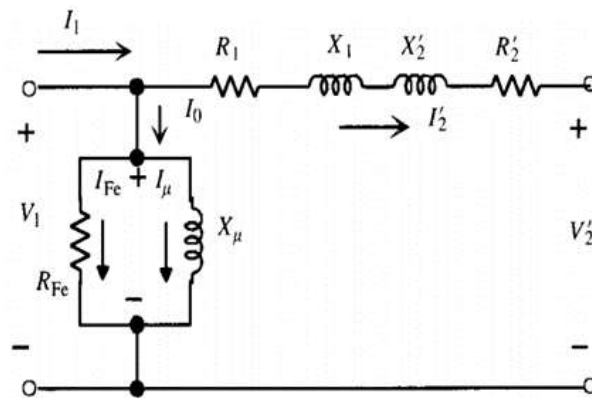


Figura 17 Circuito equivalente aproximado de un transformador reducido al primario [1].

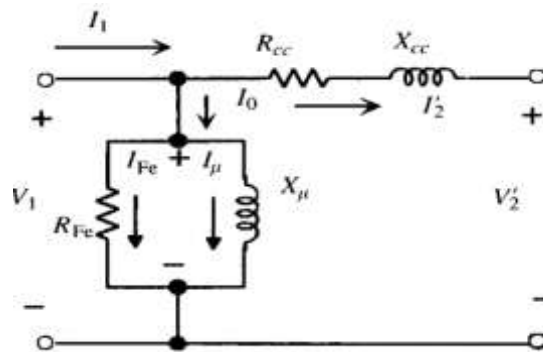


Figura 18 Circuito equivalente simplificado de un transformador reducido al primario[1].

## II.7 Ensayos del transformador

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. En la práctica para la determinación de los parámetros del circuito equivalente de un transformador son: ensayo de vacío y ensayo de cortocircuito.

- **II.7.1 Ensayo de vacío**

Consiste esta prueba en aplicar al primario del transformador la tensión asignada, estando el secundario en circuito abierto. Al mismo tiempo debe medirse la potencia absorbida  $P_0$ , la corriente de vacío  $I_0$  y la tensión secundaria, como se muestra en la figura 19.

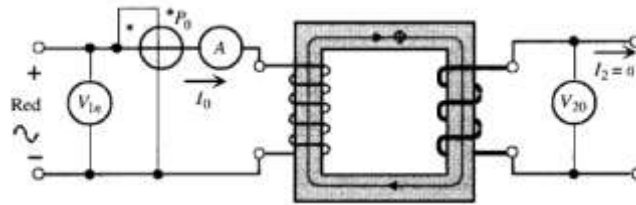


Figura 19 Esquema eléctrico del ensayo de vacío [1].

Como las pérdidas en vacío son despreciables debido al pequeño valor de \$I\_0\$, la potencia absorbida en vacío coincide prácticamente con las pérdidas en el hierro, lo que está de acuerdo con el circuito equivalente aproximado de la figura 20.a, al ser \$I\_2=0\$. De las medidas efectuadas puede obtenerse el factor de potencia en vacío, de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$P_o = V_{1n} * I_o * \cos\phi_o = PFE \quad \text{Ecuación 17}$$

Por otra parte, debido al pequeño valor de la caída de tensión primaria, se puede considerar que la magnitud \$V\_{1n}\$ coincide prácticamente con \$E\_1\$, resultando el diagrama vectorial de vacío de la figura 20.b, en el que se ha tomado la tensión primaria como referencia de fases. En este esquema las dos componentes de \$I\_0\$ valen:

$$I_{FE} = I_o \cos\phi_o \quad \text{Ecuación 18}$$

$$I_\mu = I_o \sin\phi_o \quad \text{Ecuación 19}$$

De donde los parámetros ya los valores de los parámetros \$R\_{FE}\$ y \$X\_\mu\$:

$$R_{FE} = \frac{V_1}{I_{FE}} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$X_\mu = \frac{V_1}{I_\mu} \quad \text{Ecuación 21}$$

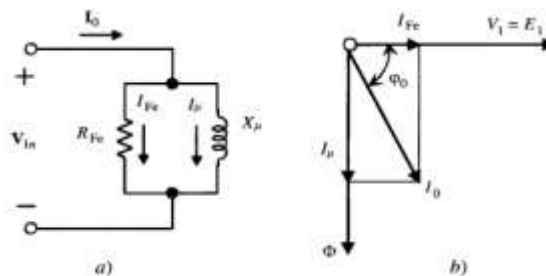
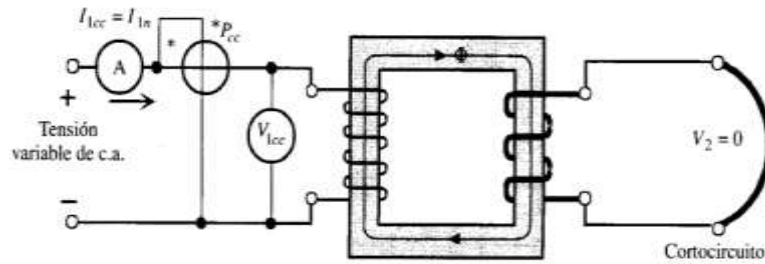


Figura 20 Circuito equivalente en vacío y diagrama fasorial [1].

• **II.7.2 Ensayo de cortocircuito.**

En este ensayo se cortocircuita el devanado secundario y se aplica al primario una tensión que se va elevando gradualmente desde cero hasta que circula la corriente asignada de plena carga por los devanados. Como se muestra en la figura 21.



**Figura 21** Circuito eléctrico ensayo de cortocircuito [1].

La potencia absorbida en cortocircuito coincide con las pérdidas en el cobre, lo que está de acuerdo con el circuito equivalente aproximado de la figura 22.a, al despreciar la rama obtenida del circuito del ensayo de vacío como consecuencia del pequeño valor de  $I_0$  frente a la corriente  $I_{1n}$ .

De las medidas efectuadas se puede obtener el f.d.p. de cortocircuito, de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$P_{cc} = V_{1n} * I_{1n} * \cos\phi_{cc} \quad \text{Ecuación 22}$$

Si el circuito de la figura 22.a se toma la corriente como referencia, se obtiene el diagrama vectorial de la figura 22.b, del que se deduce:

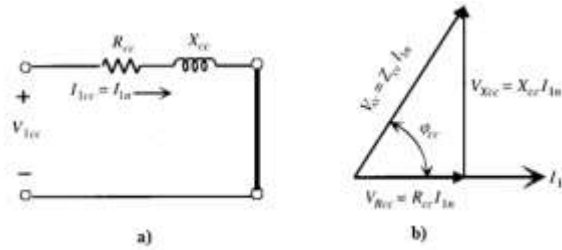
$$V_{Rcc} = R_{cc} * I_{1n} = V_{1cc} \cos\phi_{cc} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$V_{Xcc} = X_{cc} * I_{1n} = V_{1cc} \sin\phi_{cc} \quad \text{Ecuación 24}$$

De donde obtenemos las siguientes expresiones:

$$R_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \cos\phi_{cc} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$X_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \sin\phi_{cc} \quad \text{Ecuación 26}$$



**Figura 22 a) Circuito equivalente de cortocircuito, b) Diagrama fasorial de tensiones [1].**

El ensayo de cortocircuito permite determinar los parámetros de la rama serie del circuito equivalente del transformador, y de ahí que se designen con los símbolos  $R_{cc}$  y  $X_{cc}$ . Debe destacarse que el ensayo de cortocircuito determina la impedancia total del transformador, pero no da información de cómo están distribuidos estos valores totales entre el primario y el secundario. Es decir, se obtiene según la ecuación 15 y 16. Para poder obtener los valores individuales de las resistencias  $R_1$  y  $R_2'$  es preciso aplicar un procedimiento aproximado siguiente:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_{cc}}{2} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_{cc}}{2} \quad \text{Ecuación 28}$$

Otro aspecto a tener en cuenta en el ensayo en cortocircuito es que la potencia absorbida coincide con la pérdida en el cobre de los devanados correspondiente a la corriente que fluye en esta situación. Las pérdidas correspondientes representan las pérdidas en el cobre a plena carga. definidas las corrientes  $I_{1cc}=I_{1n}$  e  $I_{1corto}$ , teniendo en cuenta el circuito equivalente mostrado en la figura 22.a serán:

$$Z_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} = \frac{V_{1corto}}{I_{1corto}} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$P_{CC} = R_{cc} * I_{1n}^2 ; P_{corto} = R_{cc} * I_{1corto}^2 \quad \text{Ecuación 30}$$

De donde se deduce:

$$V_{1cc} = V_{1corto} \frac{I_{1n}}{I_{1corto}} ; P_{cc} = P_{corto} \frac{I_{1n}^2}{I_{1corto}^2} \quad \text{Ecuación 31}$$

Normalmente las caídas de tensión representadas por las ecuaciones 23 y 24 suelen expresarse en tanto por ciento respecto a la tensión asignada, resultando:

$$E_{cc} = \frac{V_{1cc}}{V_{1n}} * 100 \quad \text{Ecuación 32}$$

$$E_{Rcc} = \frac{V_{Rcc}}{V_{1n}} * 100 \quad \text{Ecuación 33}$$

$$E_{Xcc} = \frac{V_{Xcc}}{V_{1n}} * 100 \quad \text{Ecuación 34}$$

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:

$$I_{1falta} = \frac{V_{1n}}{Z_{cc}} \quad \text{Ecuación 35}$$

Y teniendo en cuenta que el diagrama vectorial mostrado en la figura 22.b se deduce:

$$I_{1n} = \frac{V_{1cc}}{Z_{cc}} \quad \text{Ecuación 36}$$

Y así se podrá obtener:

$$I_{1falta} = \frac{V_{1n}}{V_{1cc}} * I_{1n} \quad \text{Ecuación 37}$$

Al hacer uso de la ecuación 32 resulta: [1]

$$I_{1falta} = \frac{100}{E_{cc}} * I_{1n} \quad \text{Ecuación 38}$$

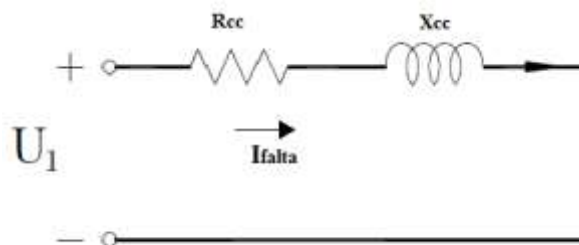
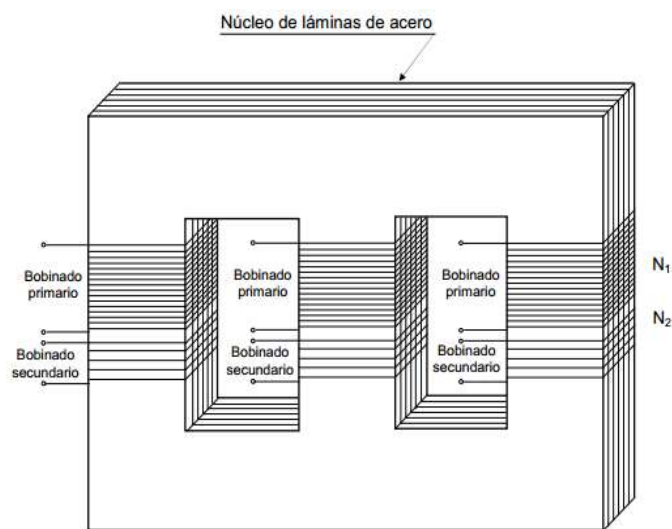


Figura 23 Circuito corriente de falta [4].

## II.8 Transformador trifásico.

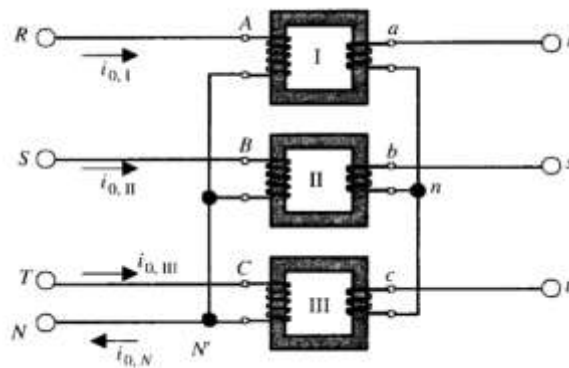
La mayoría de los transformadores utilizados en la transmisión y distribución de energía eléctrica son trifásicos, por una cuestión de costos, tamaños y transporte; pero hay excepciones: cuando las potencias son muy grandes, cientos de MVA, o se requieren varios transformadores de gran potencia e iguales, por ejemplo en una central con una cierta cantidad de máquinas de gran potencia, puede convenir utilizar bancos trifásicos armados con tres transformadores monofásicos, e inclusive tener algún transformador de reserva.

Entre las mayores invenciones en el ámbito eléctrico se encuentran los transformadores puesto que estos se encuentran presentes en todos los procesos del transporte eléctrico ya sea a pequeña o gran escala. Existen diferentes tipos, de construcciones diferentes según las necesidades entre los más utilizados están los transformadores trifásicos que no es más que tres transformadores monofásicos trabajando en un solo elemento. [7]



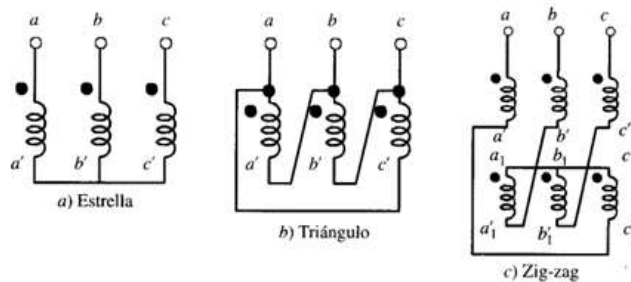
**Figura 24** Esquema de un transformador trifásico [7].

En el estudio del transformador trifásico hay que considerar cada columna como un transformador monofásico como se muestra en la figura 25, de tal forma que los ensayos, esquemas equivalentes, etc., deben expresarse en valores simples, pudiéndose aplicar entonces las mismas técnicas de análisis empleadas en el estudio de los transformadores monofásicos. Por ejemplo, la relación de transformación será el cociente entre el número de espiras por fase del primario y el número de espiras por fases del secundario, que coincidirá con la relación entre las f.e.m.s. por fase entre primario y secundario.



**Figura 25 Banco trifásico a base de tres transformadores monofásicos [1].**

Las formas que más frecuentemente se emplean para realizar las conexiones de los arrollamientos son: en estrella (con o sin hilo de neutro), en triángulo y en Zig-Zag. En la conexión en estrella se unen en un mismo punto los tres extremos de los arrollamientos que poseen la misma polaridad, existiendo dos formas básicas según se unan los terminales A,B,C o A',B',C' (a,b,c o a',b',c' para el secundario). En la conexión en triángulo se unen sucesivamente los extremos de polaridad opuesta de cada dos devanados hasta cerrar el circuito; según sea el orden de sucesión en que se realiza esta operación. La conexión en Zig-Zag, que en la práctica sólo se emplea en el lado de menor tensión, consiste en subdividir en dos partes iguales los devanados secundarios, una parte se conecta en estrella y luego cada rama se une en serie con las bobinas invertidas de las fases adyacentes, siguiendo un determinado orden cíclico. Estas tres formas básicas se muestran en la figura 26 (solo para el devanado de B.T.). [1]



**Figura 26 Tipos de conexiones del transformador trifásico [1].**

- **II.8.1 Conexiones de los transformadores trifásicos**

- Conexión Y-Y:** La conexión Y-Y de transformadores trifásicos se muestra en la figura 27. En esta conexión el voltaje primario de cada fase del transformador está dado por  $V_{\phi p} = V_L p / \sqrt{3}$ . El voltaje de fase primario está relacionado con el voltaje de fase secundario por la proporción de vueltas del transformador, esta conexión tiene dos problemas graves: \*si las cargas del circuito del transformador están desbalanceadas, los voltajes de las fases del transformador pueden llegar a desbalancearse severamente. \* los voltajes de terceras armónicas pueden ser grandes. Los voltajes en cualquier fase



estarán separados  $120^\circ$  de los de las demás fases. Siempre hay algunas componentes de tercera armónica en el transformador debido a la no linealidad del núcleo, y estas componentes se adicionan. El resultado es una componente de voltaje de tercera armónica muy grande por encima del voltaje fundamental de 50 o 60 Hz. Estos problemas se pueden solucionar utilizando una de las dos técnicas siguientes (poniendo sólidamente a tierra los neutros de los transformadores, en especial el neutro de los devanados primarios) o (adicionar un tercer devanado y conectarlo en delta, al banco de transformadores).

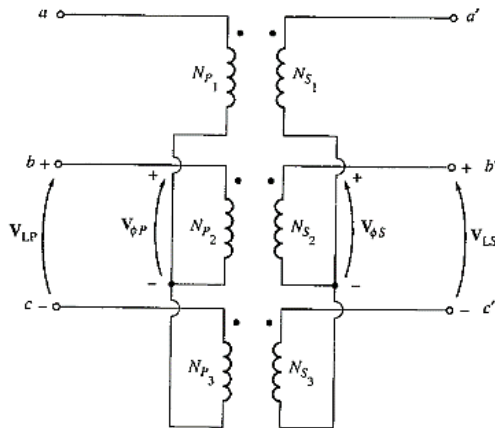


Figura 27 Conexión Y-Y [6]

- b) **Conexión Y- $\Delta$ :** Esta conexión no tiene problema con los componentes de tercer armónico de tensión, puesto que éstos dan lugar a una corriente circulante en el lado conectado en triángulo. La figura que nos muestra esta conexión es la presente en la figura 28, La conexión se comporta razonablemente bien bajo cargas desequilibradas, ya que el triángulo redistribuye parcialmente cualquier desequilibrio que se presente. Esta disposición tiene el problema de que, debido a la conexión en triángulo, las tensiones secundarias sufren un desplazamiento de  $30^\circ$  con respecto a las tensiones del primario, lo cual puede causar inconvenientes al conectar en paralelo los secundarios de dos transformadores, ya que para hacer es necesario que los diferentes grupos tengan el mismo índice horario.

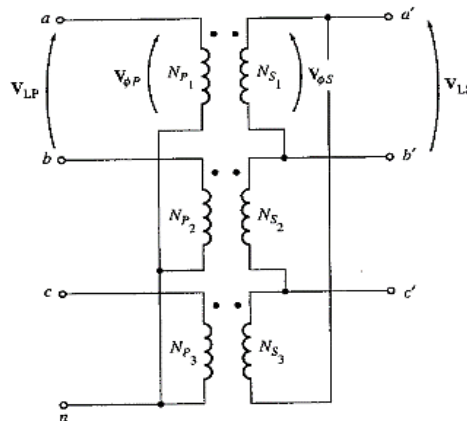


Figura 28 Conexión Y- $\Delta$  [6].

- c) **Conexión  $\Delta$ -Y:** una conexión de transformadores  $\Delta$ -Y de transformadores trifásicos se muestra en la figura 29. En esta conexión, el voltaje primario de línea es igual al voltaje primario de fase  $V_{1p}=V_{1L}$ , mientras que los voltajes secundarios están relacionados por  $V_{1s}=\sqrt{3}V_{fs}$ . Esta conexión tiene las mismas ventajas y el mismo desfase que en el caso del transformador Y- $\Delta$ .

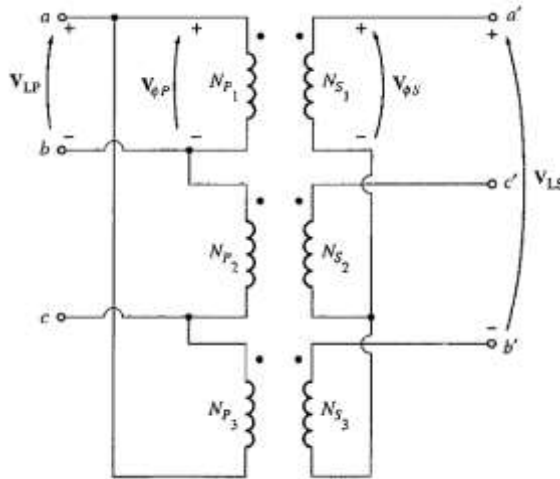


Figura 29 Conexión Y- $\Delta$  [6].

- d) **Conexión  $\Delta$ - $\Delta$ :** La conexión  $\Delta$ - $\Delta$  se muestra en la figura 30. Esta conexión se utiliza en transformadores de B.T. ya que se necesitan más espiras/fase de menor sección. Se comporta bien frente a cargas desequilibradas. La ausencia de neutro puede ser a veces una desventaja. Este montaje puede trabajar al 58 por 100 de la potencia asignada trabajando como triángulo abierto en el caso de un banco trifásico con transformadores monofásicos en el que hay una unidad averiada y hay que proceder a su reparación.

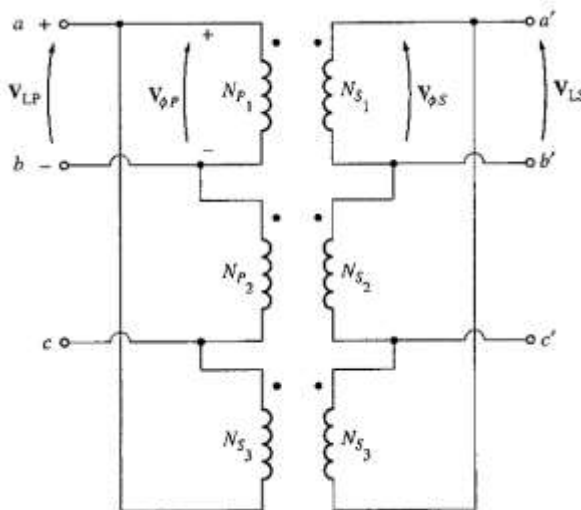
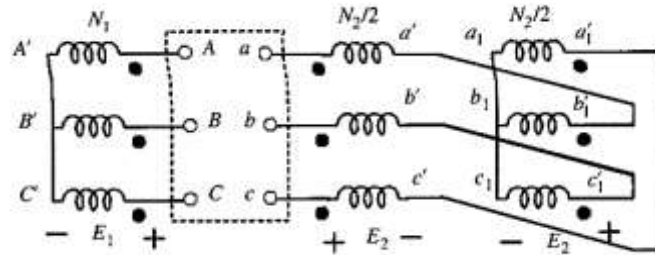


Figura 30 Conexión  $\Delta$ - $\Delta$  [6].

- e) **Conexión Y-Z:** La conexión Zig-Zag se emplea únicamente en el lado de B.T. Este montaje se utiliza en redes de distribución, ya que permite el uso de un neutro en el secundario. Se comporta bien frente a desequilibrios de cargas. Debido a la composición de tensiones del lado secundario, se requieren un 15 por 100 más de espiras que en una conexión en estrella convencional.

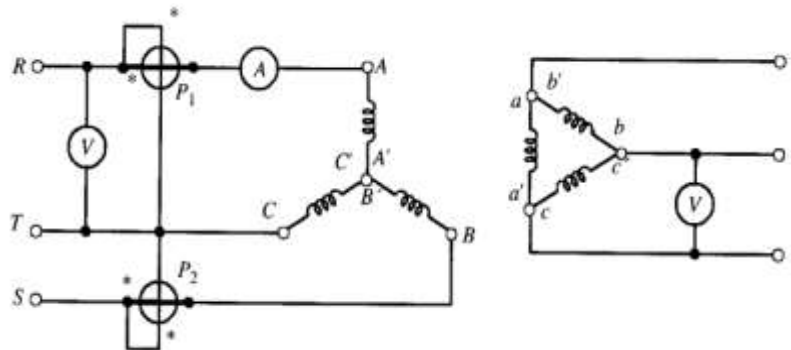


**Figura 31 Conexión Y-Z [1].**

### II.8.2 Ensayo del transformador

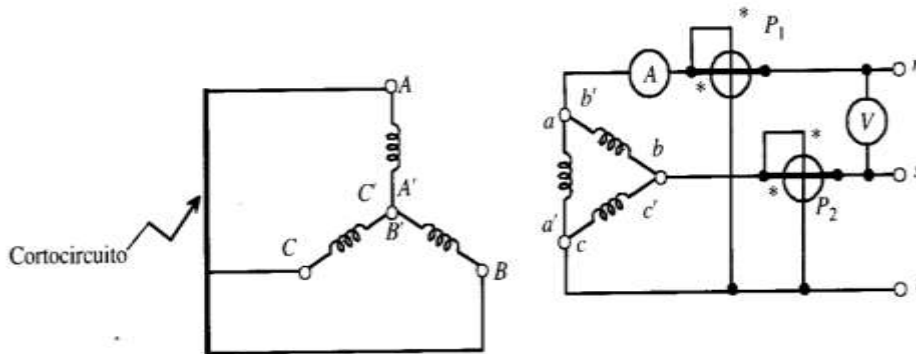
Los ensayos de un transformador representan las diversas pruebas que deben prepararse para verificar el comportamiento de la máquina. En la práctica resulta difícil la realización de ensayos reales directos por dos motivos esenciales. Primero la gran cantidad de energía que ha de disiparse en tales pruebas, segundo es prácticamente imposible disponer de cargas lo suficientemente elevadas para hacer un ensayo en situaciones reales. En la práctica para la determinación de los parámetros del circuito equivalente de un transformador son: ensayo de vacío y ensayo de cortocircuito.

Para la realización de las pruebas para transformadores trifásicos se emplean los mismos métodos que para transformadores monofásicos. Teniendo en cuenta las conexiones presentes en la máquina sean delta, estrella y Zig-Zag. Así se podrán determinar los parámetros obtenidos en las pruebas de vacío como se muestra en la figura 32. Y poder obtener el circuito equivalente replicado tres veces.



**Figura 32 Prueba de vacío transformador trifásico [1].**

Para la realización de la prueba de cortocircuito como la mostrada en la figura 33 se realizará de igual forma mostrada en el índice de ensayos de transformadores, transformando las tensiones sean de estrella, delta y Zig-Zag. Para poder obtener el circuito equivalente de un transformador monofásico y se realizarán los pasos pertinentes para dicha maquina esto podrá permitir obtener el circuito equivalente por fase la obtención del circuito equivalente total del transformador trifásico será la réplica de este mismo tres veces. [6]



**Figura 33 Prueba de cortocircuito transformador trifásico [1].**

### II.8.3. Placa de características del transformador.

La figura 34 muestra una placa de características típicas de un transformador de distribución. La información que aparece en esta placa incluye el voltaje nominal, los kilovoltamperes nominales, la frecuencia nominal y la impedancia serie por unidad. También muestra los voltajes nominales para cada toma de derivación y el esquema de cableado del transformador.

Las placas de características del transformador, como la que se muestra, incluyen normalmente la designación del tipo de transformador y referencias para su operación.



**Placa característica transformador trifásico**

### **III. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL FERROMAGNÉTICO Y EL CIRCUITO EQUIVALENTE EN TRANSFORMADORES**

#### **III.1 Metodología para la obtención de las características del material ferromagnético.**

Para la obtención de las características del material se tuvieron en cuenta las características propias de los materiales presentes en los núcleos del transformador, que en este caso son materiales ferromagnéticos, por su capacidad de imanación grande debido a la permeabilidad relativa de estos materiales ( $\mu_r \gg 1$  ( $X_m$  tiene un valor elevado)).

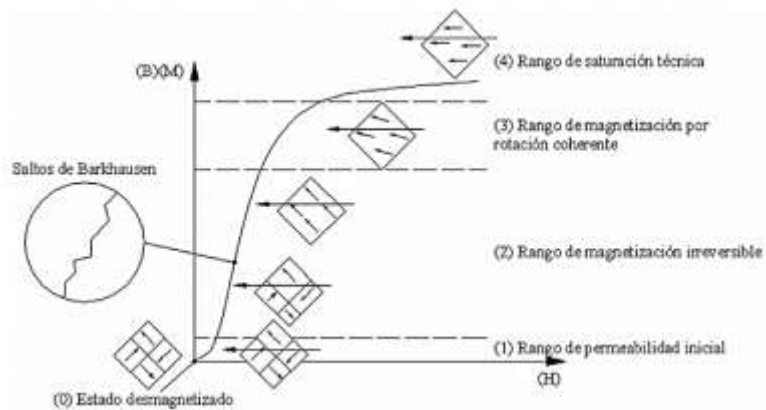
El ferromagnetismo es similar al ferrimagnetismo, con la diferencia que ahora los espines se orientan en paralelo el uno con el otro como resultado de una interacción que actúa entre espines vecinos. Al igual que en el ferrimagnetismo, sin aplicar un campo externo aparece una magnetización espontánea que desaparece cuando la temperatura del material llega a la temperatura de Curie, por encima de la cual el material se comporta como un paramagnético. A pesar de la magnetización espontánea, un bloque de material ferromagnético generalmente no está magnetizado, sino que 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 en algunos casos de muy fuerte acoplamiento cuando se retira el campo, creando un imán permanente.

Las características esenciales del ferromagnetismo son:

- La susceptibilidad magnética es positiva y grande y la permeabilidad relativa es entonces mucho mayor que 1.

- 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.

Se analizan a continuación los procesos en los dominios, así como 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 6. Retomada del marco teórico.



**Figura 6. Curva de magnetización [4].**

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 una espira.
- Numero de vueltas.
- Prueba de vacío al 10%, 50% y 100% de la tensión nominal.
- Obtención del ciclo de histéresis
- Perdidas 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 sacara un promedio para así poder obtener la magnitud de estas variables eléctricas y aplicando la ecuación de ohm mostrada en la siguiente ecuación podremos obtener el valor de la resistencia en Dc que vendría siendo el valor de nuestra resistencia total.

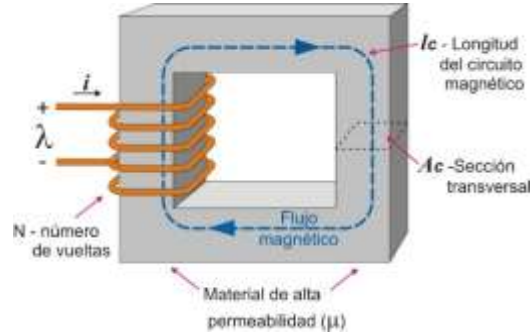
$$R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} [\Omega] \quad \text{Ecuación 39}$$

- **Dimensiones del núcleo**

Las dimensiones del transformador están dadas a partir del tipo de núcleo al que se le realizaran las pruebas, los núcleos con los que se trabajara 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.

- **Núcleo acorazado**

El núcleo de columna es el que se muestra en la siguiente figura 34.



**Figura 34 Transformador monofásico [7].**

Los parámetros para poder obtener la sección del núcleo, se pedirán tanto el ancho y la profundidad del núcleo. Y se realizara a partir de la siguiente expresión.

$$AREA = Ancho \times Profundidad [cm] \quad \text{Ecuación 40}$$

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

$$Rl = \frac{2 * Ll}{A * \mu}$$

$$Rparalela = \frac{1}{2} * 2 \frac{Ll}{A * \mu} = \frac{Ll}{A * \mu}$$

$$Rcentral = \frac{Lc}{A * \mu}$$

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

Dónde:  $F=R*\phi$

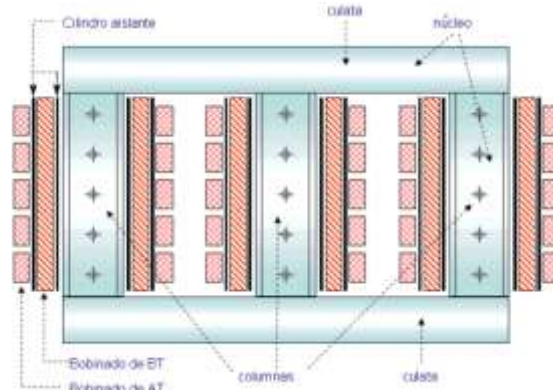
$$F = \left[ \frac{1}{A * \mu} (Lc + Ll) \right] * \phi \quad \text{Ecuación 41}$$

La longitud media magnética es:

$$Lmedia = Lcentral + Llateral [cm] \quad \text{Ecuación 42}$$

### Transformador tipo columna

Los parámetros para poder obtener la sección del núcleo, se pedirán tanto el ancho y la profundidad del núcleo, sabiendo que para un transformador trifásico no importa la columna a la que se le quiera medir los parámetros debido a que las tres columnas disponen de sus mismas secciones y se hallara el área a partir de la siguiente expresión.



**Figura 35 Transformador trifásico [7].**

$$\text{ÁREA} = \text{Ancho} \times \text{Profundidad [cm]}$$

Ecuación 43

La longitud media se obtendrá a través del siguiente análisis transformador trifásico.

La reluctancia paralela de las dos columnas es:

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

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

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

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

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

Ecuación 44

Dónde:  $F=R*\phi$



$$F = \frac{1}{\mu * A} \left[ \frac{Ll^2 + 2Ll * Lc}{Lc + Ll} \right] * \phi \quad \text{Ecuación 45}$$

La longitud media magnética es:

$$L_{media} = \frac{Ll^2 + 2Ll * Lc}{Lc + Ll} \quad [cm] \quad \text{Ecuación 46}$$

- **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:

$$Longitud\ conductor = ((2 * ancho) + (2 * profundidad)) * 1.25 \quad [m] \quad \text{Ecuación 47}$$

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

**Tabla 1 Características conductor eléctrico.**

AWG	Diam.mm	Area mm <sup>2</sup>	AWG	Diam.mm	Area mm <sup>2</sup>
<b>1</b>	7,35	42,4	<b>16</b>	1,29	1,31
<b>2</b>	6,54	33,6	<b>17</b>	1,15	1,04
<b>3</b>	5,86	27	<b>18</b>	1,024	0,823
<b>4</b>	5,19	21,2	<b>19</b>	0,912	0,653
<b>5</b>	4,62	16,8	<b>20</b>	0,812	0,519
<b>6</b>	4,11	13,3	<b>21</b>	0,723	0,412
<b>7</b>	3,67	10,6	<b>22</b>	0,644	0,325
<b>8</b>	3,26	8,35	<b>23</b>	0,573	0,259
<b>9</b>	2,91	6,62	<b>24</b>	0,511	0,205
<b>10</b>	2,59	5,27	<b>25</b>	0,455	0,163
<b>11</b>	2,3	4,15	<b>26</b>	0,405	0,128
<b>12</b>	2,05	3,31	<b>27</b>	0,361	0,102
<b>13</b>	1,83	2,63	<b>28</b>	0,321	0,0804
<b>14</b>	1,63	2,08	<b>29</b>	0,286	0,0646
<b>15</b>	1,45	1,65	<b>30</b>	0,255	0,0503

A partir de la tabla 1.se seleccionará la sección teniendo en cuenta el conductor que rodea el núcleo haciendo una conversión de  $mm^2$  a metros.

La resistencia para una espira la tomamos a partir de la ecuación de resistividad mostrada en la siguiente expresión:

$$\rho = R \frac{S}{L}$$

Ecuación 48

Donde:

R: Resistencia en Ohm.

S: Sección transversal en  $m^2$ .

L: longitud del conductor en m.

- **Numero 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:

$$\text{Numero de vueltas} = \frac{\text{Resistencia total}}{\text{resistencia una espira}}$$

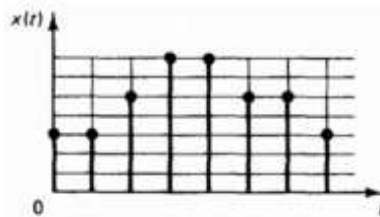
Ecuación 49

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.

- **Ensayos de vacío**

La realización de los ensayos de la prueba de vacío 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.

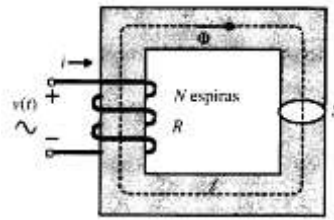
Señal de tiempo discreto es una señal definida sólo en valores discretos de tiempo (esto es, aquellos en los que la variable independiente  $t$  está cuantificada). En una señal en tiempo discreto, si la amplitud puede adoptar valores en un intervalo continuo, entonces la señal se denomina señal de datos muestreados. Una señal de datos muestreados se puede generar muestreando una señal analógica en valores discretos de tiempo. Ésta es una señal de pulsos modulada en amplitud como se muestra en la figura 36.



**Figura 36 Señal en tiempo discreto [1].**

Después de pasar la señal del tiempo discreto, se continua 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.

Los pasos para obtener el nivel de inducción se muestran a continuación:



**Figura 37 Bobina con núcleo de hierro [1].**

Si se alimenta la bobina con una tensión expresada de la siguiente forma:

$$V(t) = \sqrt{2}V \cos \omega t \quad \text{Ecuación 50}$$

Donde  $V$  expresa el valor eficaz de la tensión alterna aplicada y  $\omega = 2\pi f$ . En este caso se producirá una corriente de circulación  $i(t)$  que provocará un flujo  $\phi(t)$  en el núcleo. Este flujo variable dará lugar a una f.e.m. inducida en la bobina, de tal modo que si se aplica el segundo lema de Kirchhoff al circuito de la figura 37 se cumplirá de acuerdo con la siguiente expresión.

$$V = Ri + N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{Ecuación 51}$$

Suponiendo que la caída de tensión en la resistencia de la bobina es pequeña en comparación con la f.e.m. inducida, la ecuación anterior se puede escribir:

$$V = N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{Ecuación 52}$$

De donde deducimos que el valor del flujo  $\phi(t)$ :

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \int V \cdot dt = \frac{\sqrt{2}}{N\omega} V \sin \omega t \quad \text{Ecuación 53}$$

La constante de integración es nula siempre que se considere que en  $t=0$  no existe magnetismo remanente en el núcleo. Donde el flujo máximo  $\phi_m$  vale:

$$\phi_m = \frac{\sqrt{2}V}{N\omega} \quad \text{Ecuación 54}$$

Y teniendo en cuenta que  $\omega = 2\pi f$ , la relación anterior se puede escribir:

$$V = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} * f N \phi_m = 4.44 f N \phi_m \quad \text{Ecuación 55}$$

Determinando así el valor del flujo podremos saber así el valor de la inducción máxima de campo magnético B[Teslas], y se puede representar de la siguiente forma:

$$B = \frac{\phi}{A} \quad [T] \quad \text{Ecuación 56}$$

Este valor de inducción máximo se obtendrá para cada variación de la tensión al 10% al 50% y la prueba realizada a tensión nominal.

- **Obtención del ciclo de histéresis:**

Para la obtención del ciclo de histéresis del material con el que se pretende hallar dependiendo del tipo de transformador de trabajo, se realizara el mismo análisis respectivo anterior mente. Primero se adquirirán los datos de tensión y corriente de una manera discreta, luego se les realizara un análisis numérico a estos datos obteniendo así el área bajo la curva pudiendo trabajar de una manera continua.

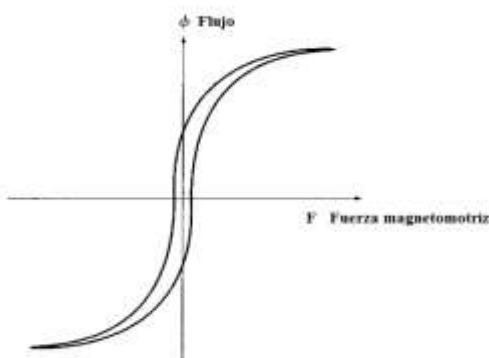
El valor de la inducción del campo magnético ya obtenida a partir del análisis mostrado anterior teniendo en cuenta la variación del flujo magnético a través del valor de tensión, para podrá obtener el valor de intensidad de campo magnético se realizará el análisis respectivo:

- Se obtendrá el valor de corriente a través del tiempo
- Se tendrá el valor de la longitud media magnética.

Teniendo presente estos dos criterios mencionados partiremos a realizar el valor de la intensidad de campo magnético (H) [AV/m]

$$F.m.m = A * V \quad \text{Ecuación 57}$$

Al graficar el flujo magnético vs fuerza magnetomotriz podremos obtener el ciclo de histéresis como se muestra en la siguiente figura 38.



**Figura 38 Ciclo de histéresis transformador [2].**

La intensidad de campo magnético es igual:

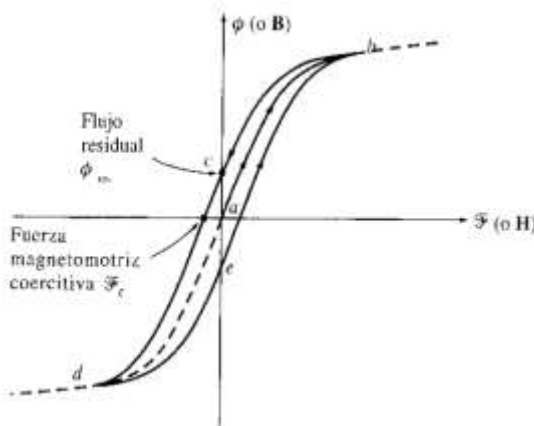
$$H = \frac{F.M.M}{L} \quad \text{Ecuación 58}$$

Donde:

F.M.M: Es la fuerza magnetomotriz es aquella que es capaz de producir un flujo magnético entre dos puntos de un circuito magnético.

L: Es la longitud del circuito magnético.

al aplicar directamente el flujo y la intensidad de campo magnético presente en el transformador siendo atravesado por una corriente a través del tiempo  $i(t)$  se tendrán presentes algunas pérdidas. Cuando esta corriente se incrementa la corriente por primera vez, el flujo en el núcleo sigue la trayectoria ab, mostrada en la figura 39. Esta es básicamente la curva de saturación, sin embargo, cuando la corriente decrece, el flujo representado en la curva sigue una trayectoria diferente de la seguida cuando la corriente iba en aumento. Cuando la corriente va decreciendo, el flujo en el núcleo sigue la trayectoria de b. Donde vemos que la cantidad de flujo presente en el núcleo depende no solo de la cantidad de corriente aplicada a los devanados del núcleo, sino también de la historia previa del flujo presente en el núcleo. Esta dependencia de la historia previa del flujo y el seguir una trayectoria diferente en la curva, se denomina histéresis.



**Figura 39** Curva de histéresis presente en el núcleo cuando se le aplica una corriente  $i(t)$  [2].

- **Pérdidas presentes en el material.**

Las pérdidas presentes en el núcleo ferromagnético son: las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault mostradas en el capítulo anterior sección II.5. 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:

$$Ph1 + Pf1 = Pvacio \text{ al } 10\% \text{ tensión nominal} \quad \text{Ecuación 59}$$

$$Ph2 + Pf2 = Pvacio \text{ al } 50\% \text{ tensión nominal} \quad \text{Ecuación 60}$$

$$Ph3 + Pf3 = Pvacio \text{ a tensión nominal} \quad \text{Ecuación 61}$$

$$Ph1 = MfBmax1^\alpha \quad \text{Ecuación 62}$$

$$Ph2 = MfBmax2^\alpha \quad \text{Ecuación 63}$$

$$Ph3 = MfBmax3^\alpha \quad \text{Ecuación 64}$$

$$Pf1 = Nf^2Bmax1^2 \quad \text{Ecuación 65}$$

$$Pf2 = Nf^2Bmax2^2 \quad \text{Ecuación 66}$$

$$Pf3 = Nf^2Bmax3^2 \quad \text{Ecuación 67}$$

Tenemos así un sistema de ecuaciones no lineales donde:

Bmax1: Inducción máxima obtenido en la prueba de vacío al 10% de la tensión nominal.

Bmax2: Inducción máxima obtenida en la prueba de vacío al 50% de la tensión nominal

Bmax3: Inducción máxima obtenida en la prueba de vacío a la tensión nominal.

f: Frecuencia con la que se desarrollaron las pruebas.

$\alpha$ : Exponente de Steinmertz

M: Representa parámetros constantes en este caso es ( $K_H \text{Vol}$ ),  $K_H$  varia con respecto al material, Vol es el volumen del material ferromagnético.

N: Representa parámetros constantes ( $K_F a^2 \sigma$ ),  $K_F$  es igual a  $\pi^2/6$ , a es el ancho de la lámina y  $\sigma$  es la conductividad del material.

Al tener el sistema de ecuaciones observamos que es un sistema de ecuaciones no lineales debido a que la solución de ecuaciones no lineales se utilizara el método de Newton Raphson que es un método para resolver ecuaciones algebraicas no lineales. Funciona más rápidamente y es seguro que converge en la mayor parte de los casos. 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.

La solución de este sistema de ecuaciones se describe a continuación:

Las condiciones iniciales son:

$ph1=1$ ;  $ph2=1$ ;  $ph3=1$ ;  $pf1=1$ ;  $pf2=1$ ;  $pf3=1$ ;  $N=2$ ;  $M=2$ ;  $alfa=1.2$ ;  $Bmax1$ ;  $Bmax2$ ;  $Bmax3$ .  
el segundo paso es igualar las funciones descritas anteriormente a cero:

$$f1; Ph1 + Pf1 - Pvacio \text{ al } 10\% = 0 \quad \text{Ecuación 68}$$

$$f2; Ph2 + Pf2 - Pvacio \text{ al } 50\% = 0 \quad \text{Ecuación 69}$$

$$f3; Ph3 + Pf3 - Pvacio = 0 \quad \text{Ecuación 70}$$

$$f4; Ph1 - MfBmax1^\alpha = 0 \quad \text{Ecuación 71}$$

$$f5; Ph2 - MfBmax2^\alpha = 0 \quad \text{Ecuación 72}$$

$$f6; Ph3 - MfBmax3^\alpha = 0 \quad \text{Ecuación 73}$$

$$f7; Pf1 - Nf^2Bmax1^2 = 0 \quad \text{Ecuación 74}$$

$$f8; Pf2 - Nf^2Bmax2^2 = 0 \quad \text{Ecuación 75}$$

$$f9; Pf3 - Nf^2Bmax3^2 = 0 \quad \text{Ecuación 76}$$

Luego hayamos el vector de deltas:

$$\Delta f1 = 0 - Ph1 + Pf1 - Pvacio \text{ al } 10\% \quad \text{Ecuación 77}$$

$$\Delta f2 = 0 - Ph2 + Pf2 - Pvacio \text{ al } 50\% \quad \text{Ecuación 78}$$

$$\Delta f3 = Ph3 + Pf3 - Pvacio \quad \text{Ecuación 79}$$

$$\Delta f4 = Ph1 - MfBmax1^\alpha \quad \text{Ecuación 80}$$

$$\Delta f5 = Ph2 - MfBmax2^\alpha \quad \text{Ecuación 81}$$

$$\Delta f6 = Ph3 - MfBmax3^\alpha \quad \text{Ecuación 82}$$

$$\Delta f7 = Pf1 - Nf^2Bmax1^2 \quad \text{Ecuación 83}$$

$$\Delta f8 = Pf2 - Nf^2Bmax2^2 \quad \text{Ecuación 84}$$

$$\Delta f9 = Pf3 - Nf^2Bmax3^2 \quad \text{Ecuación 85}$$

El siguiente paso es realizar la matriz jacobiana [**J**] que se obtiene al diferenciar el vector de las enésimas ecuaciones en este trabajo las ecuaciones a las que se le realizara su respectiva derivada son las ecuaciones 68 a la 76. La forma de la matriz con respecto a sus derivadas queda de la siguiente forma:

$f1$	$\frac{\partial f1}{\partial ph1}$	$\frac{\partial f1}{\partial ph2}$	$\frac{\partial f1}{\partial ph3}$	$\frac{\partial f1}{\partial pf1}$	$\frac{\partial f1}{\partial pf2}$	$\frac{\partial f1}{\partial pf3}$	$\frac{\partial f1}{\partial M}$	$\frac{\partial f1}{\partial N}$	$\frac{\partial f1}{\partial \alpha}$	$\Delta 1$	$0$	Ecuación 86
$f2$	$\frac{\partial f2}{\partial ph1}$	$\frac{\partial f2}{\partial ph2}$	$\frac{\partial f2}{\partial ph3}$	$\frac{\partial f2}{\partial pf1}$	$\frac{\partial f2}{\partial pf2}$	$\frac{\partial f2}{\partial pf3}$	$\frac{\partial f2}{\partial M}$	$\frac{\partial f2}{\partial N}$	$\frac{\partial f2}{\partial \alpha}$	$\Delta 2$	$0$	
$f3$	$\frac{\partial f3}{\partial ph1}$	$\frac{\partial f3}{\partial ph2}$	$\frac{\partial f3}{\partial ph3}$	$\frac{\partial f3}{\partial pf1}$	$\frac{\partial f3}{\partial pf2}$	$\frac{\partial f3}{\partial pf3}$	$\frac{\partial f3}{\partial M}$	$\frac{\partial f3}{\partial N}$	$\frac{\partial f3}{\partial \alpha}$	$\Delta 3$	$0$	
$f4$	$\frac{\partial f4}{\partial ph1}$	$\frac{\partial f4}{\partial ph2}$	$\frac{\partial f4}{\partial ph3}$	$\frac{\partial f4}{\partial pf1}$	$\frac{\partial f4}{\partial pf2}$	$\frac{\partial f4}{\partial pf3}$	$\frac{\partial f4}{\partial M}$	$\frac{\partial f4}{\partial N}$	$\frac{\partial f4}{\partial \alpha}$	$\Delta 4$	$0$	
$f5$	$\frac{\partial f5}{\partial ph1}$	$\frac{\partial f5}{\partial ph2}$	$\frac{\partial f5}{\partial ph3}$	$\frac{\partial f5}{\partial pf1}$	$\frac{\partial f5}{\partial pf2}$	$\frac{\partial f5}{\partial pf3}$	$\frac{\partial f5}{\partial M}$	$\frac{\partial f5}{\partial N}$	$\frac{\partial f5}{\partial \alpha}$	$\Delta 5$	$0$	
$f6$	$\frac{\partial f6}{\partial ph1}$	$\frac{\partial f6}{\partial ph2}$	$\frac{\partial f6}{\partial ph3}$	$\frac{\partial f6}{\partial pf1}$	$\frac{\partial f6}{\partial pf2}$	$\frac{\partial f6}{\partial pf3}$	$\frac{\partial f6}{\partial M}$	$\frac{\partial f6}{\partial N}$	$\frac{\partial f6}{\partial \alpha}$	$\Delta 6$	$0$	
$f7$	$\frac{\partial f7}{\partial ph1}$	$\frac{\partial f7}{\partial ph2}$	$\frac{\partial f7}{\partial ph3}$	$\frac{\partial f7}{\partial pf1}$	$\frac{\partial f7}{\partial pf2}$	$\frac{\partial f7}{\partial pf3}$	$\frac{\partial f7}{\partial M}$	$\frac{\partial f7}{\partial N}$	$\frac{\partial f7}{\partial \alpha}$	$\Delta 7$	$0$	
$f8$	$\frac{\partial f8}{\partial ph1}$	$\frac{\partial f8}{\partial ph2}$	$\frac{\partial f8}{\partial ph3}$	$\frac{\partial f8}{\partial pf1}$	$\frac{\partial f8}{\partial pf2}$	$\frac{\partial f8}{\partial pf3}$	$\frac{\partial f8}{\partial M}$	$\frac{\partial f8}{\partial N}$	$\frac{\partial f8}{\partial \alpha}$	$\Delta 8$	$0$	
$f9$	$\frac{\partial f9}{\partial ph1}$	$\frac{\partial f9}{\partial ph2}$	$\frac{\partial f9}{\partial ph3}$	$\frac{\partial f9}{\partial pf1}$	$\frac{\partial f9}{\partial pf2}$	$\frac{\partial f9}{\partial pf3}$	$\frac{\partial f9}{\partial M}$	$\frac{\partial f9}{\partial N}$	$\frac{\partial f9}{\partial \alpha}$	$\Delta 9$	$0$	



El siguiente paso es ingresar las derivadas de las ecuaciones el vector de deltas como se muestra en la siguiente ecuación:

$\begin{bmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \\ f4 \\ f5 \\ f6 \\ f7 \\ f8 \\ f9 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -fBmax1^\alpha & 0 & -MfBmax1^\alpha \ln(bm1) \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -fBmax2^\alpha & 0 & -MfBmax2^\alpha \ln(bm2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -fBmax3^\alpha & 0 & -MfBmax3^\alpha \ln(bm3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & f^2Bmax1^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & f^2Bmax2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & f^2Bmax3^2 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta1 \\ \Delta2 \\ \Delta3 \\ \Delta4 \\ \Delta5 \\ \Delta6 \\ \Delta7 \\ \Delta8 \\ \Delta9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	Ecuación 87
--	--	-------------

Como esta matriz corresponde a un sistema de ecuaciones algebraicas se le aplica la inversa a la matriz jacobiana [J] y se multiplica por el vector de deltas la solución nos dan las siguientes condiciones iniciales y así se seguirá iterando hasta que se satisfaga para cualquier exactitud deseada en este caso la exactitud es de 0.00000001. Los resultados esperados para cada una de las pérdidas obtenidas en cada test de vacío siendo de nuestro trabajo tanto las pérdidas de histéresis y de Foucault a tensión nominal. [8]

- **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 mostrada en la ecuación 14 de la sección II.5.2. Al despejar el valor de conductividad de la ecuación obtenemos la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{Pf}{KfBmax^2 f^2 a^2 Vd} [S/m] \quad \text{Ecuación 88}$$

Donde:

Pf= Pérdidas de Foucault a tensión nominal.

Kf=  $\pi^2/6$ .

Bmax= Valor máximo de inducción magnética a tensión nominal.

f= Frecuencia en la que se realizó la prueba.

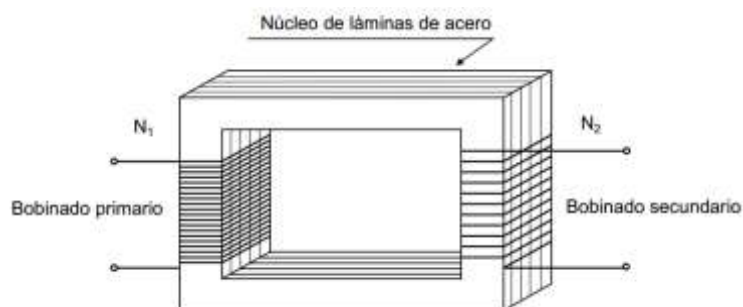
a= Ancho de la lámina que conforma el núcleo del transformador.

Vd= Volumen del núcleo del transformador

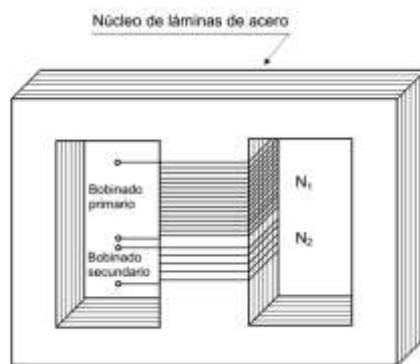
### III.2 características del transformador monofásico

Un transformador monofásico está formado por un núcleo compuesto de láminas de hierro y dos bobinados, a los cuales denominaremos primario y secundario.

El bobinado primario con “N1” espiras es aquel por el cual ingresa la energía y el secundario con “N2” espiras es aquel por el cual se suministra dicha energía



**Figura 40** Esquema de un transformador monofásico del tipo núcleo [5].



**Figura 41** Esquema de un transformador monofásico del tipo acorazado [5]

Los bobinados del transformador monofásico del tipo acorazado se ubican en la rama central, logrando con este sistema reducir el flujo magnético disperso de ambos bobinados, colocando generalmente el bobinado de baja tensión en la parte interna y el devanado de mayor tensión rodeando a este en la parte externa.

Para la obtención de los modelos circuitales del transformador:

- Circuito equivalente del transformador exacto.
- Circuito equivalente del transformador aproximado.
- Circuito equivalente del transformador aproximado aproximado.
- Circuito corriente de falta.

Para poder obtener los modelos mencionados anteriormente se llevarán a cabo las pruebas descritas en el capítulo 1, que son la prueba de DC, la prueba de vacío y la prueba de cortocircuito.

### Prueba DC

La realización de esta prueba se llevará a cabo de la siguiente manera

- Primero se tendrá en cuenta la conexión pertinente para poder realizar esta prueba.
- luego se adquieren los datos de manera discreta a una frecuencia de 24KS/s por canal con los equipos pertinentes.

- La magnitud de tensión en DC que se le desee ingresar al devanado será acorde a la estipulada por la persona que esté realizando la prueba para su correcta visualización.
- Luego a esta onda de tensión y de corriente se obtendrá su valor promedio.
- Se hallará el valor de la resistencia de DC que será las pérdidas presentes en el cobre que conforma el bobinado de alta tensión o donde se desee realizar la prueba. Como se expresa en la siguiente ecuación: [5]

$$R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad \text{Ecuación 89}$$

### 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. Teniendo presente esto en la figura 42 se muestra el circuito equivalente en vacío del transformador. [1]

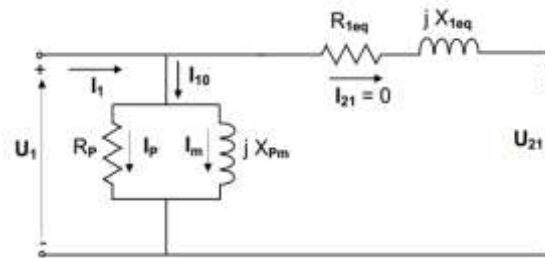


Figura 42 Circuito equivalente en vacío de un transformador [5].

Los parámetros del circuito tanque son los descritos en el capítulo II, sección II.7.1

La realización de esta prueba se llevará a cabo teniendo la conexión pertinente como se muestra en la figura 43. La obtención de los parámetros del circuito tanque se obtendrán de la siguiente manera

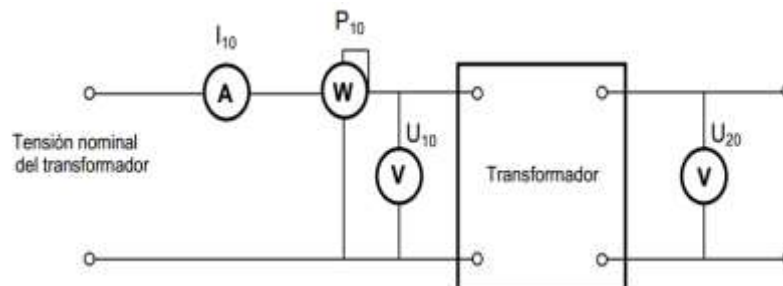


Figura 43 Conexión ensayo de vacío transformador monofásico [5].

- Primero se tendrá en cuenta la conexión de los equipos y la disposición 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 vacío que tendrá inmersa las pérdidas por histéresis como de Foucault presentes en el núcleo del transformador.
- Luego se hallará el valor del factor de potencia de la siguiente manera:

$$Fp = \frac{P_{vacio}}{V_{rms} * I_{rms}} \quad \text{Ecuación 90}$$

- 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 y descritas en el capítulo II sección II.7.1.

$$IFE = I_o \cos \phi_o \quad ; \quad I_\mu = I_o \sin \phi_o$$

- 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:

$$RFE = \frac{V1}{IFE} \quad ; \quad X_\mu = \frac{V1}{I_\mu}$$

Este ensayo se puede realizar alimentando el transformador tanto del primario, como del secundario, con las tensiones nominales correspondientes al lado en cuestión, ya que en ambos casos el flujo que se tiene en el núcleo es el mismo, con lo que el valor de las pérdidas en el hierro es el mismo, salvo que los parámetros del circuito equivalente que se obtienen, estarán referidos al lado del cual se efectuó el ensayo.

El flujo magnético en el núcleo está determinado por la tensión de alimentación:

$$\phi(\text{alimentando desde el primario}) = \frac{V_{primario}}{4,44 * f * N1} \quad \text{Ecuación 91}$$

$$\phi(\text{alimentando desde el secundario}) = \frac{V_{secundario}}{4,44 * f * N2} \quad \text{Ecuación 92}$$

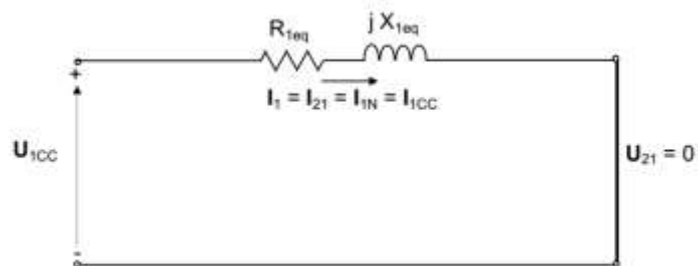
Relacionando la ecuación 91 con la ecuación 92 obtenemos que el flujo del primario y del secundario se mantiene igual. [5]

### Ensayo 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.

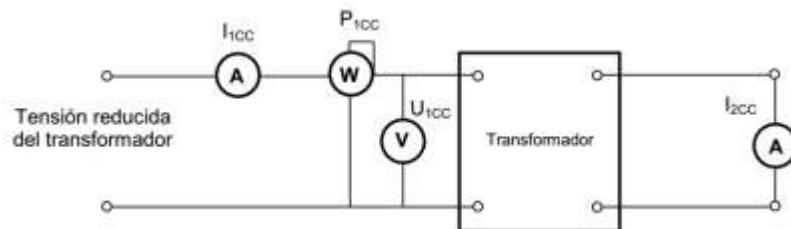
Debido a que el valor de la tensión que se debe aplicar es del orden del 5% de la tensión nominal, en la rama de excitación tendremos una corriente, que será unas veinte veces menor que la corriente de vacío con la tensión nominal.

Como a su vez la corriente de vacío a plena tensión es del orden del 5% de la corriente nominal, la corriente en este ensayo será de aproximadamente 400 veces más pequeña que la nominal, con lo cual podemos despreciar la misma y retirar del circuito equivalente la rama en paralelo de acuerdo a esto el circuito nos queda de la siguiente manera visto en la figura 44.



**Figura 44 Circuito equivalente en cortocircuito de un transformador [5].**

Los parámetros del circuito son los descritos en el capítulo II, sección II.7.2 La realización de esta prueba se llevará a cabo teniendo la conexión pertinente como se muestra en la figura 45. La obtención de los parámetros del circuito se describe a continuación: [5]



**Figura 45 Circuito de ensayo de cortocircuito [5].**

- Primero se tendrá en cuenta la conexión de los equipos y la disposición 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:

$$Fp = \frac{P_{cortocircuito}}{V_{cortocircuito} * I_{nominal}}$$

Ecuación 93

- Luego podemos hallar los parámetros como se explica en el capítulo II sección II.7.2, los parámetros que se hallaran son los siguientes:

$$VR_{cc} = R_{cc} * I_{1n} = V_{1cc} \cos \phi_{cc}$$

$$VX_{cc} = X_{cc} * I_{1n} = V_{1cc} \sin \phi_{cc}$$

Para obtener los parámetros del circuito equivalente se hayan como se muestra en la sección II.7.2 la resistencia de cortocircuito se haya de acuerdo a la ecuación 25, 26, 27 y 28.

- Después se haya la regulación de cortocircuito de acuerdo a la ecuación 32.
- Por último, se haya la corriente de falla 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  $I_{falla}$  se haya como lo estipula la ecuación 35 del capítulo II sección II.7.2.
- Obteniendo los parámetros del transformador por último es muestra los modelos circuitales del transformador como son: circuito equivalente del transformador exacto, circuito equivalente del transformador aproximado, circuito equivalente aproximado aproximado y el circuito de corriente de falta mostrado en las figuras 16, 17 18 y 23.

### III.3 Características transformador trifásico

A partir de las ciertas potencias, los transformadores son trifásicos, pudiéndose armar un conjunto o “banco” trifásico, mediante el uso de tres transformadores monofásicos o bien un solo transformador trifásico, el cual se forma mediante un núcleo magnético y las bobinas necesarias para armar tres fases.

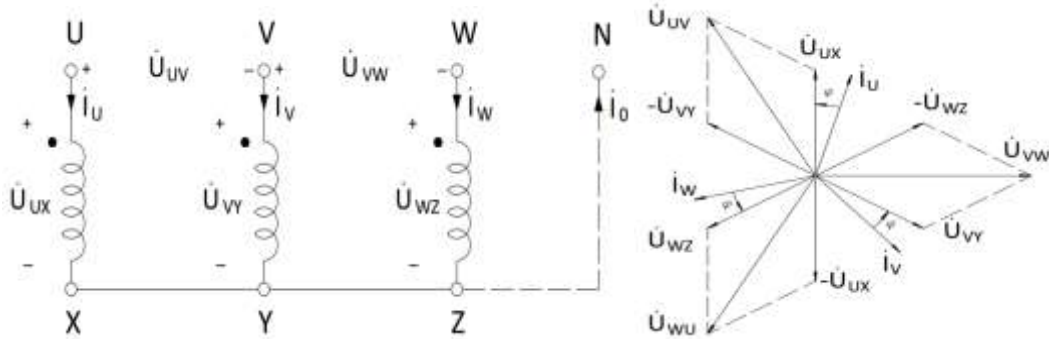
#### Conexiones normalizadas

De acuerdo a la forma que se conectan los bobinados, los conjuntos trifásicos, están definidos por un grupo de conexión que los identifica mediante una nomenclatura que se determina por dos letras y un número según el siguiente detalle.

- La primera letra mayúscula, define la forma de conexión de los bobinados de alta tensión, la cual puede ser D (triángulo), Y (Estrella) o y Z (Zig-Zag).
- La segunda letra minúscula, define de conexión de los bobinados de baja tensión, la cual puede ser d (triángulo), y (Estrella) o y z (Zig-Zag).
- El número que acompaña la conexión  $30^\circ$ , define el ángulo de desfasaje entre la tensión de fase equivalente de alta y baja tensión. [5]

#### Conexión estrella

Esta conexión se emplea cuando se necesita un neutro, por ejemplo en los sistemas de distribución de baja tensión, o en los sistemas de alta tensión, ya que con la misma tensión de fase se obtiene una tensión de línea que es  $\sqrt{3}$  veces mayor. En la siguiente figura 46 se muestra la conexión estrella. El diagrama fasorial para tensiones simétricas y corrientes inductivas balanceadas



**Figura 46 Conexión estrella y diagrama fasorial [5].**

Las principales relaciones entre tensiones y corrientes que se cumplen en una conexión estrella son las siguientes:

$$I_u + I_v + I_w = I_0 \quad \text{Ecuación 94}$$

$$U_{ux} - U_{vy} = U_{uv} \quad \text{Ecuación 95}$$

$$U_{vy} - U_{wz} = U_{vw} \quad \text{Ecuación 96}$$

$$U_{wz} - U_{ux} = U_{wu} \quad \text{Ecuación 97}$$

$$U_{uv} + U_{vw} + U_{wu} = 0 \quad \text{Ecuación 98}$$

Para el caso simétrico y balanceado, las relaciones entre los módulos de las tensiones y de las corrientes son:

$$U_{\text{linea}} = \sqrt{3}U_{\text{fase}} \quad \text{Ecuación 99}$$

$$I_{\text{linea}} = I_{\text{fase}}$$

### Conexión triángulo

Esta conexión se emplea cuando no se necesita neutro o una tensión de línea muy elevada. Favorece el comportamiento del transformador frente a cargas asimétricas y armónicos frecuentemente se emplea combinada con una conexión estrella. En la siguiente figura se muestra la conexión en triángulo y el diagrama fasorial para tensiones simétricas y corrientes inducidas balanceadas.

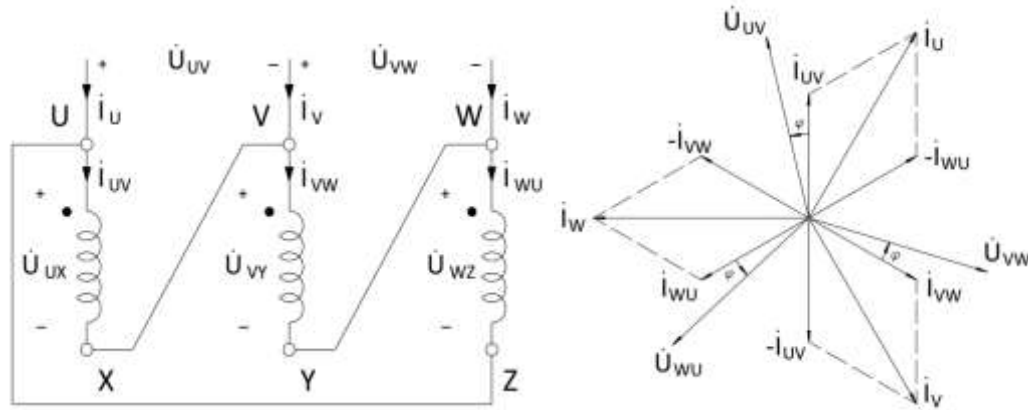


Figura 47 Conexión triángulo y diagrama fasorial [5].

Las principales relaciones entre tensiones y corrientes que se cumplen en una conexión triángulo son las siguientes:

$$I_{uv} - I_{wu} = I_u \quad \text{Ecuación 100}$$

$$I_{vw} - I_{uv} = I_v \quad \text{Ecuación 101}$$

$$I_{wu} - I_{vw} = I_w \quad \text{Ecuación 102}$$

$$I_u + I_v + I_w = 0 \quad \text{Ecuación 103}$$

Para el caso simétrico y balanceado, las relaciones entre los módulos de las tensiones y de las corrientes son:

$$\begin{aligned} U_{\text{linea}} &= U_{\text{fase}} \\ I_{\text{linea}} &= \sqrt{3} I_{\text{fase}} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 104}$$

### Conexión Zig-Zag

Para poder realizar una conexión zig-zag simétrica, es necesario que cada fase esté dividida en dos partes iguales (semifases). Luego se conectan dos mitades, pertenecientes a fases distintas, en serie sustractiva (uniendo final con final o principio con principio) y las fases así formadas se conectan en estrella como se muestra en la figura. Como también su diagrama fasorial.

Si el Zig-Zag las tensiones aplicadas son balanceadas, todo el diagrama fasorial debe quedar inscrito en un triángulo equilátero con sus tensiones paralelas a los lados del mismo. Las



tensiones de fase son las que van del centro o a los vértices u, v y w y las de línea son las comprendidas entre los vértices u, v y w. De acuerdo a estos criterios resultan:

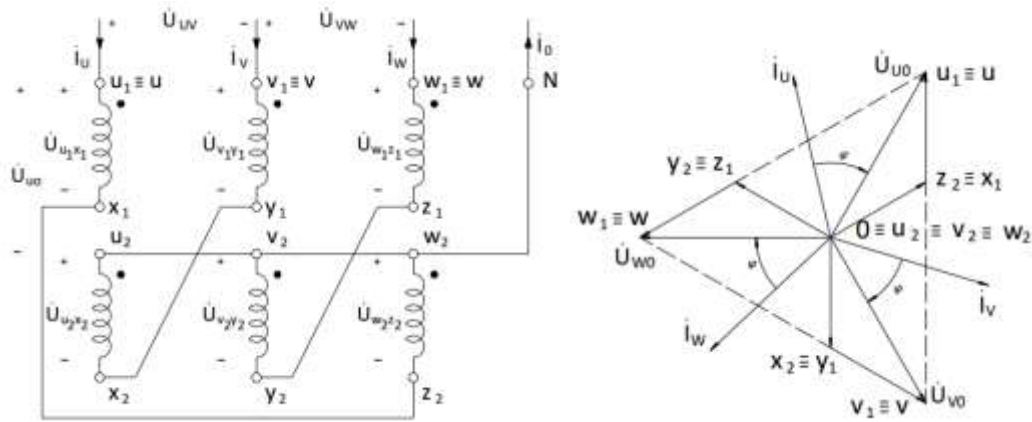


Figura 48 Conexión Zig-Zag y diagrama fasorial [5].

Tensiones de media fase( $U_f$ ):

$$U_{u1x1}, U_{u2x2} \quad \text{Ecuación 105}$$

$$U_{v1y1}, U_{v2y2} \quad \text{Ecuación 106}$$

$$U_{w1z1}, U_{w2z2} \quad \text{Ecuación 107}$$

Tensiones de fase( $U_F$ ):

$$U_{uo} = U_{u1x1} - U_{w2z2} \quad \text{Ecuación 108}$$

$$U_{vo} = U_{v1y1} - U_{u2x2} \quad \text{Ecuación 109}$$

$$U_{wo} = U_{w1z1} - U_{v2y2} \quad \text{Ecuación 110}$$

Tensiones de línea ( $U_L$ ):

$$U_{uv} = U_{uo} - U_{vo} \quad \text{Ecuación 111}$$

$$U_{uw} = U_{vo} - U_{wo} \quad \text{Ecuación 112}$$

$$U_{wu} = U_{wo} - U_{uo} \quad \text{Ecuación 113}$$

Además:

$$U_{uv} + U_{vw} + U_{wu} = 0 \quad \text{Ecuación 114}$$

$$I_u + I_v + I_w = I_0 \quad \text{Ecuación 115}$$

Para el caso simétrico y balanceado, las relaciones entre los módulos de las tensiones y de las corrientes son: [9]

$$U_{fase} = \sqrt{3}U_{mediafase} \quad \text{Ecuación 116}$$

$$U_{linea} = \sqrt{3}U_{fase} = 3U_{mediafase} \quad \text{Ecuación 117}$$

$$I_{linea} = I_{fase} = I_{mediafase} \quad \text{Ecuación 118}$$

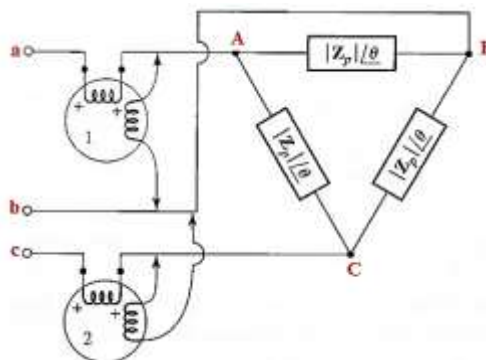
### Método de los dos Wattímetros o método de Aron

El método se utiliza en un circuito trifásico donde se intercalan dos Wattímetros en dos conductores de línea conectando las bobinas de voltaje aun punto común sobre el tercer conductor. Donde la suma algebraica de las lecturas indica la potencia activa total, independientemente de:

- El desbalance de la carga.
- El desbalance de la fuente
- La diferencia entre los dos Wattímetros
- La forma de onda de la fuente periódica

El único supuesto es que las correcciones del Wattímetro son suficientemente pequeñas como para que se puedan pasar por alto.

En el caso que las cargas sean balanceadas, el método de los dos Wattímetros permite determinar el ángulo del FP, así como la potencia activa total consumida por la carga. Suponiendo una impedancia de la carga con un ángulo de fase  $\Theta$ ; se podría utilizar una conexión en Y o en  $\Delta$  pero se supondrá la conexión en  $\Delta$  que se presenta en la figura 49. La construcción de un diagrama fasorial normal permite determinar el ángulo de fase apropiado entre las diversas tensiones y corrientes de línea por lo tanto se determinan de la siguiente manera.



**Figura 49 Conexión método de los dos Wattímetros [10].**

$$P_1 = |V_{AB}| |I_{aA}| \cos(\text{ang}V_{AB} - \text{ang}I_{aA}) \quad \text{Ecuación 119}$$

$$P_1 = VLIL \cos(30^\circ + \Theta)$$

$$P2 = |VCB||IcC|COS(angVCB - angIcC) \quad \text{Ecuación 120}$$

$$P2=VLILcos(30^\circ-\Theta)$$

La proporción entre ella se calcula mediante:

$$\frac{P1}{P2} = \frac{\cos(30^\circ + \Theta)}{\cos(30^\circ - \Theta)} \quad \text{Ecuación 121}$$

Si se desarrollan los términos coseno, la ecuación se resuelve con facilidad para tan  $\Theta$ ,

$$Tan \Theta = \sqrt{3} \frac{P2 - P1}{P2 + P1} \quad \text{Ecuación 122}$$

De tal modo, las lecturas iguales del Wattímetro indican una carga de FP unitario; las lecturas iguales y opuestas señalan una carga puramente reactiva; una lectura de P2 que es (algebraicamente) mayor que P1, indica una impedancia inductiva; y una lectura de P2 menor que P1 significa una carga capacitiva. [10]

### III.3.1 Características banco de transformadores monofásicos

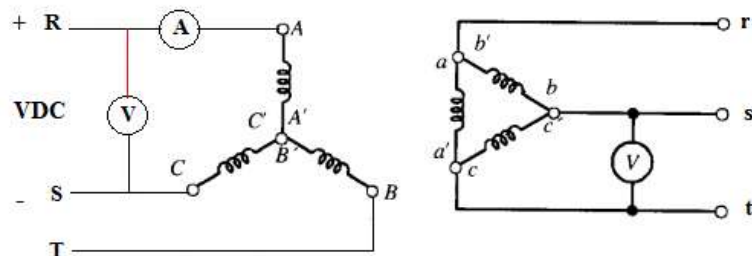
Los transformadores trifásicos resultan más pequeños y son más económicos que tres transformadores monofásicos de la misma tensión de línea y que sumen la misma potencia aparente, no obstante, cuando las potencias son muy grandes una sola unidad trifásica puede resultar muy voluminosa y de difícil transporte, en estos puede ser conveniente un banco trifásico de tres transformadores monofásicos. Para realizar la caracterización del material ferromagnético y también los modelos circuitales del transformador a trabajar se pretende realizar los siguientes pasos:

- Realizar prueba DC.
- Realizar prueba de vacío.
- Realizar prueba de cortocircuito.

#### Prueba DC

Esta prueba consiste en alimentar al transformador con una tensión de DC hasta que por el devanado circule su corriente nominal.

- Primero se tendrá encuentra la conexión pertinente para poder realizar esta prueba como se muestra en la siguiente gráfica.



**Figura 50 Conexión prueba DC.**

- luego se adquieren los datos de manera discreta a una frecuencia de 24KS/s por canal con los equipos pertinentes
- la magnitud de la tensión de DC será al observar que por el transformador circula la corriente nominal.
- Después de obtener las muestras a una frecuencia de muestreo de 24 KS/s se obtiene el valor medio de las magnitudes eléctricas.
- Por último, se halla el valor de la resistencia de acuerdo a la conexión del transformador sea estrella, delta o Zig-Zag.

El valor de la resistencia si la conexión donde se realice la prueba es delta ( $\Delta$ ):

$$R(\Delta) = \frac{3}{2} * \frac{Vdc}{Idc} \quad \text{Ecuación 123}$$

El valor de la resistencia para estrella y Zig-Zag es:

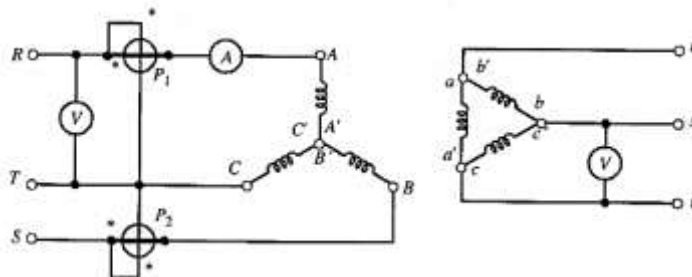
$$R(Y - Z) = \frac{1}{2} * \frac{Vdc}{Idc} \quad \text{Ecuación 124}$$

### Prueba vacío

Esta prueba consiste en aplicar al primario del transformador la tensión asignada, estando el secundario en circuito abierto. Este ensayo se realiza alimentando el devanado primario, ya que se pretende obtener el circuito equivalente reducido al primario. En la práctica real este ensayo se realiza alimentando el devanado de B.T. porque normalmente su tensión de régimen está comprendida en las escalas de los aparatos de medida empleados. Además, existe menos peligro para el operador al trabajar en B.T.

Para la realización de esta prueba se tendrá en cuenta el método de los dos Wattímetros descrito anteriormente. Con el objetivo de obtener el valor de la potencia activa total y su factor de potencia. Los pasos a tener en cuenta para la realización son los siguientes:

- Primero se tendrá presente la conexión de los equipos para realizar la prueba correctamente, un ejemplo de la conexión es el que se muestra a continuación.



**Figura 51 Conexión prueba vacío banco de transformadores monofásicos [1].**

- luego se adquieren los datos de manera discreta a una frecuencia de 24KS/s por canal con los equipos pertinentes, tanto para cada uno de los Wattímetros.

- Se hallan los valores RMS para las magnitudes de tensión y corriente para cada Wattímetro y su potencia promedio.
- Se calcula la potencia activa total presente en la maquina como la suma de ambas potencias. Y así obtener el factor de potencia a partir de la ecuación 122 utilizando el método de los dos Wattímetros explicado anteriormente.
- Se hallan las magnitudes del circuito tanque del transformador como son: corriente que atraviesa la resistencia presente en el núcleo, corriente que atraviesa la reactancia del núcleo y así obtener los parámetros de la reactancia y resistencia presente en el núcleo de acuerdo a la conexión:

#### **Conexión delta ( $\Delta$ ):**

- La corriente que atraviesa la resistencia y reactancia presente en el circuito tanque del transformador:

Se suman las corrientes adquiridas por ambos Wattímetros, luego se divide la onda obtenida entre dos para obtener el valor de la corriente RMS de línea, luego partiendo de la conexión se halla el valor de la corriente de fase y la tensión de fase de acuerdo a la ecuación 104. Y así poder obtener el valor de la corriente en la resistencia de acuerdo a la ecuación 18 del capítulo II sección II.7.1. para hallar el valor de la reactancia del núcleo se realiza con la ecuación 19, al ya tener el valor de las corrientes que circulan por los elementos que conforman el circuito tanque como se muestra en la figura 20, podemos obtener el valor de la resistencia y reactancia de magnetización de acuerdo a las ecuaciones 20 y 21.

#### **Conexión estrella (Y):**

- La corriente que atraviesa la resistencia y reactancia presente en el circuito tanque del transformador se describe a continuación:

Partimos de que en la conexión estrella hay que tener en cuenta cómo se comportan las relaciones de fase con respecto a la de línea como se describe en la sección III.3, donde se suman las tensiones adquiridas por ambos Wattímetros, luego se divide la onda obtenida entre dos para obtener el valor de la tensión RMS de línea, luego partiendo de la conexión se halla el valor de la tensión de fase, mostrada en la ecuación 99. Las corrientes son iguales para esta conexión así que el valor de esta corriente será la suma de ambas corrientes adquiridas por los Wattímetros y dividida entre dos para obtener el promedio y así poder sacar su valor RMS. Y así poder obtener el valor de la corriente en la resistencia de acuerdo a la ecuación 18 del capítulo II sección II.7.1. para hallar el valor de la reactancia del núcleo se realiza con la ecuación 19, al ya tener el valor de las corrientes que circulan por los elementos que conforman el circuito tanque como se muestra en la figura 20, podemos obtener el valor de la resistencia y reactancia de magnetización de acuerdo a las ecuaciones 20 y 21

#### **Conexión Zig-Zag (Z):**

- La corriente que atraviesa la resistencia y reactancia presente en el circuito tanque del transformador se describe a continuación:

Partimos de que en la conexión en Zig-Zag, hay que tener en cuenta cómo se comportan las relaciones de fase con respecto a la de línea como se describe en la sección III.3, donde se suman las tensiones adquiridas por ambos Wattímetros, luego se divide la onda obtenida entre dos para obtener

el valor de la tensión RMS de línea, luego partiendo de la conexión se halla el valor de la tensión de fase, mostrada en la ecuación 117. Las corrientes son iguales para esta conexión así que el valor de esta corriente será la suma de ambas corrientes adquiridas por los Wattímetros y dividida entre dos para obtener el promedio y así poder sacar su valor RMS donde la tensión de fase de línea y de media línea es la misma mostrada en la ecuación 118. Y así poder obtener el valor de la corriente en la resistencia de acuerdo a la ecuación 18 del capítulo II sección II.7.1. para hallar el valor de la reactancia del núcleo se realiza con la ecuación 19, al ya tener el valor de las corrientes que circulan por los elementos que conforman el circuito tanque como se muestra en la figura 20, podemos obtener el valor de la resistencia y reactancia de magnetización de acuerdo a las ecuaciones 20 y 21

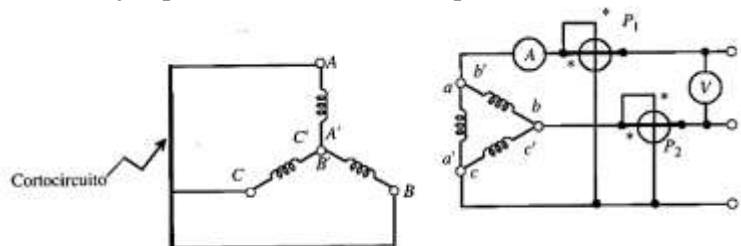
### Prueba de cortocircuito

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.

Este ensayo se realiza en la práctica alimentando el transformador por el lado de A.T. de esta forma la corriente a medir en el primario será de un valor razonable. Al mismo tiempo, la tensión de alimentación solo será una pequeña parte de la nominal, estando comprendida dentro de las escalas de los instrumentos de medida usuales.

Para la realización de esta prueba se tendrá en cuenta el método de los dos Wattímetros descrito anteriormente. Con el objetivo de obtener el valor de la potencia activa total y su factor de potencia. Los pasos a tener en cuenta para la realización de la prueba de cortocircuito son los siguientes:

- Primero se tendrá presente la conexión de los equipos para realizar la prueba correctamente, un ejemplo de la conexión es el que se muestra a continuación.



**Figura 52 Conexión prueba cortocircuito banco de transformadores monofásicos [1].**

- luego se adquieren los datos de manera discreta a una frecuencia de 24KS/s por canal con los equipos pertinentes, tanto para cada uno de los Wattímetros.
- Se hallan los valores RMS para las magnitudes de tensión y corriente para cada Wattímetro y su potencia promedio.
- Se calcula la potencia de cortocircuito total presente en la maquina como la suma de ambas potencias. Y así obtener el factor de potencia a partir de la ecuación 122 utilizando el método de los dos Wattímetros explicado anteriormente.
- A partir de tener las magnitudes partimos hallar los parámetros del transformador como son la resistencia de cortocircuito, reactancia de cortocircuito, resistencia del secundario referida al lado del primario, la reactancia referida al lado del primario y así podremos

obtener el valor de la corriente de falta como también las regulaciones de tensión en cortocircuito, cabe decir que estos parámetros dependen del tipo de conexión al en el que se encuentre el transformador.

#### **Conexión delta ( $\Delta$ ):**

Para hallar los parámetros primero debemos analizar los datos adquiridos por cada uno de los Wattímetros para obtener el valor de la resistencia de cortocircuito debemos sumar las dos ondas de corriente obtenidas por cada uno de los Wattímetros luego dividir esa señal entre dos para obtener su promedio, el siguiente paso sabemos que la conexión es delta podremos obtener su valor de corriente RMS de fase de acuerdo a la ecuación 104, para la tensión realizamos el mismo análisis y obtendremos el valor de la resistencia con la ecuación 25 y para el valor de la reactancia de cortocircuito lo único que cambiara es el desfase de la corriente y se determina con la ecuación 26.

Para hallar los otros parámetros que conforman el circuito equivalente del transformador referido al primario es el valor de la resistencia del devanado primario que la obtenemos en la realización de la prueba de DC, el valor de la resistencia del devanado secundario referida al primario se determina con la ecuación 27 y de la reactancia referida al devanado primario con la ecuación 28.

La regulación de tensión de cortocircuito se expresa en tanto por ciento, teniendo el valor de la tensión de cortocircuito presente en cada elemento visto en las ecuaciones 32, 33 y 34 como también la corriente de falla se obtiene trayendo el valor de la tensión nominal hallada en la prueba de vacío sobre la impedancia de cortocircuito pudiéndose obtener de acuerdo a las ecuaciones 35, 37 y 38 del capítulo II sección II.7.2.

#### **Conexión estrella (Y):**

Para hallar los parámetros primero debemos analizar los datos adquiridos por cada uno de los Wattímetros como la cantidad de muestras y el tiempo de adquisición para cada magnitud eléctrica (tensión y corriente), para obtener el valor de la resistencia de cortocircuito debemos sumar las dos ondas de tensión obtenidas por cada uno de los Wattímetros luego dividir esa señal entre dos para obtener su promedio, el siguiente paso sabemos que la conexión es estrella podremos obtener su valor de tensión RMS de fase de acuerdo a la ecuación 99, para la corriente realizamos el mismo análisis y obtendremos el valor de la resistencia con la ecuación 25 y para el valor de la reactancia de cortocircuito lo único que cambiara es el desfase de la corriente y se determina con la ecuación 26.

Para hallar los otros parámetros que conforman el circuito equivalente del transformador referido al primario es el valor de la resistencia del devanado primario que la obtenemos en la realización de la prueba de DC, el valor de la resistencia del devanado secundario referida al primario se determina con la ecuación 27 y de la reactancia referida al devanado primario con la ecuación 28.

La regulación de tensión de cortocircuito se expresa en tanto por ciento, teniendo el valor de la tensión de cortocircuito presente en cada elemento visto en las ecuaciones 32, 33 y 34 como también la corriente de falla se obtiene trayendo el valor de la tensión nominal hallada en la prueba de vacío sobre la impedancia de cortocircuito pudiéndose obtener de acuerdo a las ecuaciones 35, 37 y 38 del capítulo II sección II.7.2.

#### **Conexión Zig-Zag (Z):**

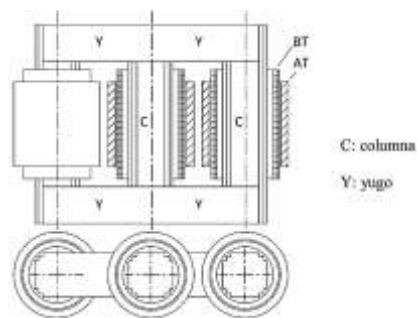
Para el análisis de esta conexión hay que tener muy en cuenta su conexión de acuerdo a esto partimos hallando los parámetros adquiridos por cada uno de los Wattímetros como la cantidad de muestras y el tiempo de adquisición para cada magnitud eléctrica (tensión y corriente), para obtener el valor de la resistencia de cortocircuito debemos sumar las dos ondas de tensión obtenidas por cada uno de los Wattímetros luego dividir esa señal entre dos para obtener su promedio, el siguiente paso sabemos que la conexión es en Zig-Zag podremos obtener su valor de tensión RMS de fase de acuerdo a la ecuación 116, 117 o 118 de acuerdo a la toma de la medición, para la corriente realizamos el mismo análisis y obtendremos el valor de la resistencia con la ecuación 25 y para el valor de la reactancia de cortocircuito lo único que cambiara es el desfase de la corriente y se determina con la ecuación 26.

Para hallar los otros parámetros que conforman el circuito equivalente del transformador referido al primario es el valor de la resistencia del devanado primario que la obtenemos en la realización de la prueba de DC, el valor de la resistencia del devanado secundario referida al primario se determina con la ecuación 27 y de la reactancia referida al devanado primario con la ecuación 28.

La regulación de tensión de cortocircuito se expresa en tanto por ciento, teniendo el valor de la tensión de cortocircuito presente en cada elemento visto en las ecuaciones 32, 33 y 34 como también la corriente de falla se obtiene trayendo el valor de la tensión nominal hallada en la prueba de vacío sobre la impedancia de cortocircuito pudiéndose obtener de acuerdo a las ecuaciones 35, 37 y 38

### III.3.2 Características transformador trifásico

Para el estudio del transformador trifásico hay que considerar cada columna como un transformador monofásico, de tal forma que los ensayos, esquemas equivalentes se pueden expresar de acuerdo a lo explicado anteriormente para el banco de transformadores monofásicos. El núcleo trifásico más utilizado es el de tres columnas como se muestra en la figura 53 este núcleo tiene el yugo y las tres columnas de la misma sección y sobre cada una de ellas se colocan los arrollamientos de una misma fase, dejando el bobinado de mayor tensión en la parte exterior para facilitar su aislación.



**Figura 53 Transformador trifásico de tres columnas [5].**

Estos núcleos de tres columnas son ligeramente asimétricos, la columna central presenta menor reluctancia que las laterales y, por lo tanto, toma una corriente de vacío 15 a 30% menor que las otras. Para encontrar los parámetros del circuito equivalente como los modelos circuitales del transformador se determinarán teniendo en cuenta su conexión y la ubicación de los equipos de adquisición de las magnitudes eléctricas, la metodología a realizar será la misma que para el banco de transformadores monofásicos.



## IV. SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE DE ADQUISICIÓN

### IV.1 Selección de la sensórica

Un sensor convierte una variable física en una variable que es usada como entrada en el hardware de adquisición. Hay dos tipos de sensores según la salida que produce: sensor digital y sensor análogo.

El sensor digital produce en la salida una señal digital que es la representación de la señal de entrada, mide valores discretos en tiempo discreto. El nivel lógico de la salida de los sensores digitales debe ser compatible con el receptor digital. Algunos niveles estándares de niveles lógicos son los TTL (transistor-transistor logic) y ECL (emitter coupled logic).

El sensor análogo produce una señal de salida análoga que es directamente proporcional a la señal medida, de magnitudes continuas en el tiempo. Las variables más típicas tal como la temperatura, presión y aceleración son medidas con sensores análogos.

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

- Sonda Fluke 80i-110s.
- Sonda Fluke DP120

#### **Sonda Fluke 80i-110s**

La selección de esta sonda para la realización del proyecto, diseño e implementación de una plataforma para la caracterización de materiales ferromagnéticos y transformadores. Primero se realizó un estudio de los equipos que se encontraban en el programa de ingeniería eléctrica que me permitieran sensar corriente. Se disponía de dos sondas de Fluke como son la 80i-110s y la sonda de 400 mA

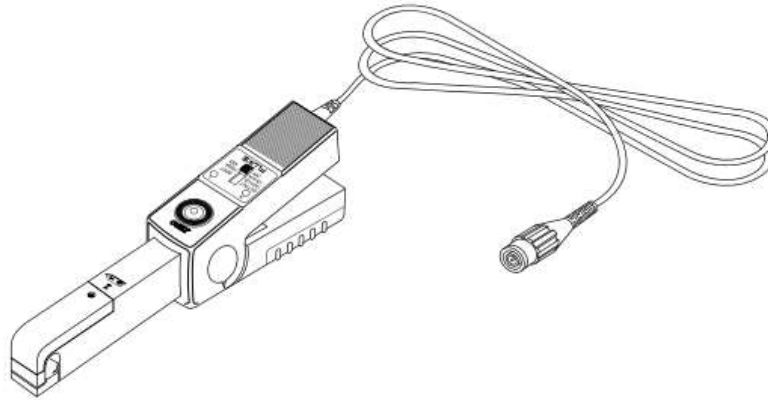
La sonda con la que se llevó a cabo la ejecución del proyecto fue la 80i-110s por criterios de escalamiento ya que me permite ajustarla de acuerdo a la magnitud que se desea sensar algunas características de la sonda se describen a continuación:

El fluke 80i-110s (la sonda o el producto) es una sonda de corriente AC/DC de pinza que reproduce formas de onda de corriente que se encuentran en los sistemas de distribución de electricidad comerciales e industriales. El rendimiento de la sonda se optimiza para la reproducción precisa de corrientes en frecuencia de línea y de hasta el 50° armónico. Además, el 80i-110s es compatible con cualquier instrumento capaz de medir milivoltios. En la figura 54 se observa la sonda de fluke 80i-110s.

La sonda ofrece estas ventajas:

- Medidas de corriente CA, CC y CA+CC para aplicaciones eléctricas, electrónicas y de automoción
- Apantallada para una alta inmunidad al ruido al trabajar cerca de accionadores de motor electrónicos y sistemas de encendido.
- Amplio intervalo de medición de 50 mA a 100 A, útil a 10 mA.
- Forma de pinza para acceder fácilmente a espacios reducidos.

- BCN aislado de 600 V con diseño de seguridad - compatible con las herramientas de comprobación ScopeMeter®, los Analizadores de armónicos de potencia y los osciloscopios de Fluke.
- Salida seleccionable de 10 mV/1 amp para el rango de 100 A, y 100 mV/1 A para el de 10 A.



**Figura 54 Sonda de corriente Fluke 80i-110s AC/DC [11].**

### **Especificaciones eléctricas**

Temperatura valida:  $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  ( $73^{\circ}\text{F} \pm 5^{\circ}\text{F}$ )

Rangos de corriente: 0 A CC a 10 A CC o pico CA; 0 A CC a 10 A CC o pico CA

Señales de salida: rango de 10 A: 100 mV/A; rango de 100 A: 10 mV/A

Precisión básica (1kHz)

**Tabla 2 Precisión básica sonda de corriente**

Frecuencia	Error (tras comprobación cero)	
	Rango de 100 mV/A	Rango de 10 mV/A
0A a 10A	< 3 % de lectura + 50 mA	-
0A a 40A	-	< 4% de lectura + 50 mA
40A a 80A	-	< 12% de lectura +50 mA
80A a 100A	-	< 15% de lectura

Impedancia de carga de entrada:  $>1\text{ M}\Omega$  en paralelo con hasta 100 pF

Ancho de banda útil (-3 dB): 0 kHz a 100 kHz.

Tiempo de subida o bajada:  $<4\ \mu\text{seg}$

Nivel de ruido de salida: típico de rango 10 mV/A [480  $\mu\text{V}$  pk-pk]; típico en rango 100 mV/A [3 mV pk-pk].

Corriente no destructiva máxima: 0 kHz a 2 kHz, pico de 140 A.

Coefficiente de temperatura: 2000 ppm/ $^{\circ}\text{C}$  máx. para temperaturas de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  ( $32^{\circ}\text{F}$  a  $132^{\circ}\text{F}$ ). [11]

### **Sonda Fluke DP120**

El DP120 es una sonda de tensión diferencial de diseño seguro para realizar mediciones de alta tensión flotante. La sonda puede utilizarse en convertidores electrónicos de alta potencia, controles de velocidad de motores, fuentes de alimentación con modo de conmutación y otros circuitos de alto voltaje. La selección de esta sonda fue acorde a una primera visualización de los equipos presentes en el programa de ingeniería eléctrica, lo segundo fue la forma de utilización que me permitiera ser conectada a la tarjeta de adquisición de datos con la que se pretende realizar el trabajo, tercero las magnitudes de tensión con las que se deseaban llevar a cabo las pruebas el equipo podía escalar esta señal. En la figura 55 se observa la sonda Fluke DP120.



**Figura 55 Sonda de tensión diferencial DP120 [12].**

**Características:** FLUKE garantiza las características expresadas en valores numéricos con la tolerancia establecida. Los valores numéricos especificados sin tolerancia indican los valores que se podrían esperar nominalmente del término medio de un conjunto de sondas de tensión diferencial idénticos.

#### **Características de entrada**

Estilo de punta de sondas de entrada: Con punta de sonda de banana recubierta

Longitud del cable de la sonda: 1.5 metros (60 pulgadas)

Tensión máxima de entrada respecto a masa:

600 V CAT III

1000 V CAT II

La categoría III de instalación se refiere al nivel de distribución y a los circuitos fijos existentes en el interior de un edificio. La categoría II de instalación se refiere al nivel local, que es aplicable a los aparatos eléctricos y al equipo portátil.

Tensión máxima diferencial dinámica:

1000 VCC, o 1000 V eficaces, o 1200V (CC+CA pico), lo que sea menor.

#### **Características de salida**

Cable de salida: cable con BNC de diseño seguro

Longitud de cable: 0.5 metros (20 pulgadas)

Rango de tensión de salida máx.:  $\pm 6.5V$  en  $1 M\Omega$

### **Características eléctricas**

Atenuación: 200x y 20x

Ancho de banda: (en  $1 M\Omega$ , 50 pF)

200x: CC a 20 MHz (-3 dB); 20x: CC a 20 MHz (-3 dB)

Exactitud:  $\pm 2,5\%$

Tiempo de subida:

200x: 17.5 ns; 20x: 17.5 ns

CMRR: (Rechazo en modo común)

200x: @60Hz= >80 dB, @1 MHz= >50 dB; 20x: @60Hz= >70 dB, @1 MHz= >40 dB

### **Impedancia de entrada:**

Entre cada entrada para pantalla BNC:  $5 M\Omega$ , 6 pF; entre las entradas:  $10 M\Omega$ , 5 pF

Impedancia de salida:  $50\Omega$

Ruido:

200x: <2 mV eficaces; 20x: <3 mV eficaces

Offset:  $\leq 10$  mV en  $1 M\Omega$

Posiciones del selector: OFF, 200x, 20x

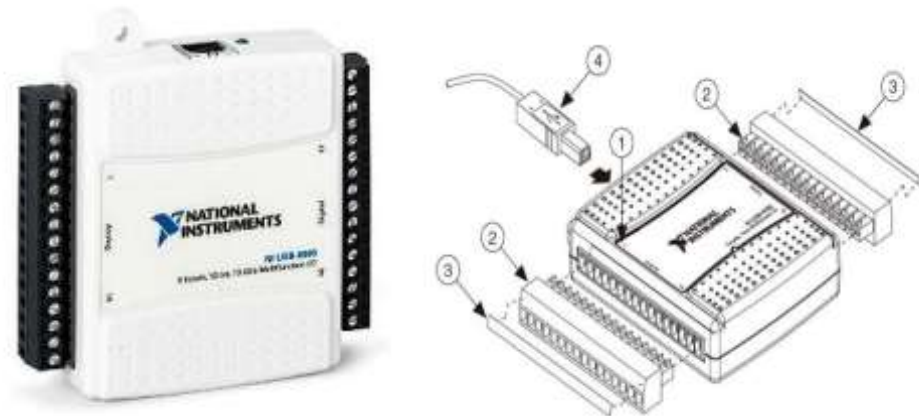
### **Alimentación**

Externa: Mediante el adaptador de red PM8907 (opcional)

Interna: Alimentación por pilas o batería. Pila alcalina de 9V, IEC6LR61 vida útil de la batería 8 horas en modo de funcionamiento, 400 horas en modo de espera automática. [12]

### **Tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6009**

La selección de esta tarjeta de adquisición de datos de la National Instruments para llevar a cabo el proyecto fue por su manejo por las características propias como la capacidad de bits de almacenaje, por la comunicación con el software de trabajo por llevar a máximo el aprovechamiento de los canales se optó por esta tarjeta. 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. en la figura 56 se muestra la tarjeta de adquisición de datos y en la figura 57 se muestra el circuito de entrada analógico.[13]



**Figura 56 Tarjeta NI-USB 6009.[1.etiqueta superior con indicadores de bornes, 2. Borneras, 3. Etiquetas de bornes, 4. Cable USB.[13]**

### **Características**

#### **Entrada Analógica:**

Canales de una sola terminal: 8.  
Canales Diferenciales: 4.  
Resolución: 14 bits.  
Velocidad de Muestreo: 48 kS/s.  
Rendimiento (Todos los Canales): 48 kS/s.  
Máx. Voltaje de Entrada Analógica: 10V.  
Rango de Voltaje Máximo: -10V a 10V.  
Precisión Máxima del Rango de Voltaje: 7.73mV.  
Rango de Voltaje Mínimo: -1V a 1V.  
Mínima Precisión del Rango de Voltaje: 1.53mV.  
Número de Rangos: 8.  
Memoria Interna: 512 Bytes.  
Impedancia de entrada: 144 k $\Omega$ .  
Protección contra sobretensiones:  $\pm 35V$

#### **Salida analógica:**

Canales: 2.  
Resolución: 12 bits.  
Máx. Voltaje de Entrada Analógica: 5V.  
Rango de Voltaje Máximo: 0V a 5V.  
Precisión Máxima del Rango de Voltaje: 7mV.  
Rango de Voltaje Mínimo: 0V a 5V.  
Mínima Precisión del Rango de Voltaje: 7mV.  
Razón de Actualización: 150 S/s.  
Capacidad de Corriente Simple: 5mA.

Capacidad de Corriente Total: 10mA.

### E/S Digital

Canales Bidireccionales: 12.

Niveles Lógicos: TTL.

Capacidad de Corriente Simple: 8.5mA.

Capacidad de Corriente Total: 102mA.

Máximo Rango de Entrada: 0V a 5V.

Máximo Rango de Salida: 0V a 5V.

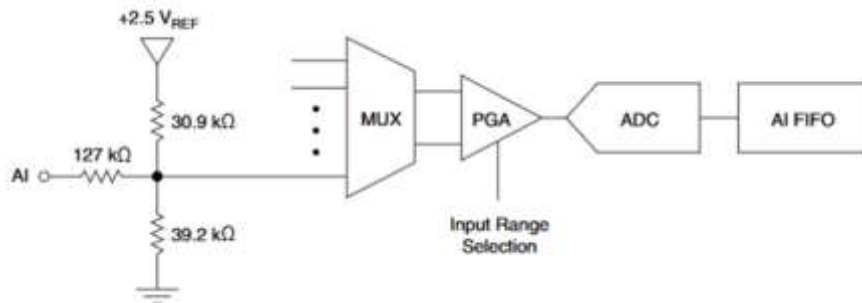


Figura 57 Circuito de entrada analógico [14].

## IV.2 Adquisición de datos

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medición de un fenómeno eléctrico o físico tal como tensión, corriente, temperatura, presión, o sonido con un ordenador. Un sistema DAQ consta de sensores, hardware de medición DAQ y una computadora con software programable. En comparación con los sistemas tradicionales de medición, sistemas de adquisición de datos basados en PC explotan la capacidad de procesamiento, la productividad, la pantalla y capacidades de conectividad de los equipos estándar de la industria que proporcionan una solución de medición más potente, flexible y rentable. [13]

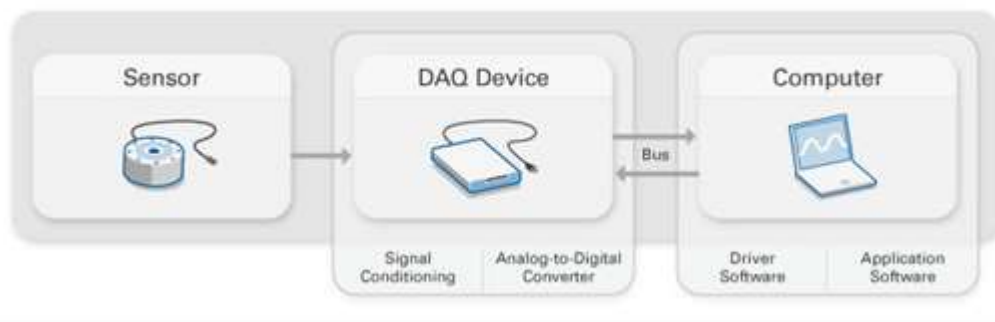


Figura 58 Partes de un sistema DAQ [13].

Un sistema de adquisición de datos se podría tomar como un grupo de hardware y software que permiten interactuar con el mundo real, consta de estos componentes:

Hardware de adquisición: es el corazón de cualquier sistema de adquisición de datos. La función principal es hacer la conversión de señales analógicas a señales digitales y señales digitales a analógicas (A/D y D/A).

Sensores y actuadores (transductores): Un transductor es un dispositivo que convierte un tipo de energía de entrada en una energía de salida de otra forma.

Acondicionador de señal: las señales de los sensores a menudo son incompatibles con el hardware de adquisición de datos, y para superar esto las señales deben ser acondicionadas. Por ejemplo, las señales podrían ser amplificadas o volverlas en señales sin componentes de frecuencias indeseadas.

Computador: proporciona un procesador, un sistema de reloj, un bus de datos, memoria y espacio en el disco para almacenar datos.

Software: permite el intercambio de información entre el computador y el hardware. [14]

Los componentes y la relación entre cada uno se presentan a continuación en la figura 59.

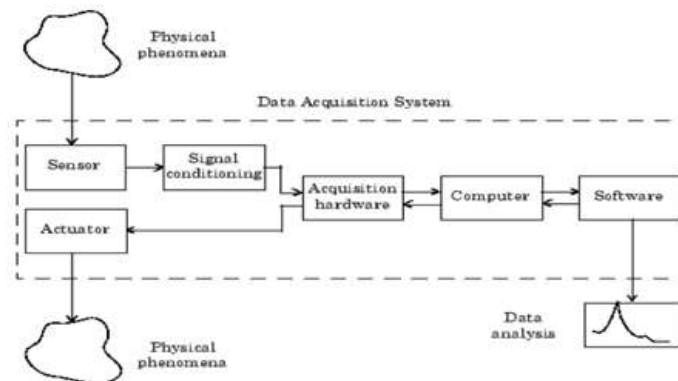


Figura 59 Componentes de un sistema de adquisición de datos. [15]

### Configuración del canal

Los canales de entrada pueden ser configurados de una de estas dos maneras

- Modo diferencial
- Modo de nodo simple

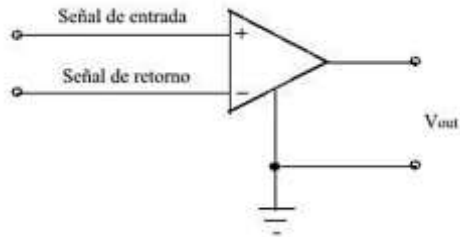
La elección de la configuración del canal de entrada podría depender de si la señal de entrada es referenciada a tierra o es una señal flotante.

Una señal flotante usa una referencia aislada de la tierra y no está conectado a la tierra del sistema. Como resultado de ello, la señal de entrada y el dispositivo de hardware no están conectados a una referencia en común, lo que puede causar que la señal de entrada exceda el rango válido del hardware. Una señal referenciada a tierra está conectada a la misma referencia del dispositivo. Como resultado de ello, la señal de entrada y el hardware están conectados a una referencia común.

### Entrada diferencial:

Cuando se configura el hardware para entrada diferencial, hay dos cables de señal asociados con cada señal de entrada- uno para la señal de entrada y el otro para la señal de referencia (retorno). La medición es la diferencia de tensión entre los dos cables, los cuales ayudan a reducir el ruido y cualquier voltaje que es común a ambos cables. Como se muestra en la figura 60, la señal de entrada está conectada a la entrada positiva del amplificador y el retorno de señal está conectado a la entrada

negativa del amplificador. El amplificador tiene un tercer conector que permite que estas señales sean referenciadas a tierra.

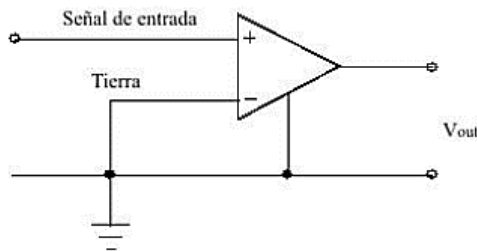


**Figura 60 Entrada diferencial [14].**

### **Modo nodo común:**

Cuando se configura el hardware para una entrada de simple nodo, hay un cable de señal asociado a cada señal de entrada, y a cada señal de entrada está conectada a la misma tierra. Las mediciones de simple nodo son más susceptibles al ruido que las mediciones diferenciales debido a las diferencias en la trayectoria de la señal.

Como se muestra a continuación en la figura 61, la señal de entrada está conectada a la entrada positiva del amplificador y la tierra está conectada a la entrada negativa del amplificador. [14]



**Figura 61 Entrada de nodo simple [14].**

La adquisición de datos o adquisición de señales consiste en la toma de muestras del mundo real para generar datos que puedan ser manipulados por un computador, contiene en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora. Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de adquisición de datos (DAQ).

El objeto de cualquier sistema de adquisición de datos es proporcionar las herramientas y recursos necesarios para tomar señales físicas y convertirlas en datos que posteriormente se puedan procesar y mostrar.

Un sistema de adquisición de datos se podría tomar como un grupo de hardware y software que permitan interactuar con el mundo real. [16]



### Hardware a implementar

El proyecto del diseño e implementación de una plataforma para la caracterización de materiales ferromagnéticos y transformadores se desarrolló con el siguiente hardware mostrado en la siguiente figura.



**Figura 62 Diferentes vistas de las partes del hardware de adquisición de datos para la plataforma de caracterización de materiales ferromagnéticos y transformadores**

### TOOLBOX DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La Toolbox de Adquisición de Datos es una colección de funciones de archivos –m y archivos. mex construido sobre el entorno de MATLAB. La Toolbox también incluye varios vínculos de librerías dinámicas (DLL's) llamados adaptadores, los cuales permiten interactuar con un hardware específico. La Toolbox tiene las siguientes características:

- Un marco para traer datos reales, medidos en el espacio de trabajo de MATLAB usando un hardware de adquisición de datos compatible con el PC.
- Soporte para entradas análogas (AI), salidas análogas (AO) y entradas y salidas digitales (DIO). Incluyendo conversiones simultáneas para entradas y salidas análogas.
- Soporte para estos tipos de hardware más populares:
- Advantech. Tarjetas que se usen el administrador de dispositivos de Advantech.
- Módulos VXI E1432A/33A/34A de Agilent Technologies

- Keilethley Tarjetas que usen DriverLINS.
- Tarjetas de Measurement Computing Corporation
- National Instruments. Tarjetas que usan el software tradicional NI-DAQ o NI-DAQ mx.

### Configuración de la NI-USB-6009

Se hará hincapié en la necesidad de tener conectada la tarjeta que se desea usar, y los drivers instalados. Una forma de averiguar si esto es así es mediante el comando `daqhwinfo`. Dicho comando devuelve información pertinente a las DAQ instaladas en el equipo, como podría ser la NI-USB-6008, el puerto paralelo, o mismo la tarjeta de sonido.

Dentro de la estructura devuelta, existe la matriz “InstalledAdaptors”, la cual contiene enumeradas los tipos de DAQ instaladas. Para obtener esta lista, es preciso asignar el valor resultante del primero de los comandos en una variable, tal y como se muestra en la siguiente figura.

```
Command Window
>> juan_andres_leal_perez=daqhwinfo

juan_andres_leal_perez =

    ToolboxName: 'Data Acquisition Toolbox'
    ToolboxVersion: '3.8 (R2015b)'
    MATLABVersion: '8.6 (R2015b)'
    InstalledAdaptors: (3x1 cell)

>> juan_andres_leal_perez.InstalledAdaptors

ans =

    'nidaq'
    'parallel'
    'winsound'
```

Figura 63 Tipo DAQ instaladas.

Ahora para averiguar que tarjetas de un tipo en concreto se encuentran instaladas, habrá que usar el siguiente comando “`DispositivoNidaq=daqhwinfo('nidaq')`”, mostrado en la figura.64. En la matriz `BoardNames` aparecerían enumeradas los nombres de las diferentes tarjetas instaladas y conectadas, mientras que en `installedBoardIds` aparecerían los identificadores de cada una de ellas de forma ordenada.

```
Command Window
>> clear all
>> juan_andres_leal_perez=daqhwinfo('nidaq')

juan_andres_leal_perez =

    AdaptorDllName: 'C:\Program Files (x86)\MATLAB\R2015b\toolbox\daq\daq\private\mxnidaqmx.dll'
    AdaptorDllVersion: '3.8 (R2015b)'
    AdaptorName: 'nidaq'
    BoardNames: {'USB-6009'}
    InstalledBoardIds: {'Dev2'}
    ObjectConstructorName: {'analoginput('nidaq','Dev2')' 'analogoutput('nidaq','Dev2')' 'digitalio('nidaq','Dev2')'}
```

Figura 64 Tarjetas que se encuentran instaladas.

### Entrada/Salida analógica:

- InputType: Diferencia entre entrada diferencial o referenciada a masa. Algunas tarjetas disponen además de un modo no referenciado a masa. Es un parámetro que debe tenerse siempre en cuenta, tanto en la configuración como en el modo de conexión.

### Canales:

- InputRange: Rango de valores para las que debe estar preparada la DAQ. Disminuir este valor aumenta la precisión, si bien no siempre es posible ya que las muestras pueden quedar fuera de dicho rango.
- SensorRange: Indica el valor al que debe acondicionar la entrada/salida en los extremos del margen de medida.
- Units: Indica las unidades de medida del sensor.
- UnitsRange: Indica el valor en unidades en el extremo del margen de medida [17]

### Flujo de datos adquiridos

En el flujo de datos, son almacenados temporalmente en la memoria porque estos se van sobrescribiendo. La tasa con la cual los datos son sobrescritos depende de factores incluyendo la memoria disponible, la tasa con la que los datos son adquiridos y el número de canales del hardware.

Los datos almacenados no están disponibles automáticamente en el área de trabajo de Matlab. Por ello, se tiene que extraer explícitamente del motor usando la función getdata.

El flujo de datos adquiridos como se muestra en la figura 65, consiste de dos pasos independientes:

- Los datos adquiridos desde el hardware son almacenados en el motor.
- Los datos son extraídos desde el motor y almacenados en el espacio de trabajo de Matlab o sacados como archivo.

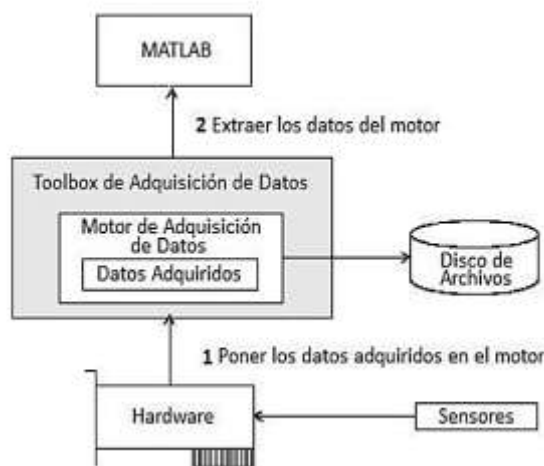


Figura 65 Flujo de entrada de datos [14].

### Flujo de salida de datos

El flujo de salida de datos se refiere al flujo de datos desde el motor de adquisición de datos al hardware. Sin embargo, antes que los datos son sacados, se deben poner en cola en el motor con la función putdata. La cantidad de datos que se puede poner en cola depende de factores incluyendo la memoria disponible, el número de canales del hardware y el tamaño de cada muestra de dato.

El flujo de salida de datos consiste de dos pasos independientes:

- Los datos son puestos en cola en el motor desde el espacio de trabajo de MATLAB.
- Los datos en cola en el motor son sacados al hardware.

Los siguientes pasos se ilustran en la figura 66. [14]

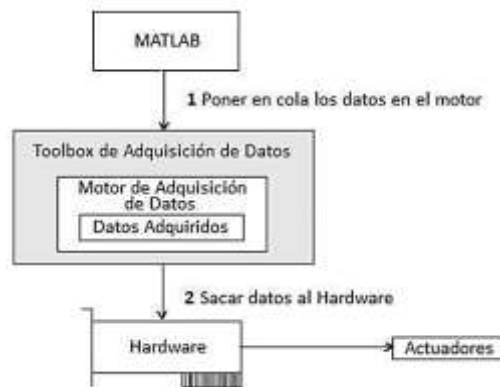


Figura 66 Flujo de salida de datos [14].

### IV.3 Acondicionamiento

#### Escalamiento

El escalamiento que se llevara a cabo para una mejor visualización de los datos adquiridos por las dos sondas de trabajo se realizara de acuerdo a los parámetros propios de adquisición de cada uno de un escalamiento de acuerdo a la forma de trabajo de cada equipo:

#### Sonda Fluke 80i-110s

El fluke 80i-110s es una sonda de corriente AC/DC de pinza que reproduce formas de onda de corriente que se encuentran en los sistemas de distribución de electricidad comerciales e industriales. El rendimiento de la sonda se optimiza para la reproducción precisa de corrientes en frecuencia de línea y de hasta el 50° armónico. Además, el 80i-110s es compatible con cualquier instrumento capaz de medir milivoltios. En la figura 54 se observa la sonda de fluke 80i-110s

**Señales de salida:** 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:

$$I = \frac{1}{100 \frac{mV}{A}} * V_{sens}$$

Ecuación 125

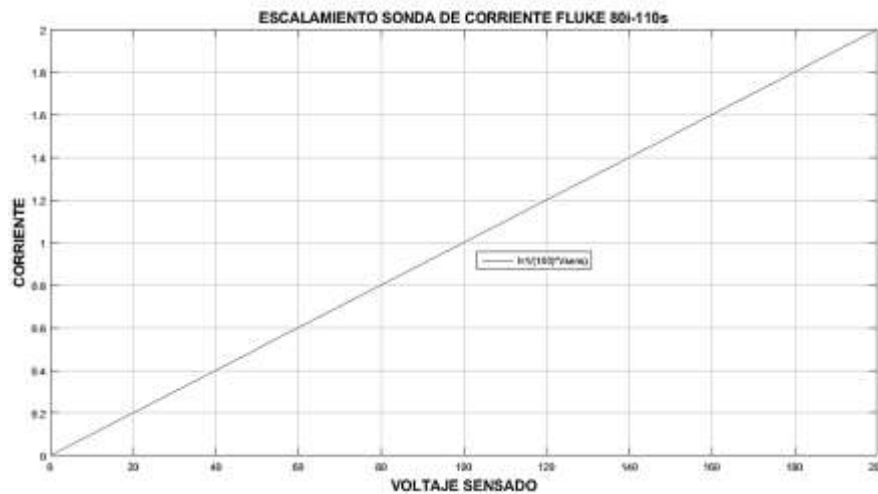


Figura 67 Escalamiento onda de corriente

### Sonda Fluke DP120

El rango de la sonda diferencial tiene una atenuación de: 200x y 20x el escalamiento que se realizara 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 realizara 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 realizara a una atenuación de 200x. la expresión requerida para obtener la visualización de las muestras que se están adquiriendo serán a partir de la siguiente expresión.

$$V = \frac{1}{\frac{20mV}{V}} * V_{sens}$$

Ecuación 126

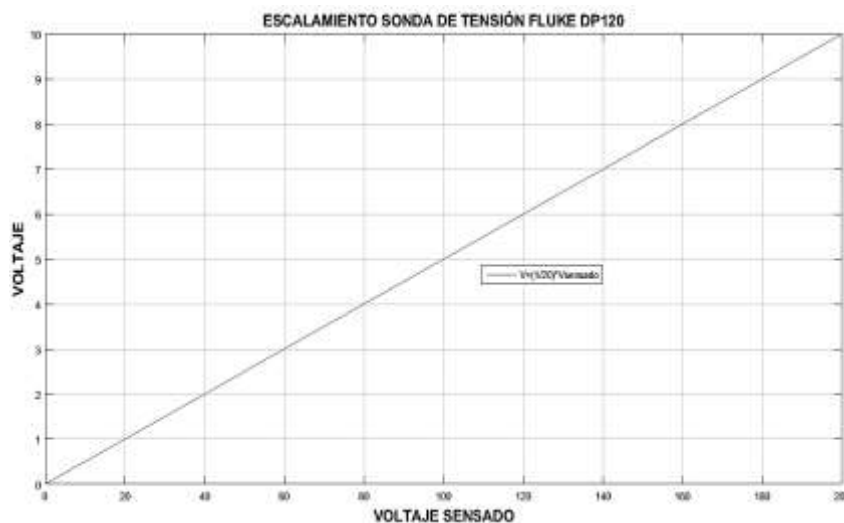


Figura 68 Escalamiento onda de tensión

## V. ALGORITMOS DE CARACTERIZACIÓN

### V.1 Entorno de trabajo en Matlab

Matlab se ha consagrado como uno de los lenguajes más populares y versátiles para aplicaciones de ingeniería a nivel mundial. La multiplicidad de funciones, librerías y detallados ejemplos disponibles en la web han hecho accesible el modelado y la implementación de cualquier tipo de sistema, proyecto o algoritmo en este entorno de programación, siendo adoptado en disciplinas o materias relacionadas con ingenierías.

Dado que es uno de los lenguajes más usado y cuya capacidad de procesamiento es cada vez más eficiente, fue incluida hace ya varias versiones la posibilidad de diseñar una interfaz gráfica de usuario (graphical user interface - GUI) en la cual sea más sencillo y dinámico el ingreso de datos y la visualización de los resultados, facilitando que los usuarios finales puedan beneficiarse de aplicaciones diseñadas en este lenguaje. En otras palabras, guide (Graphical User Interface Design) es un entorno de programación visual disponible en Matlab para realizar programas que necesitan ingreso y visualización continua de datos por parte del usuario final o del programador. Este entorno tiene las características básicas de todos los programas visuales como Visual Basic o Visual C++. [18]

Una interfaz es una de las partes más importantes de cualquier programa puesto que determina qué tan factible y preciso será el desempeño del programa ante los comandos que el usuario pretenda ejecutar. Aunque un programa sea muy poderoso, si se manipula por medio de una interfaz pobremente elaborada, tendrá poco valor para un usuario inexperto. Es por esto que las interfaces gráficas tienen una gran importancia para usuarios inexpertos o avanzados de cualquier programa ya que facilitan su uso [19].

Una interfaz gráfica consta de botones, menús, ventanas, etc., que permiten utilizar de una manera muy simple y en ocasiones casi intuitiva programas realizados en ambientes como Windows y Linux. Las interfaces gráficas también se conocen como interfaces de usuario. El nombre en inglés de las interfaces gráficas es Graphical User Interface y se denominan GUI, por lo que nosotros también nos referiremos a ellas de la misma manera. Existen diferentes lenguajes de programación que permiten crear GUIs tales como Visual C, Visual Basic, TK y MATLAB por mencionar algunos. Todos ellos permiten usar diferentes controles y tienen distintas maneras de programarlos [20].

La forma de implementar las GUI con Matlab es crearlos objetos y definir las acciones que cada uno va a realizar. Al usar GUIDE obtendremos dos archivos:

- Un archivo FIG: contiene la descripción de los componentes que contiene la interfaz.
- Un archivo M: contiene las funciones y los controles del GUI así como del callback.

Un callback se define como la acción que llevará a cabo un objeto de la GUI cuando el usuario lo active. Para ejemplificarlo, suponga que en una ventana existe un botón el cual al presionarlo ejecuta una serie de acciones, a eso se le conoce como la función del callback.

.Al hacer clic derecho en el elemento ubicado en el área de diseño, una de las opciones más importantes es View Callbacks, la cual, al ejecutarla, abre el archivo .m asociado a nuestro diseño y nos posiciona en la parte del programa que corresponde a la subrutina que se ejecutará cuando se realice una determinada acción sobre el elemento que estamos editando. [21]

## V.2 Interfaz grafica

Para el desarrollo de 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), que se dará a a conocer a continuación. 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. 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. [17]

Presentación del trabajo se mostrará en la siguiente figura donde se da a conocer el proyecto “Diseño e implementación de una plataforma para la caracterización de materiales ferromagnéticos y transformadores”.



**Figura 69 Presentación de la plataforma**

En esta figura se muestra el nombre del proyecto, el objetivo a alcanzar, el nombre de quien dio a marchar el proyecto, y del director del trabajo.

Al dar clic sobre el botón mostrado en el costado inferior de la figura 69 damos inicio a la plataforma, teniendo un primer encuentro con una contraseña siendo la siguiente “**ISBELIARUBENPEDRO**” que me permitirá tener un control de quienes tengan las capacidades requeridas para interpretar lo que se está trabajando en esta interfaz mostrada en la siguiente figura 70, si la contraseña es incorrecta se le pedirá de nuevo mostrándose un mensaje de ayuda diciendo contraseña incorrecta mostrado en la figura 71.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

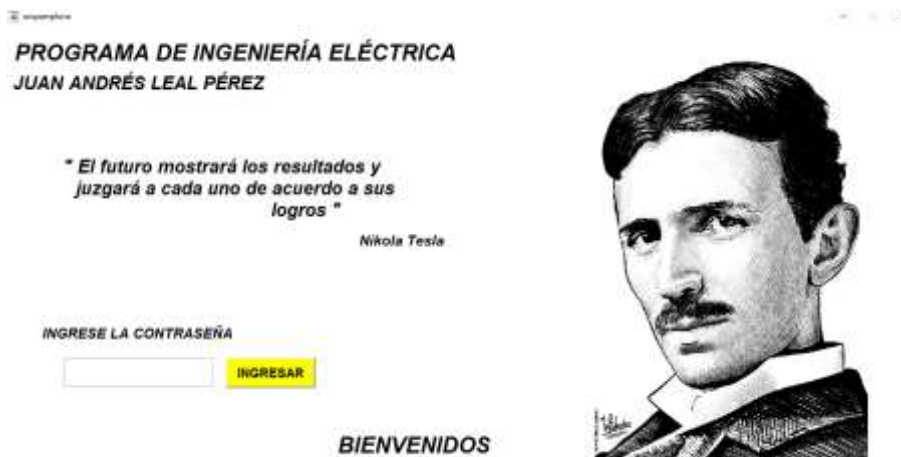


Figura 70 Entorno de trabajo a la plataforma

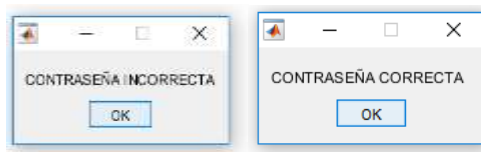


Figura 71 Mensajes de ayuda a la hora de ingresar a trabajar en la plataforma.

Al ingresar correctamente nos encontraremos con una interfaz mostrada en la figura 73 en donde nos permitirá llevar a cabo el análisis del material ferromagnético como los modelos circuitales propios de cada transformador. En esta interfaz encontraremos tres parámetros importantes como son:

- Transformadores monofásicos
- Transformadores trifásicos.
- Caracterización del núcleo.

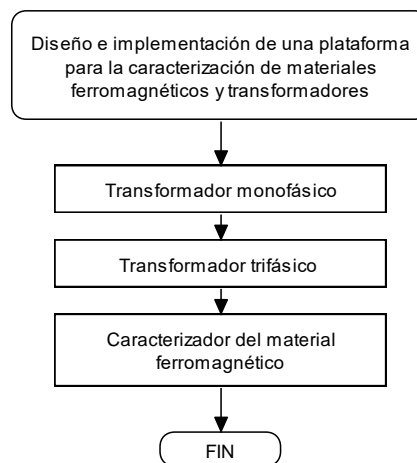


Figura 72 Diagrama de flujo para la plataforma principal

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



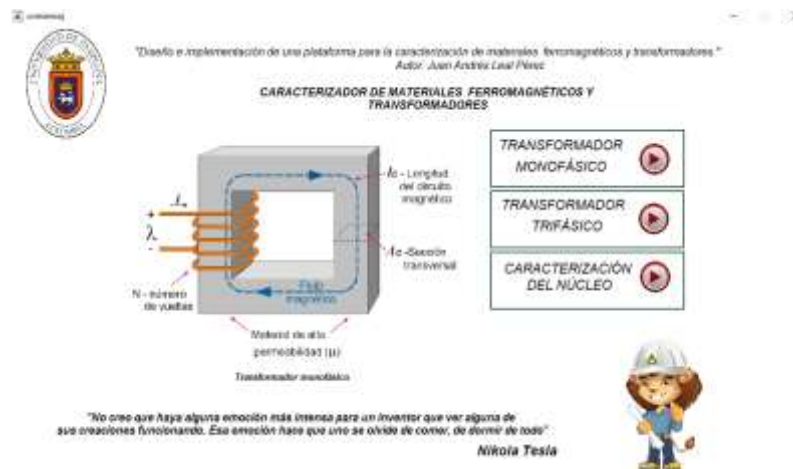


Figura 73 Interfaz principal de la plataforma

En esta interfaz se podrá comenzar de acuerdo al transformador que se requiera caracterizar o si solo se desea saber el comportamiento del ciclo de histéresis se seleccionará el botón con la especificación de caracterización del núcleo.

### Transformador monofásico

Al ingresar por el transformador monofásico se observará una interfaz que consta de las pruebas básicas para llegar a obtener los modelos circuitales del transformador como son las prueba de DC, la prueba de vacío y la prueba de cortocircuito. Otros parámetros que se pueden encontrar son la caracterización del núcleo y a la vez los modelos circuitales del transformador. Esta interfaz se observa en la figura 74.

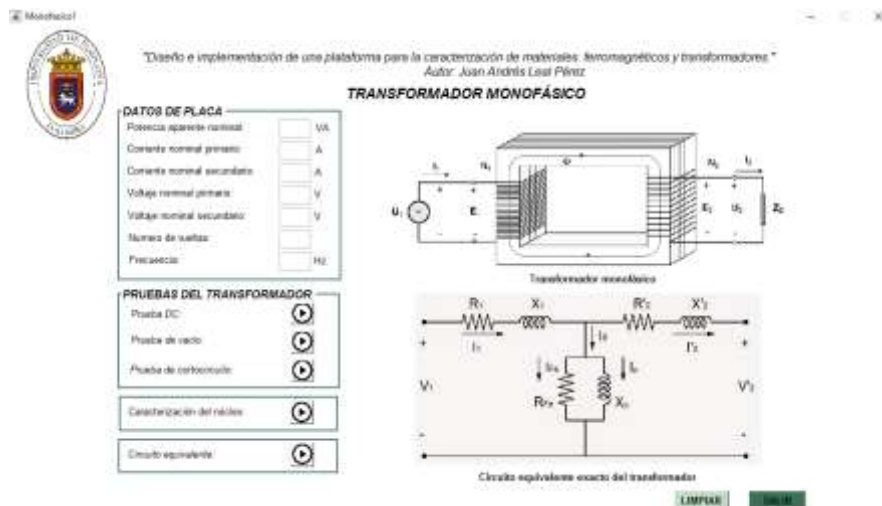
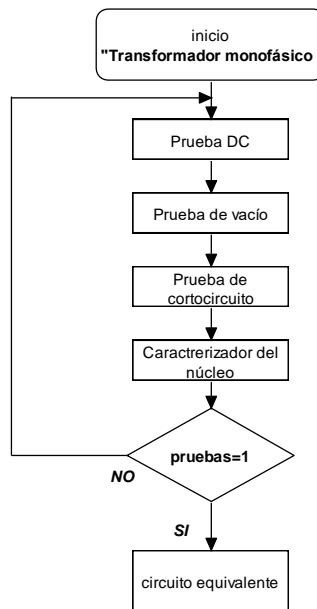


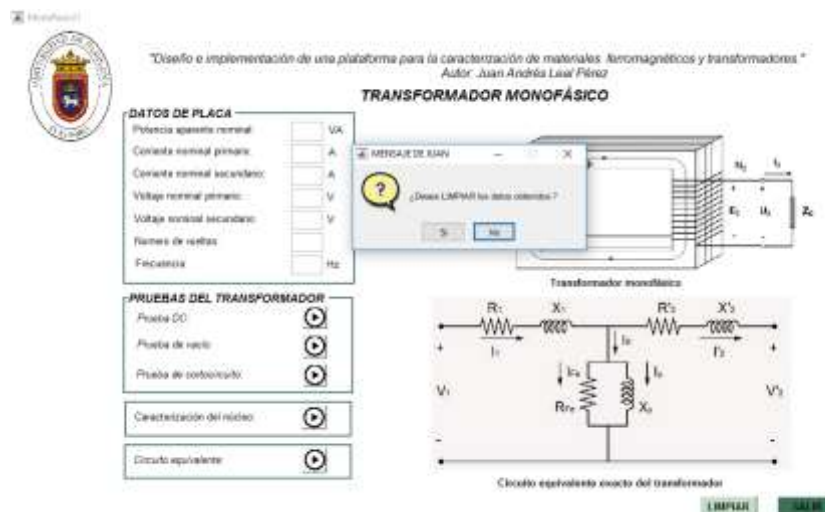
Figura 74 Interfaz transformador monofásico.



**Figura 75 Diagrama de flujo transformador monofásico**

En el diagrama de flujo para el transformador monofásico podemos ver la secuencia para poder obtener los modelos circuitales del transformador monofásico pasando por las pruebas de DC, vacío y cortocircuito, pudiendo realizar la caracterización del núcleo

Esta interfaz consta de dos botones que se encuentran en la parte inferior derecha en la que nos permiten limpiar la información ingresada en la placa característica y también si deseamos regresarnos a la interfaz anterior mostrada en el botón de “salir”, cada uno de estos botones consta de dos ayudas en las que nos facilita un mejor manejo de la plataforma mostrada en las figuras 76 y 77.



**Figura 76 Función del botón limpiar**

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

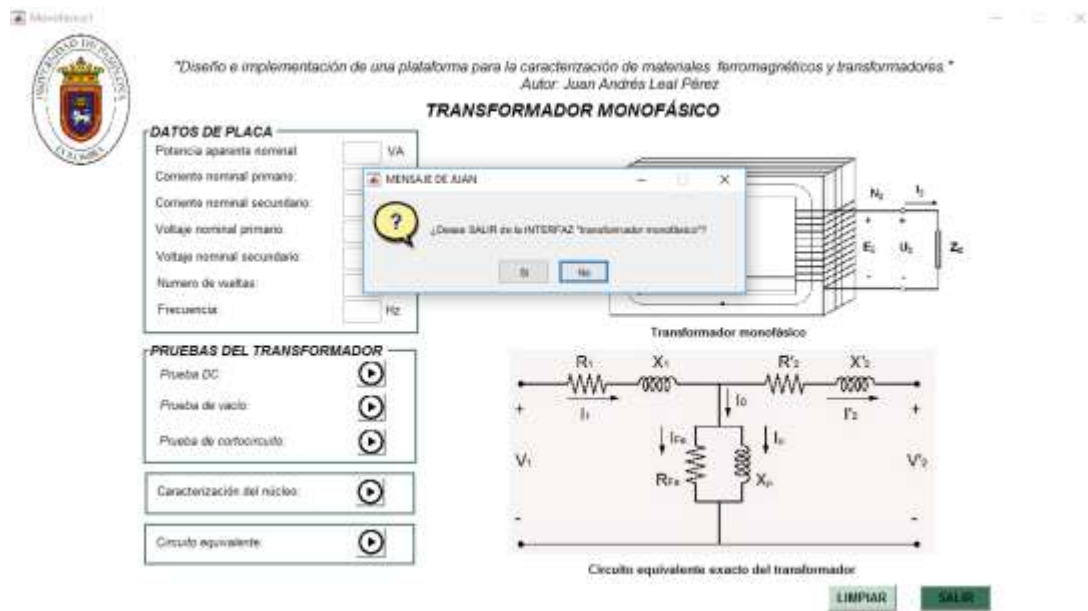


Figura 77 Función botón salir

La prueba DC del transformador monofásico se observa en la figura 78 y el diagrama de flujo se muestra en la figura 79. En esa interfaz se muestra las gráficas de las magnitudes eléctricas tensión y corriente adquiridas, se muestra la conexión pertinente para llevar a cabo la prueba, tiene unas ayudas que permiten al usuario realizar y conocer acerca de esta prueba, consta de los mismos botones nombrados anteriormente limpiar y salir.

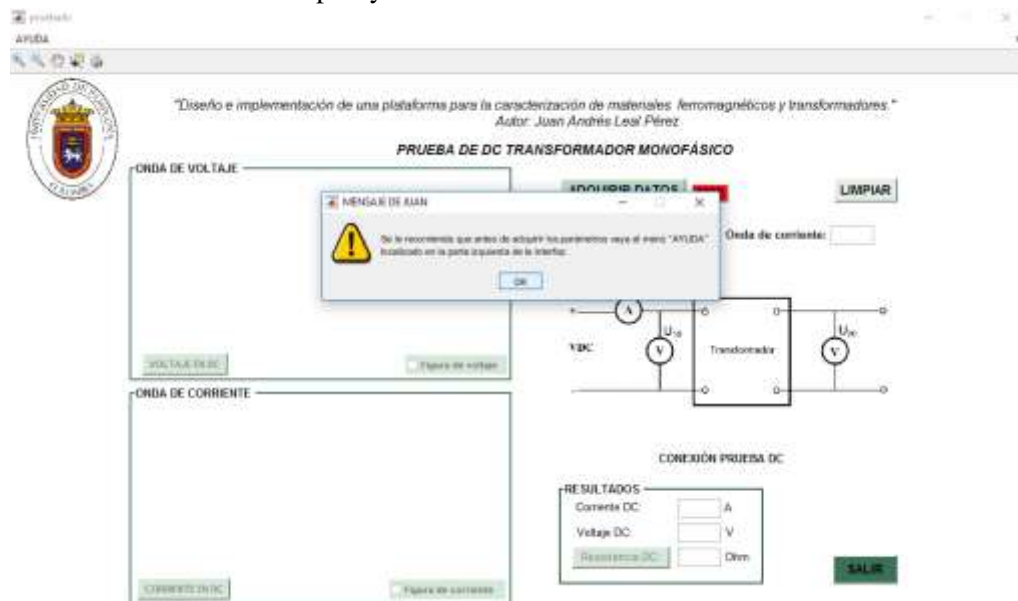


Figura 78 Prueba DC transformador monofásico.

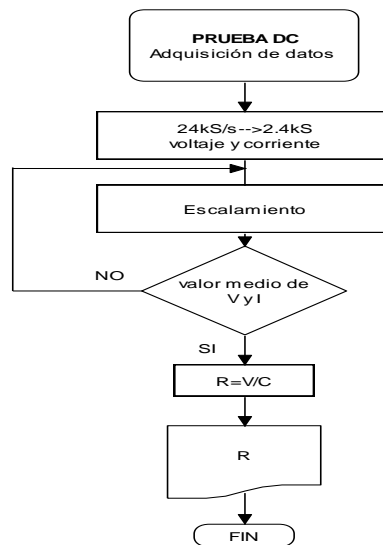


Figura 79 Diagrama de flujo prueba DC

En el diagrama de flujo vemos que partimos de la adquisición de datos de las magnitudes eléctricas observando el escalamiento de acuerdo con la sonda que se desee trabajar, obteniendo el valor medio de los datos discretos adquiridos para poder obtener el valor de la resistencia de DC llevándola al Workspace de Matlab para un posterior tratamiento.

La prueba de vacío del transformador monofásico consta de los siguientes parámetros. Se mostrará las magnitudes eléctricas como tensión y corriente a la vez se mostrará la potencia de vacío del transformador los parámetros del circuito tanque, consta de las ayudas que se encuentran en formato PDF, como también de los botones de limpiar y salir con las mismas funciones descritas anteriormente. La interfaz que me visualiza esta prueba se muestra en la figura 80. en la figura 81 se visualiza el diagrama de flujo de la realización de la prueba.

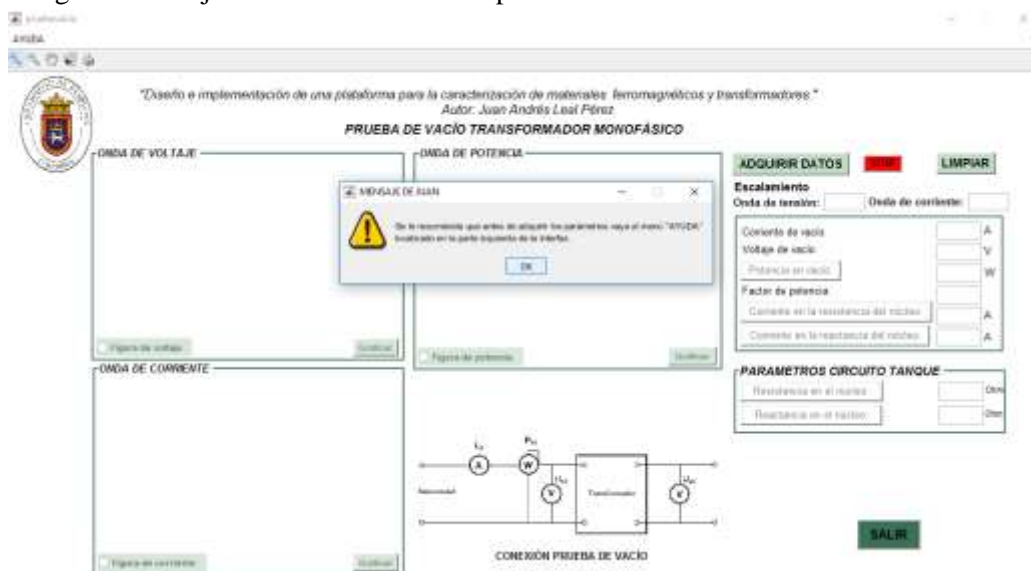
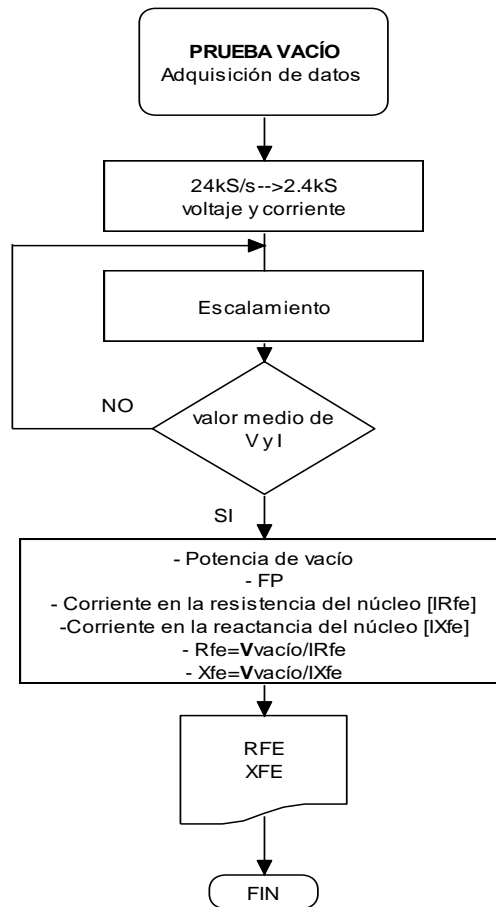


Figura 80 Prueba de vacío transformador monofásico.

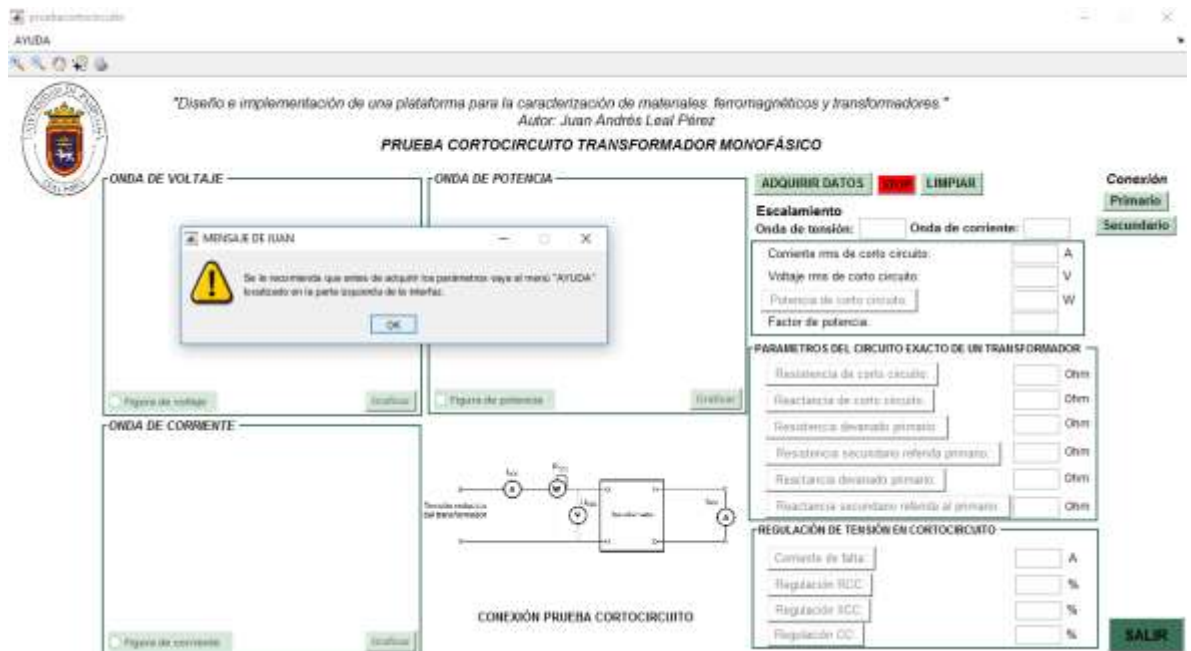


**Figura 81 Diagrama de flujo prueba de vacío**

En el diagrama de flujo partimos de la adquisición de las muestras teniendo presente el escalamiento de los equipos con que se estén trabajando, obteniendo los valores RMS de las magnitudes eléctricas voltaje y corriente, después de tener los valores pasamos a obtener los parámetros como potencia de vacío y su respectivo factor de potencia, para por ultimo poder hallar los parámetros del circuito tanque del transformador monofásico. Llevando estos datos a la zona de trabajo del software de Matlab, para más adelante ser visualizados en los modelos circuitales del transformador.

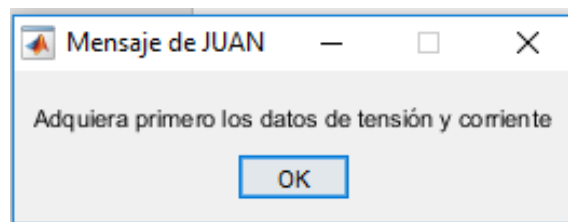
La prueba de cortocircuito mostrada en la figura 82 nos muestra los parámetros descritos anteriormente como la resistencia y reactancia de cortocircuito, la regulación de cortocircuito la corriente de falta. También podremos observar las muestras adquiridas tanto de voltaje corriente y potencia, también se muestra la conexión pertinente para realizar de una manera acorde la prueba esta prueba como las anteriores constan de un escalamiento de acuerdo al equipo que se esté adquiriendo las señales como también para una mejor visualización de los datos los botones de limpiar y de salir trabajan de igual manera que las demás pruebas. En la figura 84 podremos observar el diagrama de flujo pertinente para esta prueba.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE  
MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES  
AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ



**Figura 82 Prueba de cortocircuito transformador monofásico.**

Esta prueba se pueden observar la conexión pertinente para llevar a cabo la obtención de las magnitudes eléctricas. En cada una de las ventanas se visualizarán las ondas de tensión y corriente obtenidas, esta interfaz como las descritas anteriormente tienen mensajes inmersos que me permiten un mejor trabajo y aprovechamiento de la plataforma como por ejemplo un mensaje está inmerso a la hora de realizar la obtención del valor de la potencia como del factor de potencia el mensaje se visualiza en la siguiente figura 83.



**Figura 83 Mensajes de ayuda para la obtención de los parámetros propios del transformador.**

En esta interfaz se encuentran mensajes de ayuda inmersos que me permiten obtener un mayor entendimiento de los parámetros que es están obteniendo como el llamado a la resistencia  $R_1$  obtenida en la prueba de DC como a las magnitudes de tensión y corriente nominal para obtener los valores de regulación de cortocircuito.

En el diagrama de flujo de la figura 84 se puede ver la secuencia para obtener los parámetros de los devanados del transformador partiendo primero de una adquisición de datos obteniendo así las magnitudes eléctricas para la obtención de la potencia de cortocircuito y su respectivo factor de potencia y poder obtener los parámetros de regulación de cortocircuito como su corriente de falta.

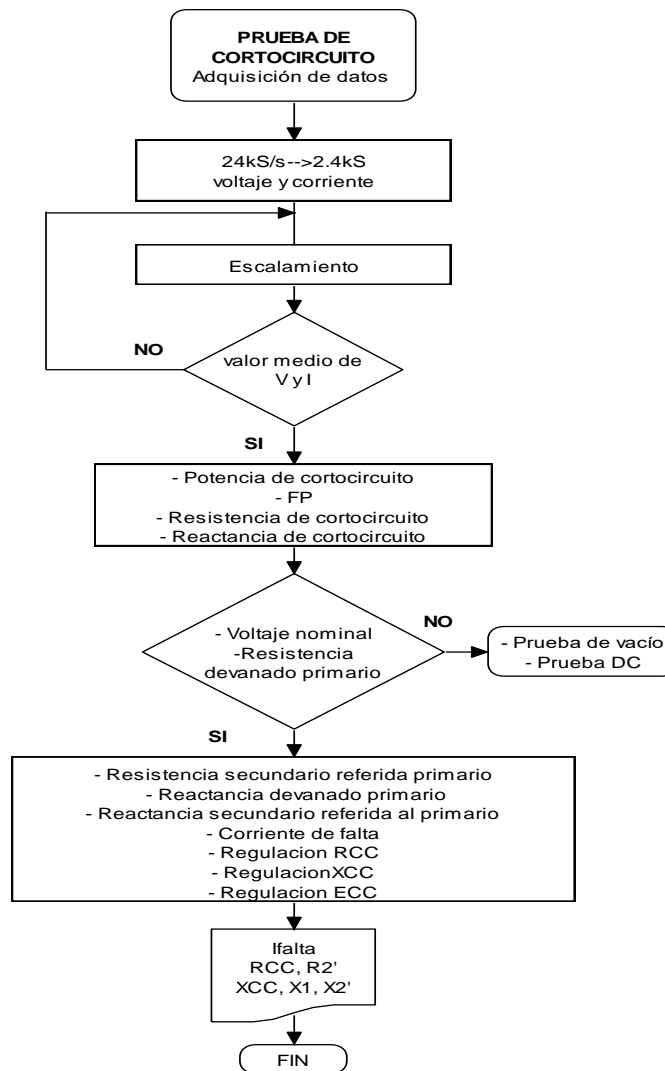


Figura 84 Diagrama de flujo prueba de cortocircuito

Después de haber realizado las tres pruebas se han adquirido los datos para poder realizar los modelos circuitales del transformador como en la interfaz que se muestra en las siguientes figuras se mostraran los esquemas para cada uno de los circuitos del transformador. Un mensaje nos avisa de que es recomendable realizar primero las pruebas para poder obtener una mayor aportación del trabajo que se mostrara en esa interfaz el mensaje se muestra a continuación.

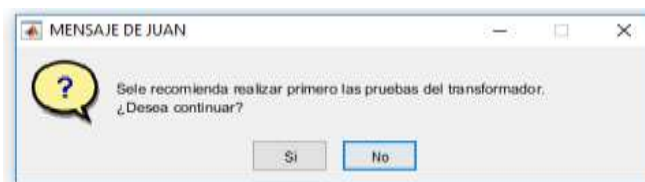
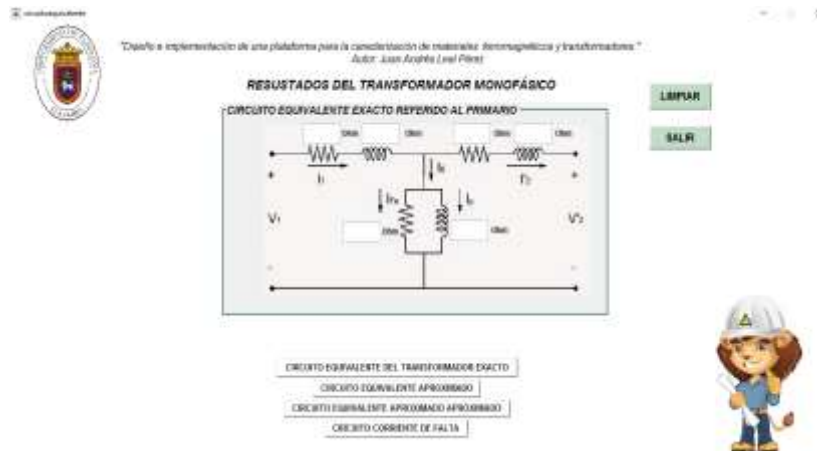


Figura 85 Mensaje de ayuda para ingresar a los modelos circuitales del transformador.

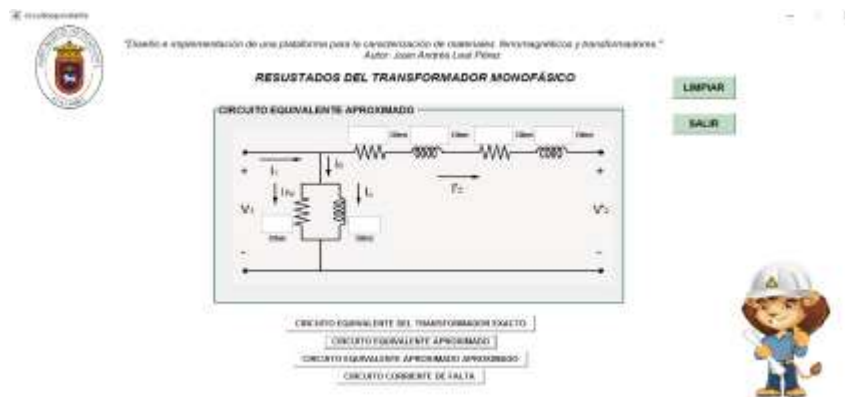
- Circuito equivalente exacto referido al primario.



**Figura 86** Circuito equivalente exacto referido al primario transformador monofásico.

En el circuito mostrado en la figura 86 se muestran los valores de la resistencia y reactancia vista desde el lado primario del transformador como los parámetros del circuito tanque

- Circuito equivalente aproximado



**Figura 87** Circuito equivalente aproximado transformador monofásico.

En el circuito aproximado se pasa al costado derecho el modelo del circuito tanque dejando en serie los parámetros del primario como los del secundario referidos a este mismo nivel.

- Circuito equivalente aproximado - aproximado.

En el circuito equivalente aproximado aproximado se observa que el valor de la corriente del lado del primario es igual a la corriente del secundario referida al lado primario haciendo muy pequeña la corriente  $I_0$  que es la suma de las corrientes que transita por la resistencia en el hierro y la reactancia de magnetización siendo aproximadamente cero solo obteniendo los valores propios de los devanados tanto la resistencia como sus respectivas reactancias.



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

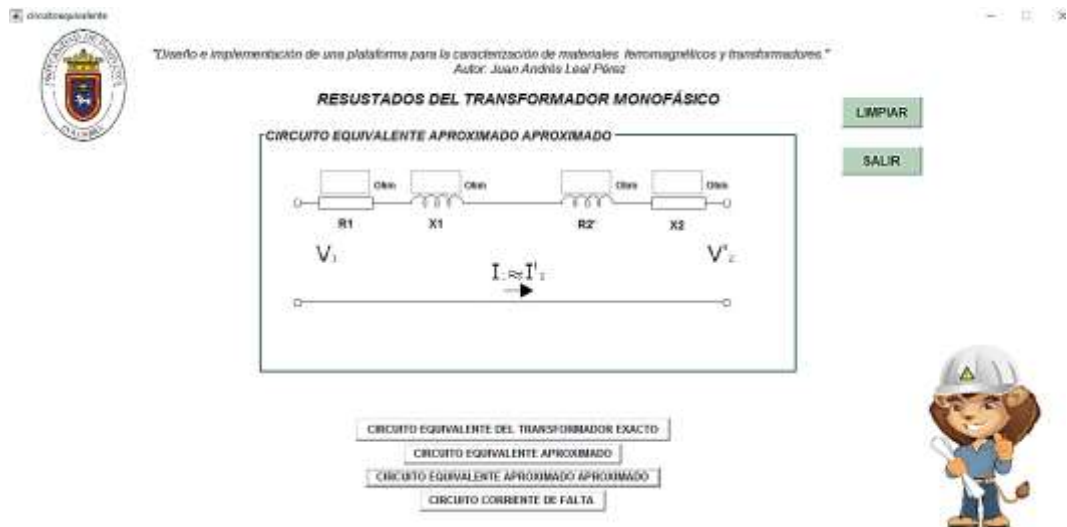


Figura 88 Circuito equivalente aproximado aproximado transformador monofásico.

- Circuito corriente de falta.

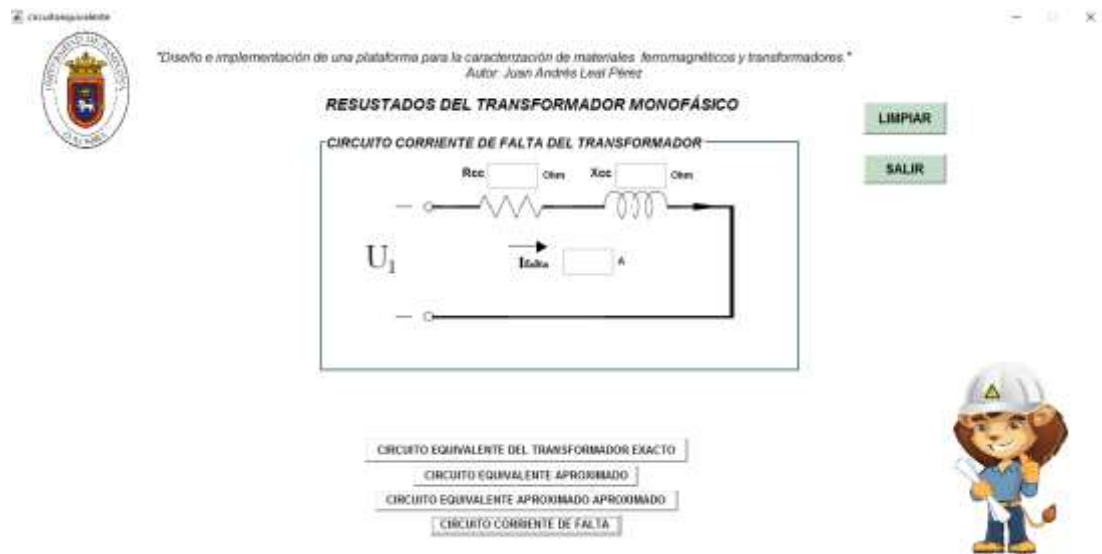
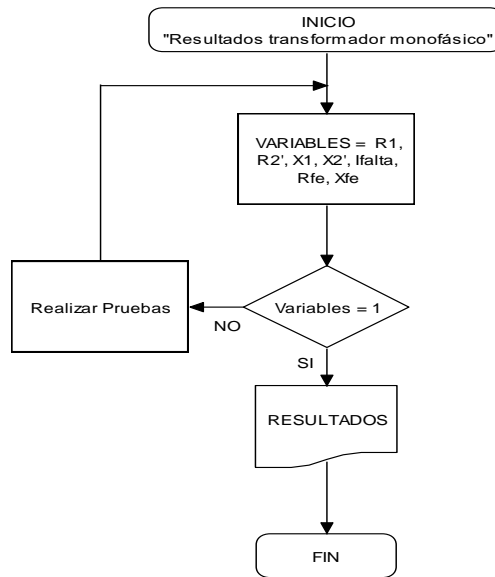


Figura 89 Circuito corriente de falta transformador monofásico.

En el modelo del circuito corriente de falta del transformador se muestra los parámetros de cortocircuito tanto el valor de su resistencia como su reactancia de cortocircuito. Donde el valor de la magnitud de la corriente de cortocircuito es aproximadamente diez veces la corriente nominal. Todos estos parámetros se hallan en la prueba de DC, vacío y cortocircuito para el transformador monofásico.

En el diagrama de flujo de la figura 95 se observa los resultados de los modelos descritos anteriormente donde primero se llaman las variables almacenadas en el Workspace de Matlab con el fin de ser visualizadas en cada una de sus casillas correspondientes, si no se encuentran almacenadas

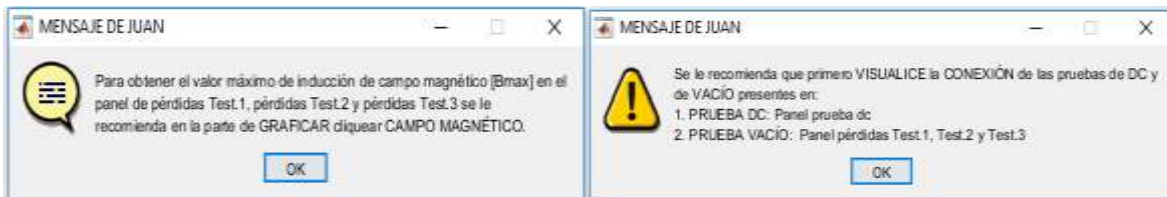
se deben volver a realizar las pruebas pertinentes con el objetivo de obtener cada uno de estos modelos.



**Figura 90 Diagrama de flujo de los modelos circuitales del transformador monofásico**

### Caracterización del núcleo ferromagnético

Para la caracterización del material ferromagnético se muestra en esta interfaz la prueba de DC. Para obtener el valor total de la resistencia, después se observa las dimensiones del núcleo del transformador a partir del tipo de núcleo sea columna o acorazado se tendrá diferente longitud magnético como área. Se observa el valor de la resistencia para una sola espira así se podrá obtener el valor del número de vueltas. Para la obtención del ciclo de histéresis es necesario realizar tres pruebas de vacío la primera se realizará al 10% de la tensión nominal donde se observarán tanto voltaje corriente campo magnético y ciclo de histéresis. Lo mismo se realizará para la prueba realizada al 50% de la tensión nominal como la de plena tensión. Estas pruebas con el propósito de obtener las pérdidas de histéresis y de Foucault como el valor del exponente de Steinmetz y el valor de conductividad del material que conforma el núcleo a caracterizar esto se observa en la siguiente interfaz figura 92 cabe decir que consta de ayudas figura 91 como también del escalamiento requerido para cada prueba como la limpieza y salida de la interfaz.



**Figura 91 Ayudas caracterización núcleo ferromagnético.**

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

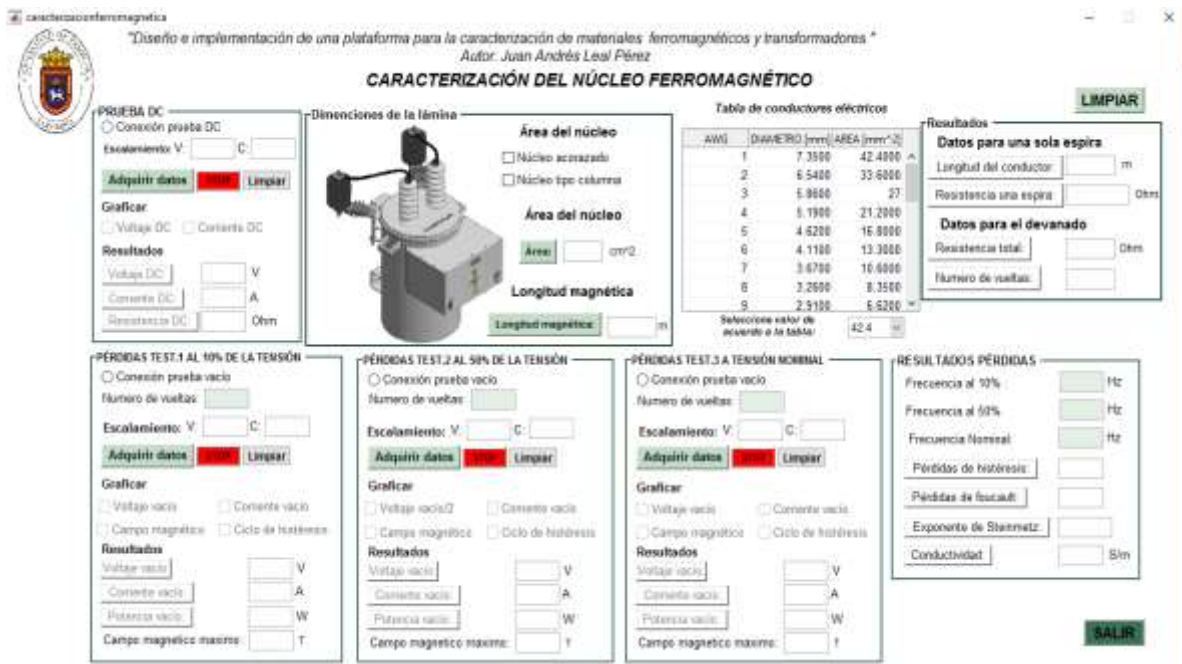


Figura 92 Caracterización núcleo ferromagnético.

Para el diagrama de flujo de la figura 93 se pueden observar que al ingresar a la interfaz se observan las dos ayudas mostradas anteriormente que nos dicen lo siguiente.

- Para obtener el valor máximo de inducción de campo magnético [Bmax] en el panel de pérdidas Test 1, pérdidas test 2 y pérdidas Test 3 se le recomienda en la parte de graficar clicar la opción campo magnético.
- Se le recomienda que primero visualice la conexión de las pruebas DC y de vacío mostradas en el panel pérdidas Test 1, Test 2 y Test 3.

Antes de esto se adquieren los datos tanto para la prueba de DC como para cada una de las pruebas de vacío realizadas.

Los pasos son los siguientes:

- Primero realizar la prueba de DC.
- Ingresar el valor del ancho y largo del núcleo
- Luego ingresar los valores de la longitud media magnética
- Se hayan los valores de la resistencia de una espira teniendo en cuenta el valor de la sección del conductor
- Se halla el valor del número de vueltas
- Se realizan las pruebas de vacío al 10% 50% y a tensión nominal
- Se halla el modelo del ciclo de histéresis para cada una de las pruebas realizadas anteriormente
- Se hallan el valor de las pérdidas de histéresis y Foucault
- Se halla el coeficiente de Steinmetz

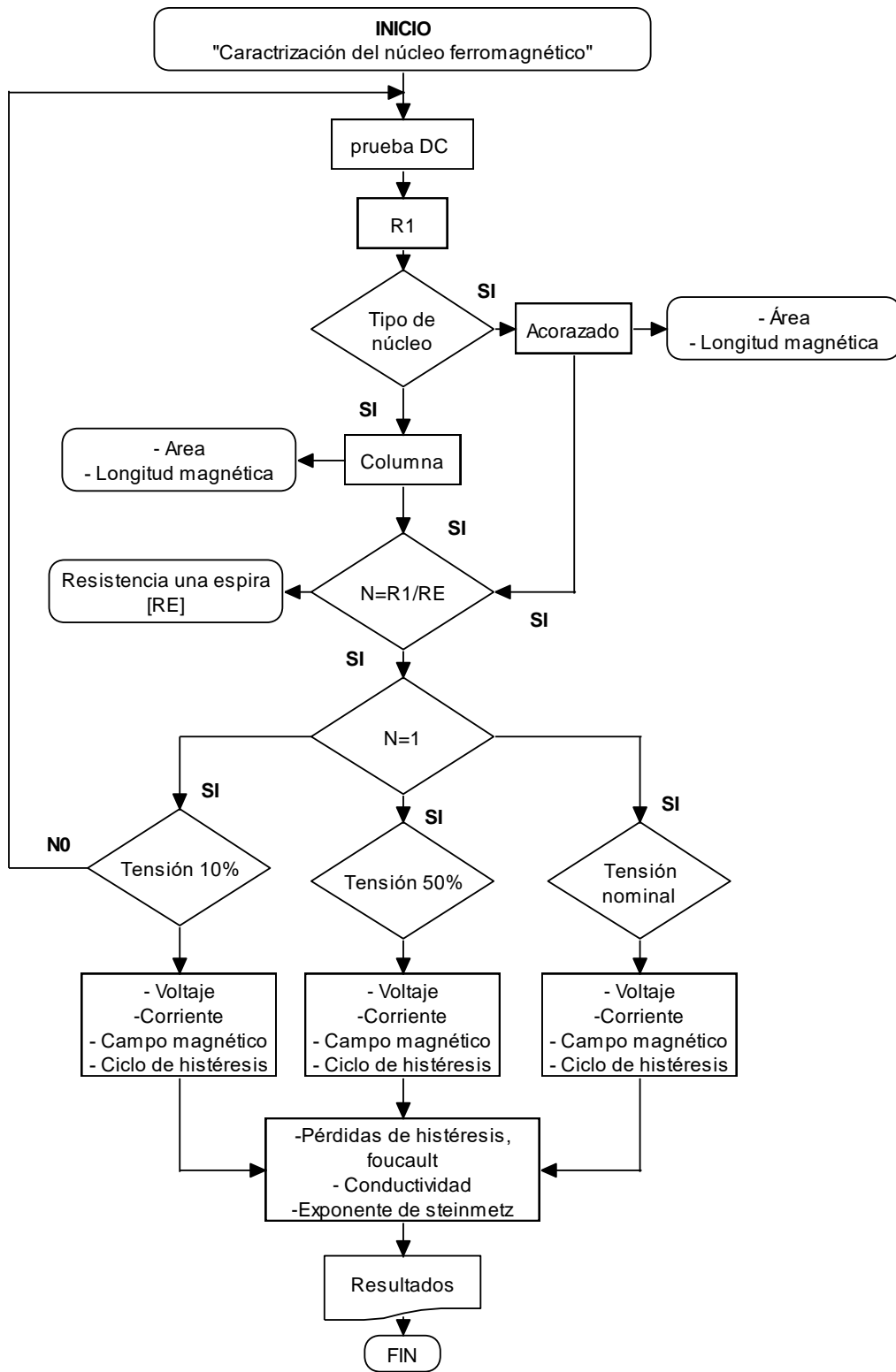


Figura 93 Diagrama de flujo caracterización del material ferromagnético

## Transformador trifásico

al ingresar en la interfaz de interfaz principal mostrada en la figura 73 en la opción de transformadores trifásicos podremos visualizar la siguiente interfaz que se mostrara en la interfaz 94. En esta interfaz nos permite visualizar la forma en que se compone un transformador trifásico sea a partir de un banco de transformadores monofásicos o un transformador trifásico solido de columna, donde podremos seleccionar de acuerdo a las características que contenga esta máquina.



Figura 94 Transformador trifásico.

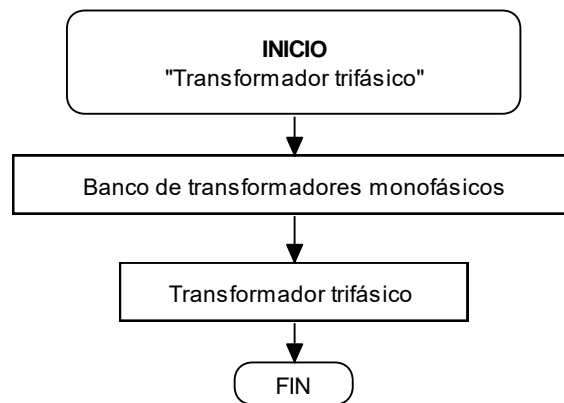


Figura 95 Diagrama de flujo interfaz principal transformador trifásico

Para el transformador trifásico se puede seleccionar dependiendo de la construcción de la máquina se un banco de transformadores monofásicos como un transformador de columna trifásico para cada uno de estos se nos desprenden las interfaces pertinentes para obtener sus modelos circuitales como su respectiva caracterización.

### Banco de transformadores monofásicos

En esta interfaz nos permite visualizar la conexión pertinente de la conformación de un transformador trifásico a partir de un banco de transformadores monofásicos se observa una tabla donde se pueden ingresar los datos propios del transformador, las pruebas básicas que se realizaran al transformador como son prueba DC prueba vacío y prueba de cortocircuito, también la caracterización del material ferromagnético, y los modelos circuitales del transformador lo descrito anteriormente se visualizara en la figura 96.

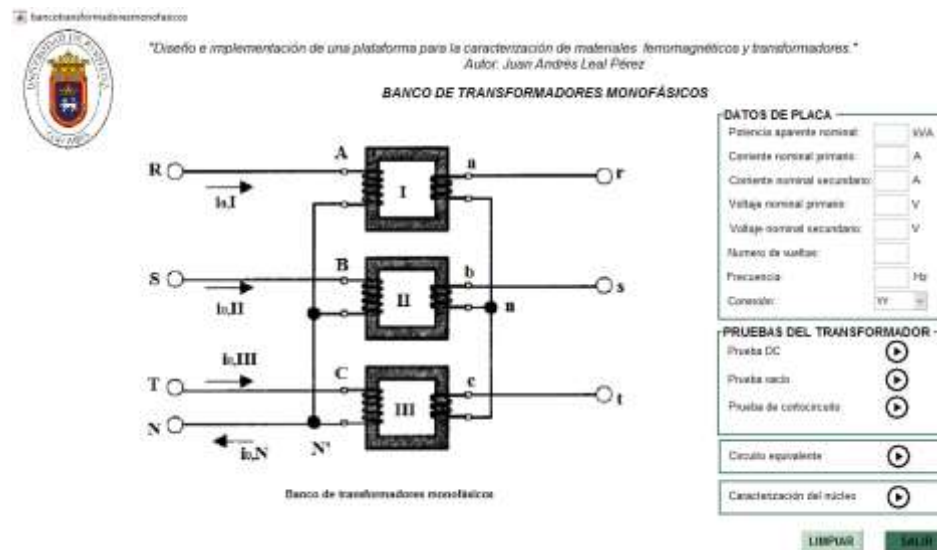
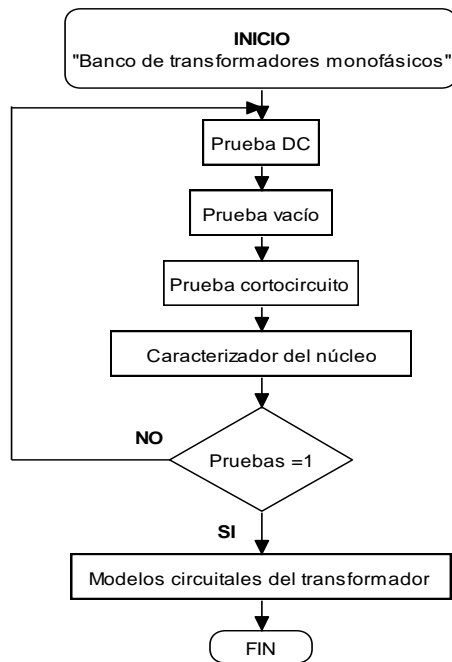


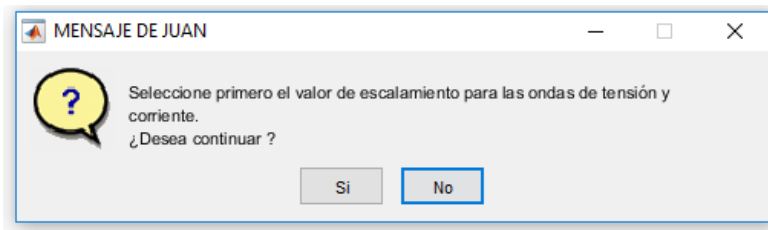
Figura 96 Interfaz transformador trifásico con banco de transformadores monofásicos.

Para el diagrama de flujo de la plataforma del banco de transformadores monofásicos se encuentra presente en la figura 97. En este diagrama se muestra las ramas que conforman la plataforma para caracterizar el material ferromagnético como la obtención de los modelos circuitales propios del transformador. se tiene presente los parámetros propios del transformador ingresados en el panel de datos de placa donde se tienen en cuenta la potencia nominal la corriente primaria la corriente secundaria el voltaje nominal del primario del secundario y su respectiva conexión sea delta estrella y Zig-Zag, en la parte inferior se tienen las pruebas de DC, vacío y cortocircuito. Se observa que se deben cumplir las condiciones de las pruebas para poder obtener los modelos circuitales propios del banco de transformadores monofásicos



**Figura 97 Diagrama de flujo para el banco de transformadores monofásicos**

La prueba de DC del transformador trifásico para el banco de transformadores monofásicos se muestra en la figura 100. En esta interfaz se visualizarán las señales adquiridas. Para poder obtener el valor de la resistencia total dependiendo del tipo de conexión en que se encuentre la máquina. Antes de esto se le pedirá al usuario que ingrese el valor del escalamiento de la señal para obtener un mayor aprovechamiento de plataforma como es el mensaje que se muestra en la figura 98. Se ha determinado inhabilitar los botones hasta que no se encuentra terminado de adquirir los datos, una forma de saber que se ha terminado con la adquisición será una ayuda visual de “go” color verde y los botones se habilitaran esto se puede ver en la figura 99.



**Figura 98 Mensaje de ayuda para la adquisición de las muestras.**



**Figura 99 Comienzo y finalización de la toma de datos**

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

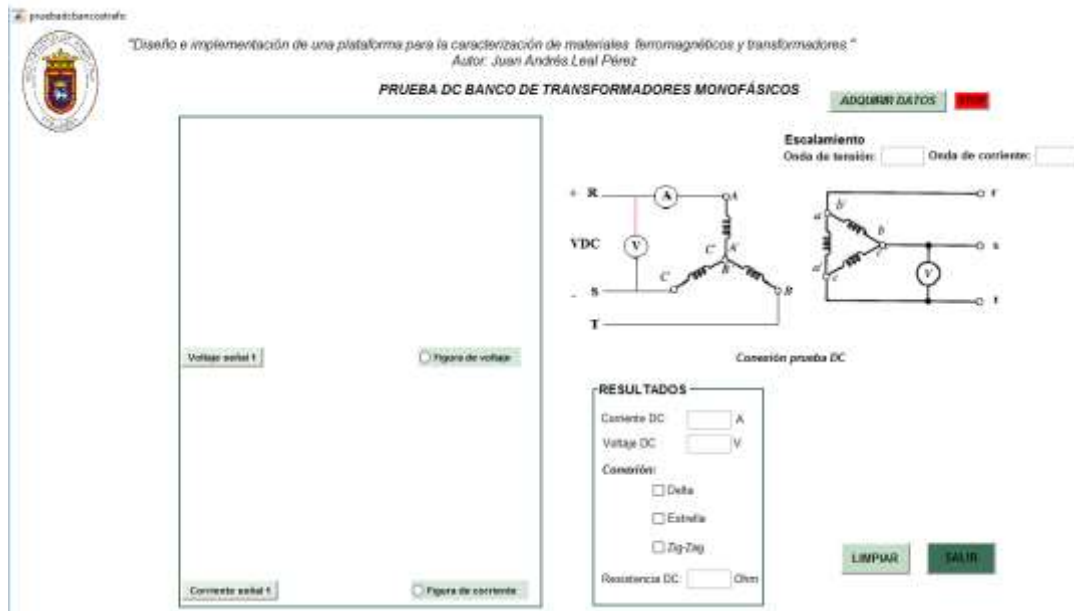


Figura 100 Interfaz prueba DC banco de transformadores monofásicos.

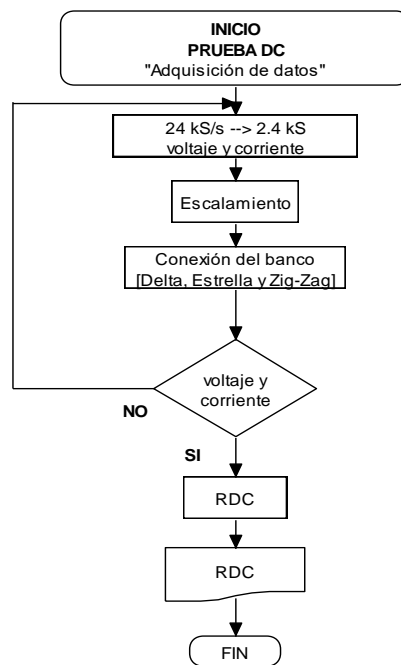


Figura 101 Diagrama de flujo prueba DC banco de transformadores monofásicos

En el diagrama de flujo anterior observamos la secuencia para poder obtener el valor de la resistencia total en el devanado partiendo de la conexión en que se encuentre el transformador sea delta, estrella o Zig-Zag, recibiendo como primer parámetro el valor con el que se desea escalar las ondas adquiridas después obtener el valor de sus valores medios tanto para el voltaje y corriente y darle solución al valor de la resistencia total a partir de la conexión del transformador.



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

Para la prueba de vacío del transformador trifásico a partir de transformadores monofásicos vista en la figura 102. Y su respectivo diagrama de flujo en la figura 103. Se visualiza en la interfaz las magnitudes eléctricas de tensión y corriente para cada uno de los Wattímetros. Al ingresar a la interfaz aparecerá una ayuda en la que nos dice que se realice primero las adquisiciones del primer Wattímetro. Se observan los resultados adquiridos por vatímetro independiente como su tensión y corriente RMS su potencia promedio. Los parámetros de corriente en la resistencia del núcleo, la corriente en la reactancia del núcleo para obtener los valores de resistencia y reactancia presente en el circuito tanque del transformador dependiendo de la conexión sea delta estrella o Zig-Zag.

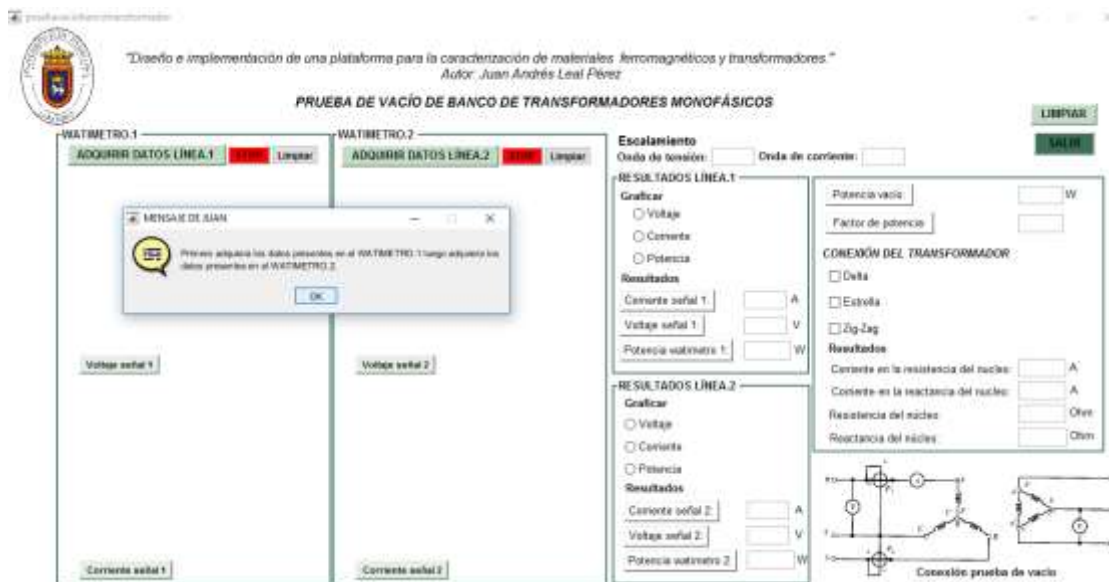


Figura 102 Interfaz prueba de vacío banco de transformadores monofásicos

En el diagrama de flujo como en la plataforma de la prueba mostrados en la figura 102 y 103. Al ingresar a esta interfaz se nos muestra un mensaje de ayuda que nos dice lo siguiente “Primero adquiera los datos presentes en el Wattímetro 1 luego adquiera los datos del Wattímetro 2” esto es para llevar un orden en la obtención de los resultados. en esta interfaz encontramos el botón de adquisición de datos, a una frecuencia de muestreo de 24 KS/s realizando un respectivo escalamiento que se realiza para ambos Wattímetros, luego se dan resultado a las magnitudes electicas de línea presentes en cada uno de los Wattímetros, al obtener los valores RMS del transformador partimos hallar el valor de la potencia como el factor de potencia total para así obtener los parámetros del circuito tanque teniendo en cuenta la conexión del transformador sea delta, estrella o Zig-Zag, los valores obtenidos de resistencia de magnetización como de reactancia de magnetización se llevan al entorno de Matlab (Workspace) donde se llamaran más adelante en la obtención de los modelos circuitales del transformador.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

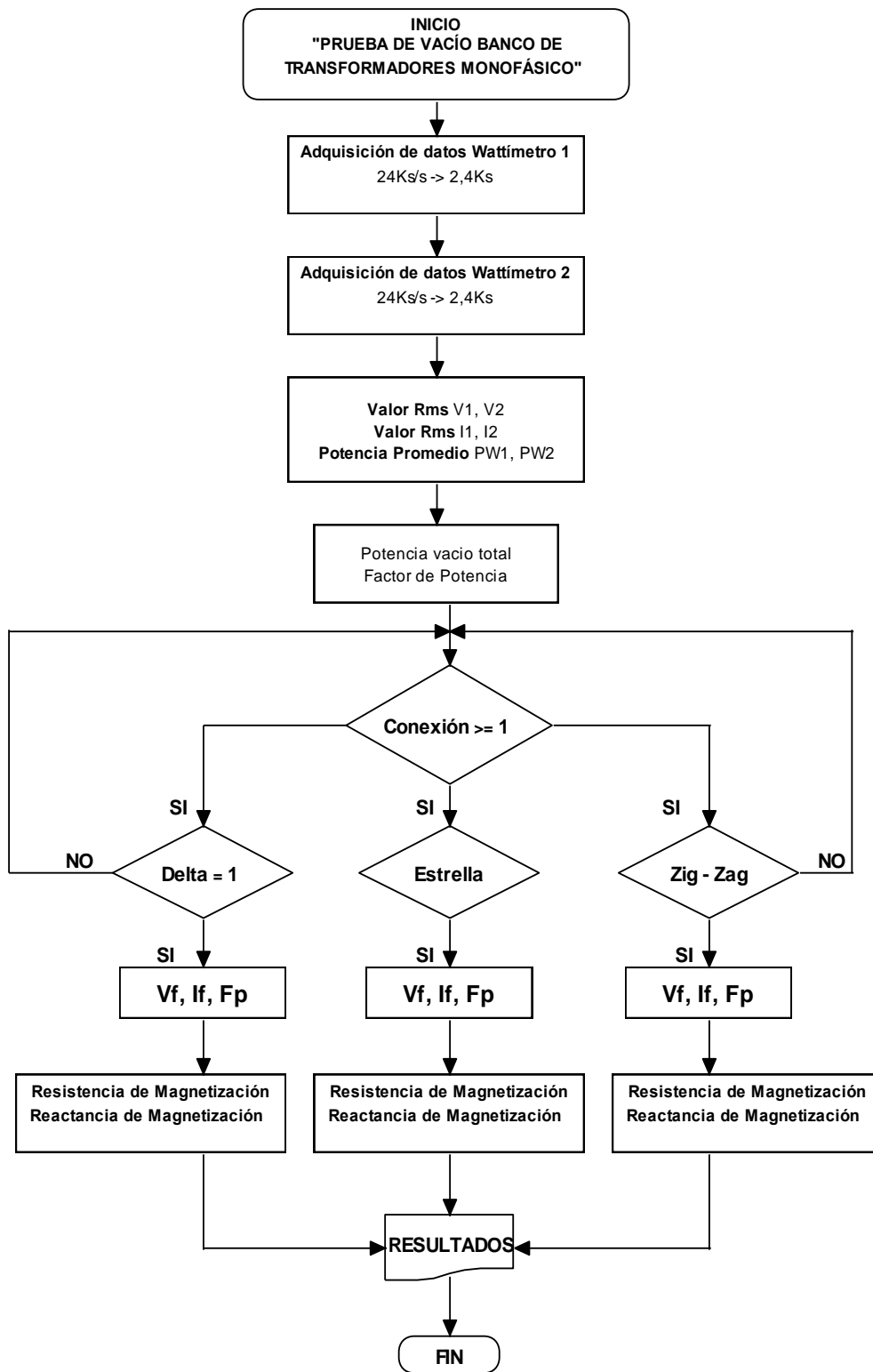


Figura 103 Diagrama de flujo prueba de vacío banco de transformadores monofásicos

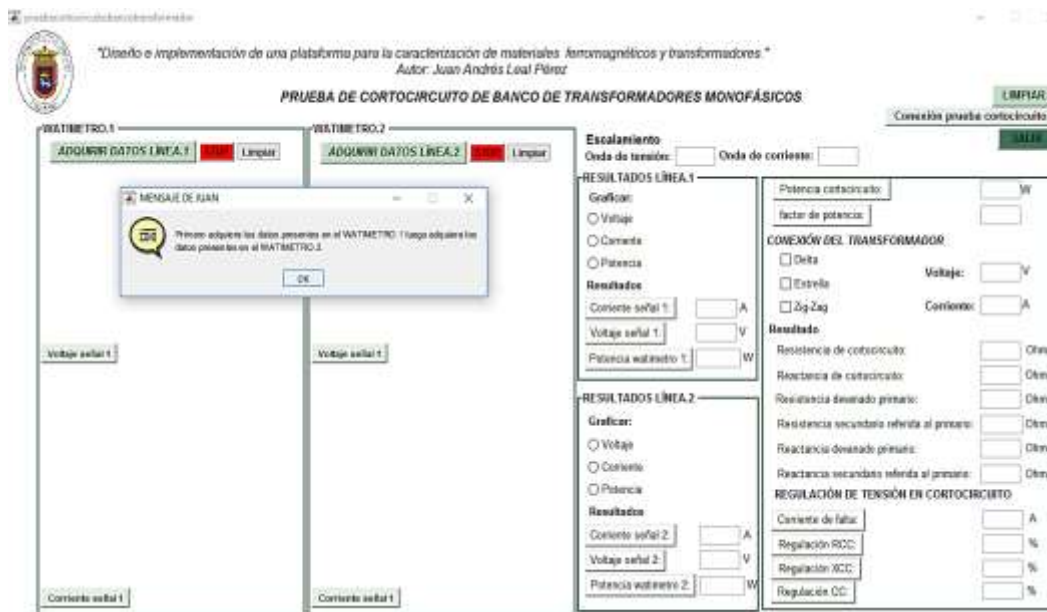
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

Para la prueba de cortocircuito del transformador trifásico a partir de transformadores monofásicos vista en la figura 104. Y su respectivo diagrama de flujo en la figura 105. Se visualiza en la interfaz las magnitudes eléctricas de tensión y corriente para cada uno de los Wattímetros. Al ingresar a la interfaz aparecerá una ayuda en la que nos dice:

Primero adquiera los datos presentes en el Wattímetro luego adquiera los datos presentes en el Wattímetro 2.

las adquisiciones del primer Wattímetro. Se observan los resultados adquiridos por Wattímetro independiente como su tensión y corriente RMS su potencia promedio. luego se halla el valor de la potencia total de cortocircuito como el factor de potencia teniendo presente el método de los dos Wattímetros.



**Figura 104 Interfaz prueba de cortocircuito banco de transformadores monofásicos**

Después de haber obtenido los valores de línea partimos hallar el valor total de potencia de cortocircuito como el factor de potencia por medio del método de los dos Wattímetros. Se analiza la conexión a la que se encuentra la máquina y así obtener los valores de la rama del modelo circuital del transformador como son los siguientes:

- Resistencia de cortocircuito.
- Reactancia de cortocircuito.
- Resistencia devanado primario.
- Resistencia secundario referida al primario.
- Reactancia devanado primario.
- Reactancia secundaria referida al primario.
- Regulación de tensión en corto circuito, resistencia reactancia y final.
- Corriente de falta.

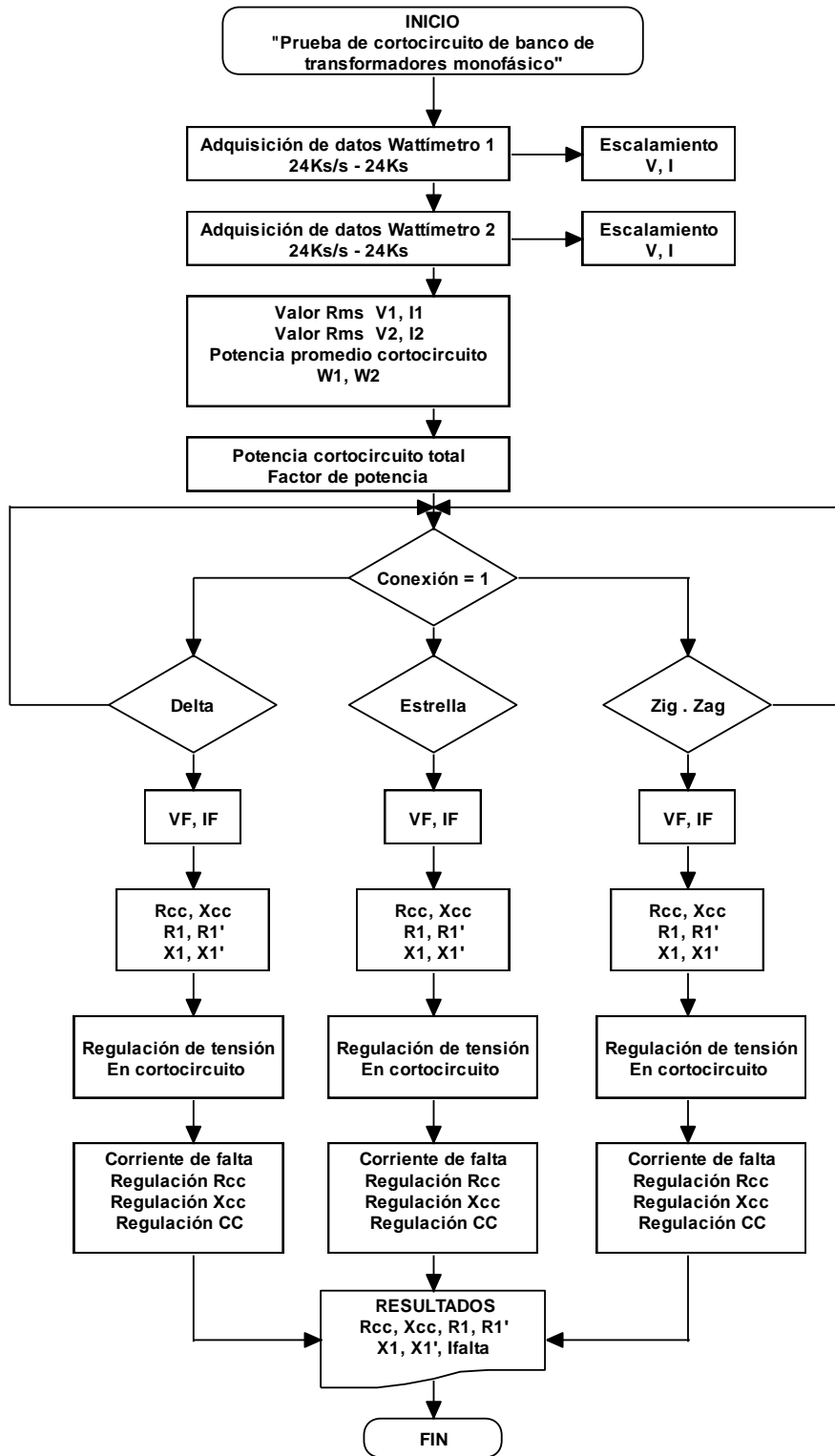
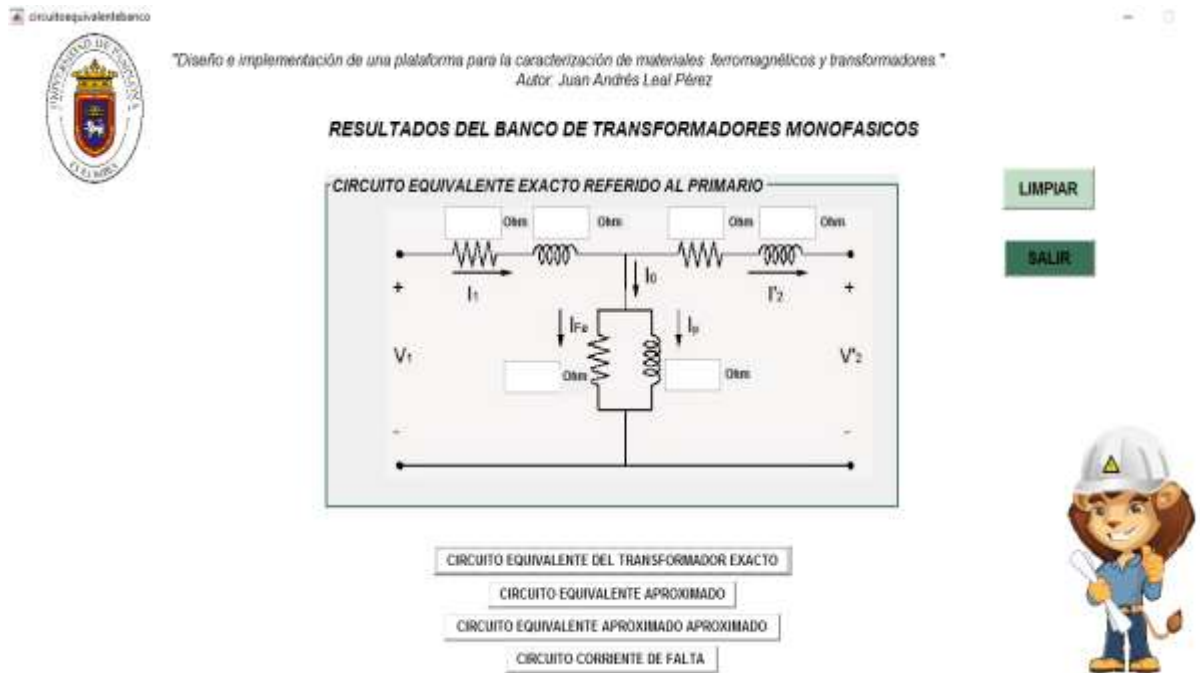


Figura 105 Diagrama de flujo prueba de cortocircuito banco de transformadores monofásicos

Al obtener los parámetros del transformador se realizará en una interfaz los modelos circuitales del transformador como se muestra en la figura 106 Y su diagrama de flujo en la figura 107 Los modelos circuitales son los mismos descritos en el transformador monofásico. Para poder obtener estos modelos es necesario haber realizado todas las pruebas del transformador DC, vacío y cortocircuito.



**Figura 106 Interfaz modelos circuitales banco de transformadores monofásicos**

Los parámetros mostrados en la interfaz son los parámetros de fase almacenados en el entorno de Matlab al haber realizado las pruebas pertinentes teniendo presente la conexión del transformador

### Transformador trifásico

Para las pruebas del transformador trifásico, su plataforma principal es la que observaremos en la siguiente figura 108 se tiene en cuenta las mismas características descritas anteriormente, tanto las conexiones para la prueba de DC figura 109, prueba de vacío figura 110 y la prueba de cortocircuito figura 111. En la prueba de DC contendremos con su conexión que se encuentre el transformador obtener el valor de resistencia total, en la prueba de vacío se obtendrán los valores del circuito tanque como resistencia y reactancia presente en el núcleo del transformador, en la prueba de cortocircuito se tiene en cuenta tanto el valor de la resistencia obtenida en la prueba de DC como el valor de la tensión nominal de la prueba de vacío para encontrar el valor de corriente de falta como los parámetros de regulación de cortocircuito. Por último, los resultados se mostrarán en el modelo circuitual del transformador vistos en la figura 112. La caracterización del material ferromagnético se muestra en la figura 113 donde se trabaja con un núcleo del tipo columna. Donde se tiene en cuenta el valor del área del núcleo, la longitud media magnética, para obtener el número de vueltas del transformador donde se realicen las pruebas.

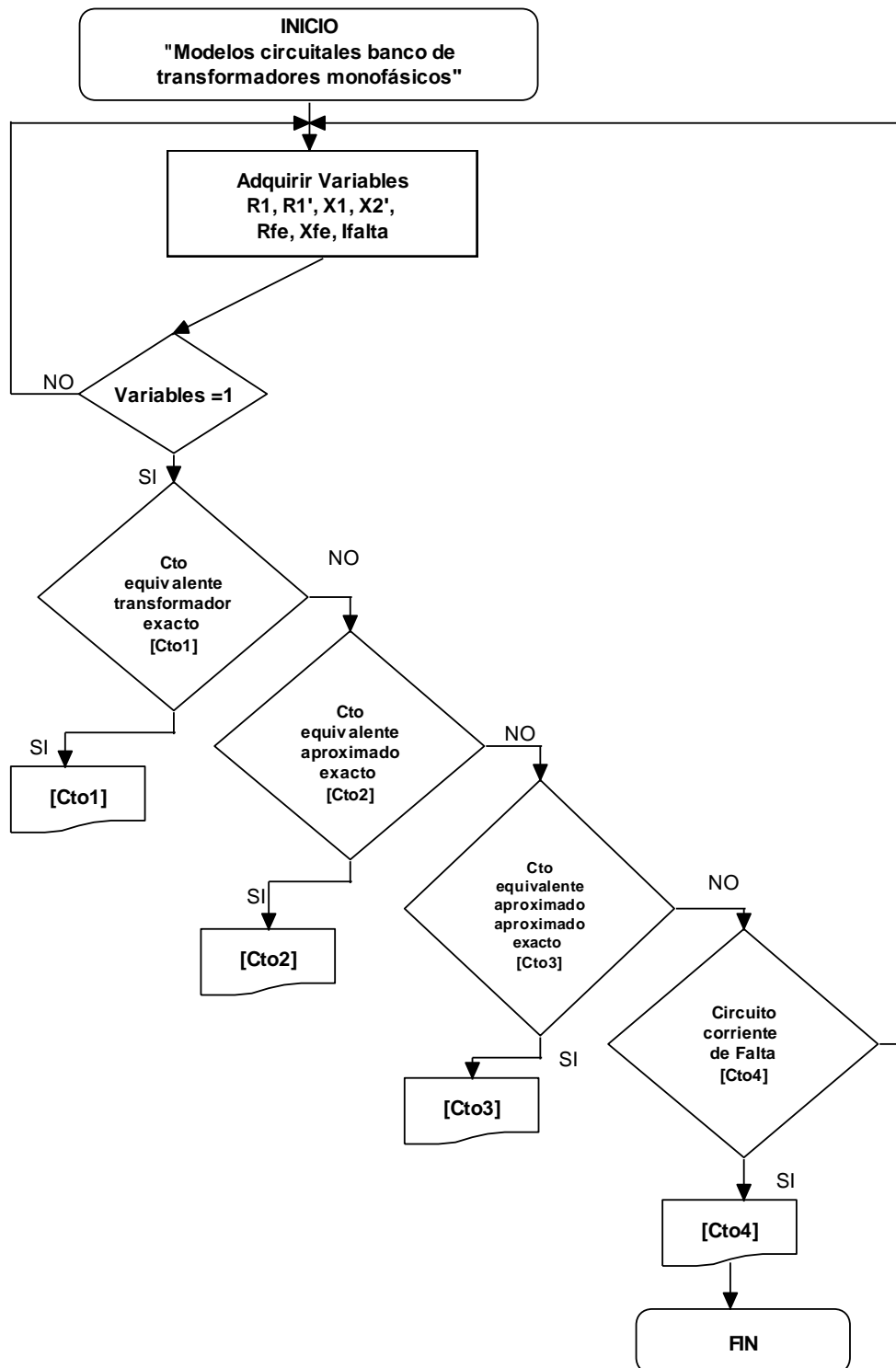


Figura 107 Diagrama de flujo modelos circuitales banco de transformadores monofásicos

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

Para el transformador trifásico se tienen en cuenta las mismas características que el banco de transformadores monofásicos exceptuando la caracterización del material ferromagnético, debido que el transformador trifásico consta de su núcleo del tipo columna



Figura 108 Interfaz transformador trifásico

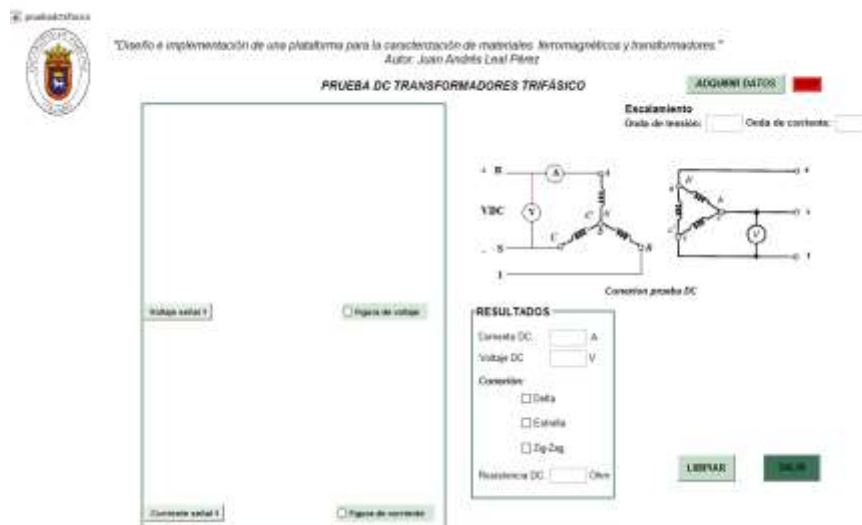


Figura 109 Interfaz prueba de DC transformador trifásico.

Para la realización de la prueba de DC del transformador trifásico se obtiene el valor de la resistencia de la misma manera que para el banco de transformadores monofásicos, cada uno de los parámetros se permanecen bloqueados hasta no haber culminado con la adquisición de los datos, esta interfaz consta de las opciones descritas en el transformador monofásico como son las ayudas y los botones de limpiar y salir que permiten al usuario tener un mejor manejo.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

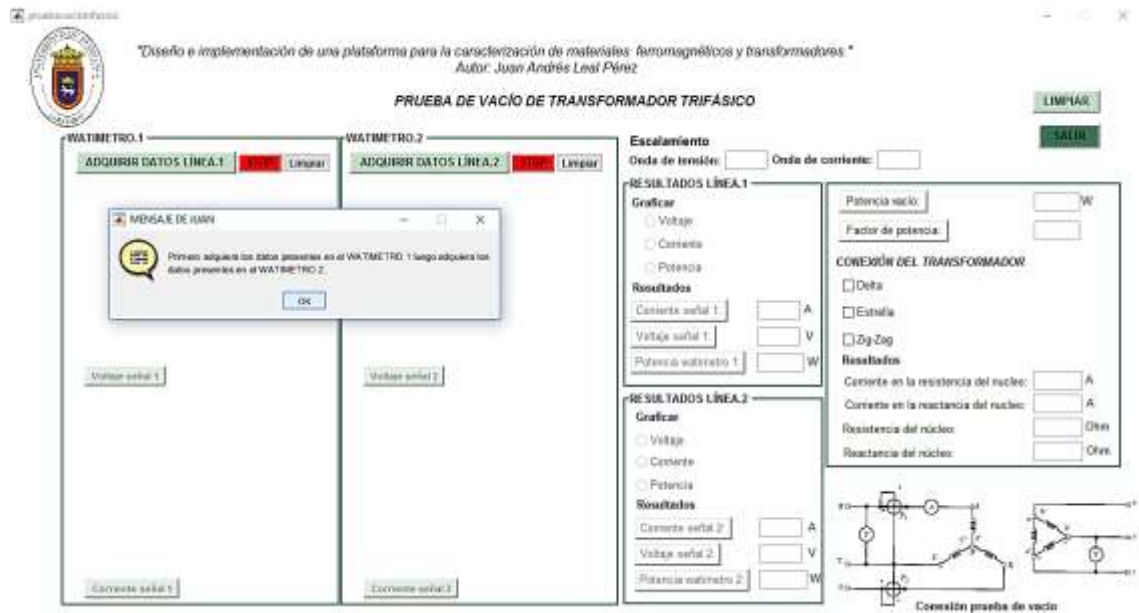


Figura 110 Interfaz prueba de vacío transformador trifásico

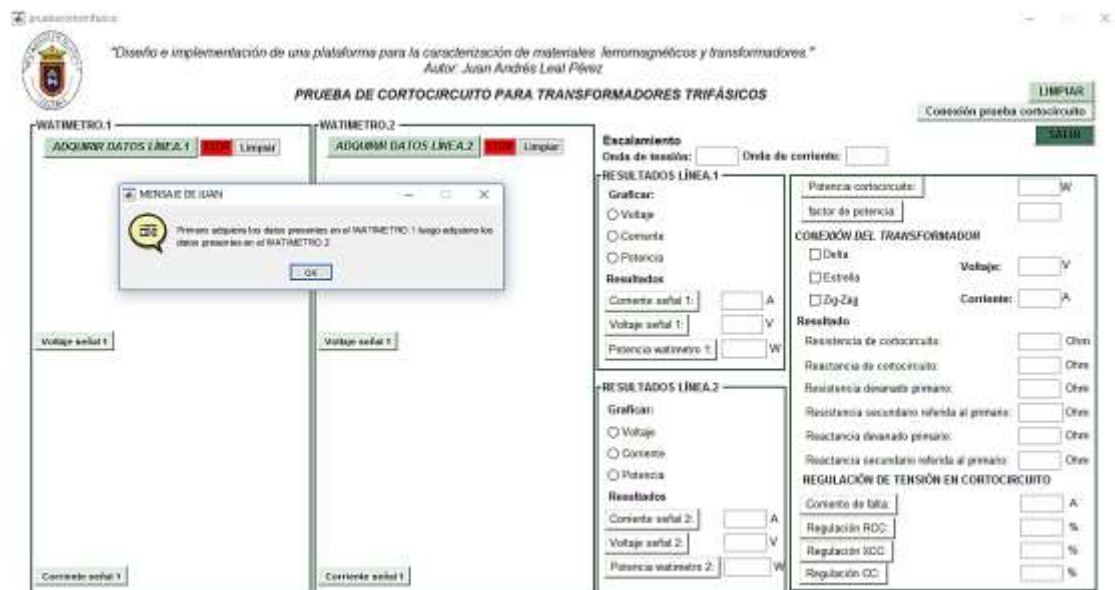


Figura 111 Interfaz prueba de cortocircuito transformador trifásico

Para los modelos circuitales del transformador trifásico mostrados en la figura 112, se determinarán los mismos modelos que para el banco de transformadores monofásicos como son:

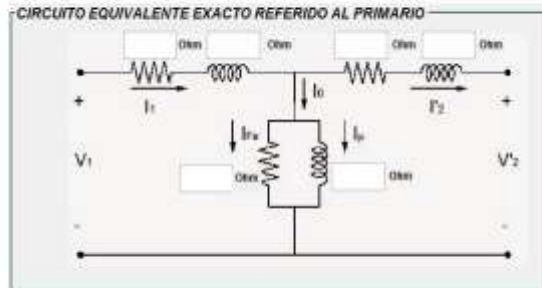
- Circuito equivalente exacto referido al primario
- Circuito equivalente aproximado
- Circuito equivalente aproximado aproximado
- Circuito corriente de falta





"Diseño e implementación de una plataforma para la caracterización de materiales ferromagnéticos y transformadores."  
Autor: Juan Andrés Leal Pérez

RESULTADOS DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS



- CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR EXACTO
- CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO APROXIMADO
- CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO
- CIRCUITO CORRIENTE DE FALTA



Figura 112 Interfaz modelos circuitales transformador trifásico



"Diseño e implementación de una plataforma para la caracterización de materiales ferromagnéticos y transformadores."  
Autor: Juan Andrés Leal Pérez

CARACTERIZACIÓN MATERIAL FERROMAGNÉTICO TRANSFORMADORE TRIFÁSICO

**Tabla de conductores eléctricos**

AWG	DIAMETRO (mm)	AREA (mm <sup>2</sup> )
1	7.3500	42.400
2	6.5000	33.600
3	5.9500	28.000
4	5.1900	21.200
5	4.6200	16.900
6	4.1100	13.300
7	3.6700	10.600
8	3.2500	8.350

**RESULTADOS**

Longitud del conductor:  m

Resistencia una espira:  Ohm

Resistencia total:  Ohm

Número de vueltas:

Figura 113 Caracterización ferromagnética núcleo transformador trifásico

El modelo presente en la caracterización del material ferromagnético mostrado en la figura 113 nos permite obtener el valor del número de vueltas del transformador como la obtención del ciclo de histéresis para el valor de pérdidas de histéresis como de Foucault se ingresan los valores de frecuencia presentes para cada una de las pruebas de vacío realizadas al 10% de la tensión nominal 50% de la tensión nominal y a tensión nominal.

## VI. RESULTADOS

### VI.1 Caracterización del material ferromagnético

Para la caracterización del material ferromagnético mostrada en la figura 92. Se realizó el montaje pertinente para prueba de DC mostrado en la siguiente figura.



**Figura 114 Montaje prueba DC transformador monofásico**

- Prueba DC: para la prueba DC se alimentó al transformador por el lado de baja tensión obteniendo los siguientes parámetros. Por el osciloscopio de marca FLUKE.



**Figura 115 Magnitud de tensión y corriente prueba DC visualizados por el osciloscopio de marca FLUKE**

La visualización de estos parámetros por la plataforma se muestra en la figura 116.

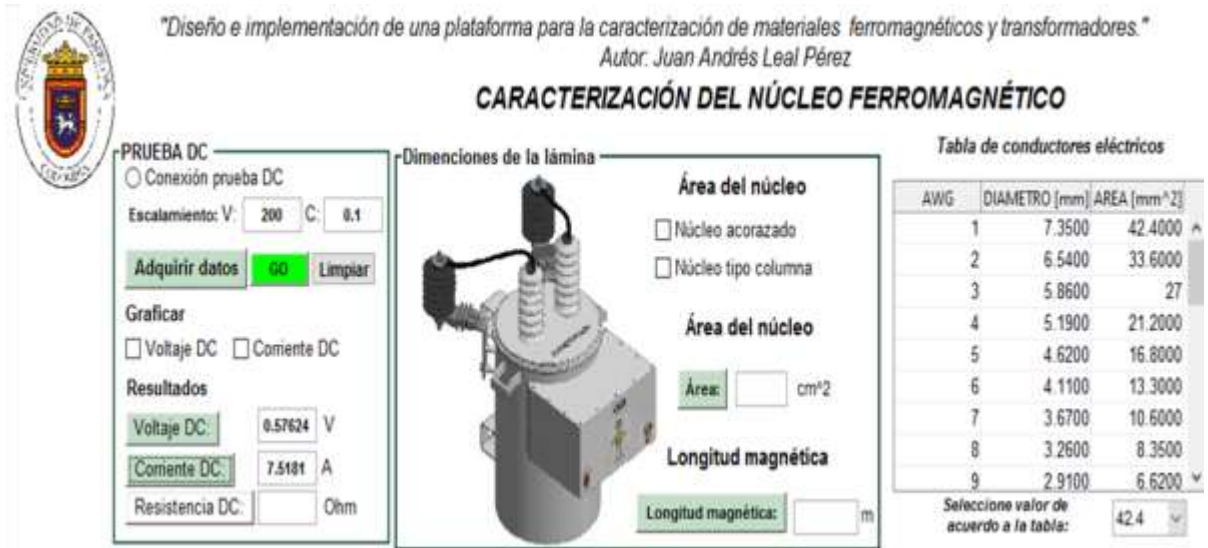


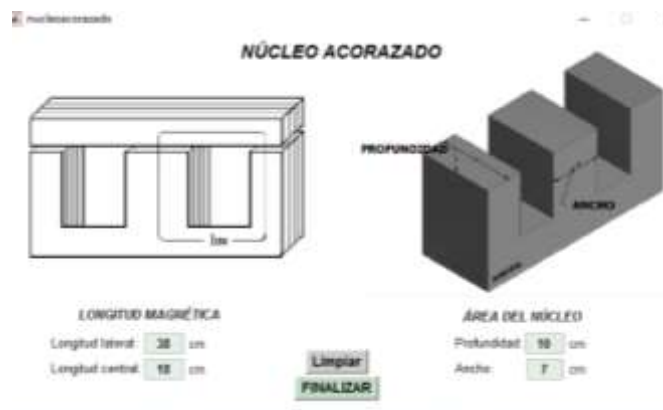
Figura 116 Prueba DC magnitud de voltaje y corriente

Luego se aumentó la tensión de alimentación y se obtuvieron los siguientes resultados visualizados en la figura 117



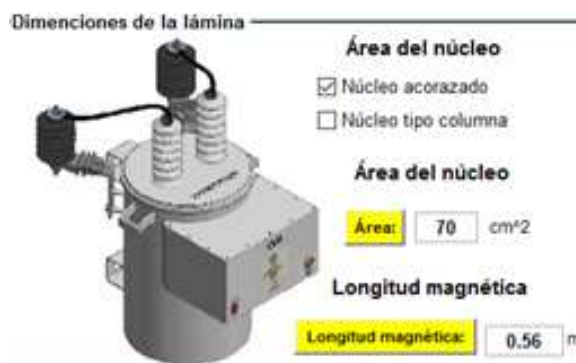
Figura 117 Prueba DC realizada por el lado de baja del transformador monofásico

- Después de haber realizado la prueba de DC, pasamos a ingresar los datos de las dimensiones de la lámina de acuerdo al tipo de transformador que se le esté realizando la prueba, en nuestro caso es un transformador con núcleo acorazado, al dar clic en la ventana de núcleo acorazado se desprende una interfaz que nos pide que ingresemos los valores de longitud central, longitud lateral, como también el ancho y la profundidad del núcleo esto se visualiza en la siguiente figura 118.



**Figura 118** Parámetros propios del tipo de núcleo del transformador monofásico a caracterizar

Después de haber dado clic en el botón de finalizar llegamos a la interfaz principal donde damos clic en el botón de longitud magnética y área del núcleo. Para nuestro transformador obtuvimos el valor de longitud media magnética y área mostrados en la figura 119.



**Figura 119** Dimensiones del núcleo tipo acorazado transformador monofásico

Después de haber realizado la prueba de DC y de obtener las dimensiones de la lámina, partimos a la obtención del número de vueltas una manera es obtener el valor de la resistencia de una espira para esto debemos conocer la longitud del conductor, para la resistencia de una espira seleccionamos el área en milímetros cuadrados el conductor que forma el devanado donde se realizaron las pruebas. Por último, se divide el valor de la resistencia total sobre la resistencia en una espira para obtener el número de vueltas.

AWG	DIAMETRO [mm]	AREA [mm <sup>2</sup> ]
6	4.1100	13.3000
7	3.6700	10.6000
8	3.2600	8.3500
9	2.9100	6.6200
10	2.5900	5.2700
11	2.3000	4.1500
12	2.0500	3.3100
13	1.8300	2.6300
14	1.6300	2.0800

Resultados	
<b>Datos para una sola espira</b>	
Longitud del conductor:	0.425 m
Resistencia una espira:	0.001379 Ohm
<b>Datos para el devanado</b>	
Resistencia total:	0.054854 Ohm
Numero de vueltas:	39.7781

Seleccione valor de acuerdo a la tabla: 5.27

**Figura 120** Obtención del número de vueltas para el transformador monofásico

- para la obtención de las pérdidas de histéresis y de Foucault como del valor de conductividad se realizan tres pruebas de vacío a tenciones diferentes para así obtener diferentes niveles de inducción máximos a diferentes frecuencias como también las potencias para realizar de manera numérica el análisis para obtener estos parámetros.

La realización de la primera prueba la podemos visualizar en la figura 121. donde hacemos una comparación con los valores mostrados con el equipo de calidad de la energía de marca FLUKE el valor de la potencia medida experimentalmente se observa en la figura 122. obteniendo los parámetros de potencia de vacío, la corriente de vacío y campo magnético máximo mostradas en las figuras 122, 123 y 124

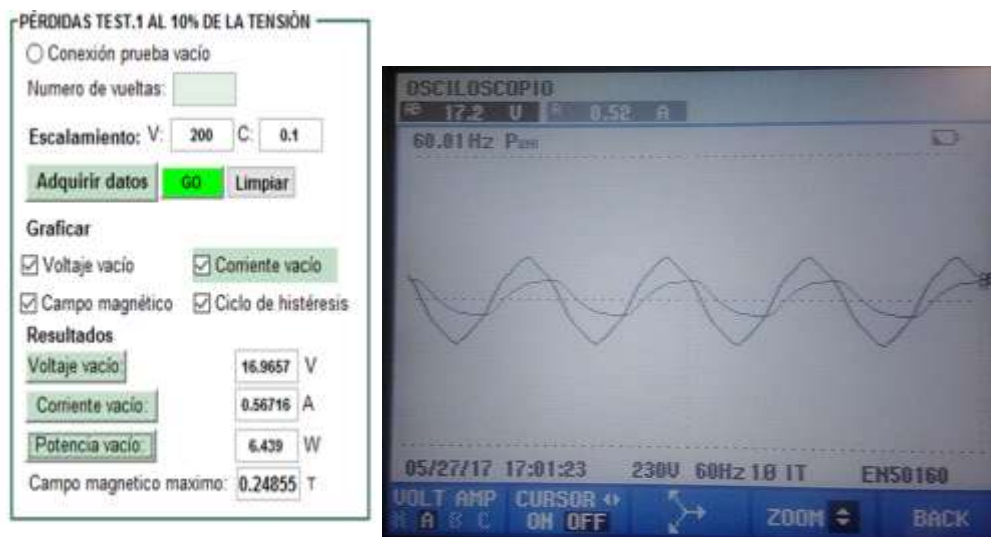


Figura 121 Prueba de vacío con una tensión de alimentación del trasformador por el lado de baja tensión de 17.2 V.

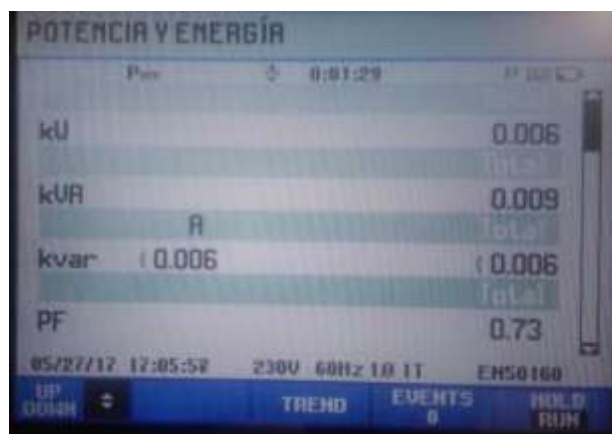
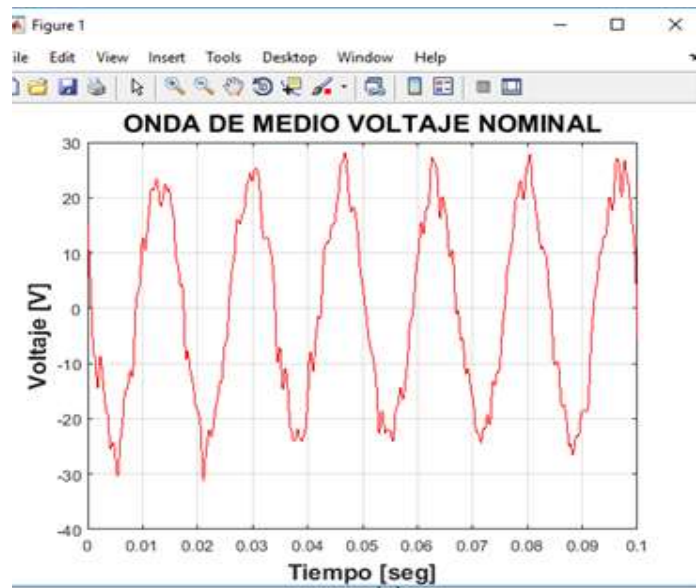
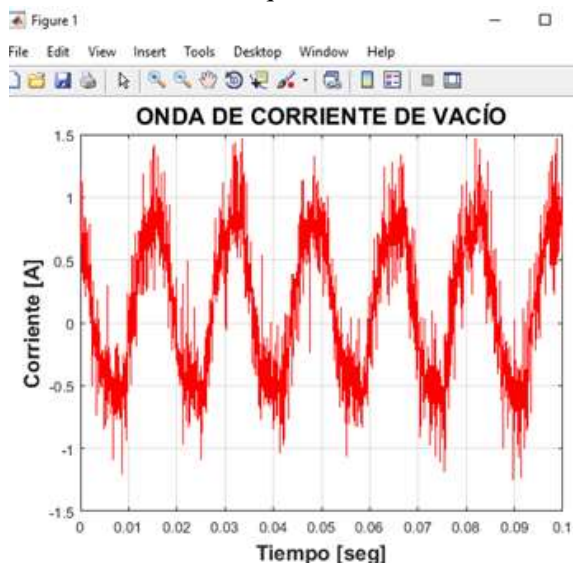


Figura 122 Potencia de vacío para el primer test caracterización del material ferromagnético



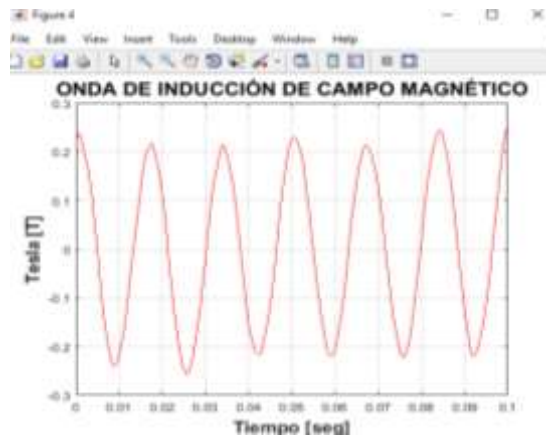
**Figura 123 Onda de tensión de la primera prueba de vacío para la caracterización del material ferromagnético**

Esta onda de tensión se le realizó un filtro pasa baja eliminando las altas frecuencias, pero aun así se visualiza de esta forma debido al ruido que nos proporcionan los equipos de adquisición como los flujos dispersos presentes en la misma máquina.



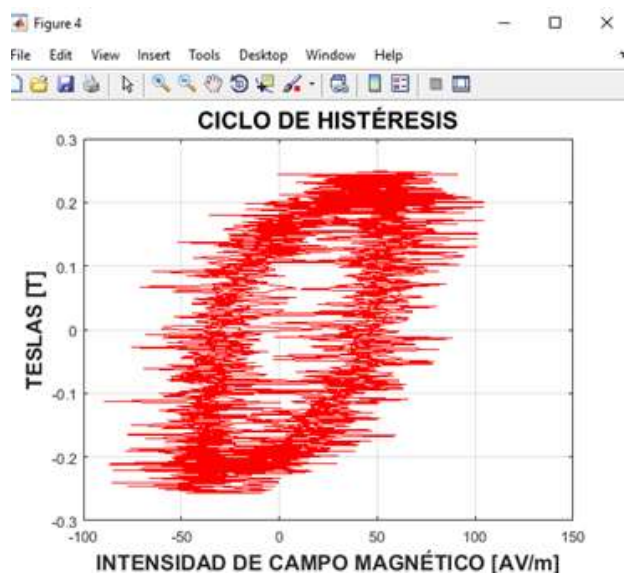
**Figura 124 Onda de corriente de la primera prueba de vacío para la caracterización del material ferromagnético**

En esta figura se observa el ruido que se presenta a la hora de adquirir la señal, esto es debido tanto a los equipos en especial a los sensores y al propio transformador, y debido a que la magnitud de corriente que se está adquiriendo es de magnitud muy pequeña.



**Figura 125 Onda de inducción de campo magnético primera prueba de vacío caracterización del núcleo**

Al haber obtenido los parámetros de inducción de campo magnético fuerza magnetomotriz podremos mostrar el ciclo de histéresis para la adquisición de 6 ciclos visto en l figura 126, esta forma se debe a los ruidos presentes en los equipos con que se adquieren las muestras como a los flujos dispersos que se presentan en el núcleo del transformador



**Figura 126 Ciclo de histéresis para la primera prueba de vacío caracterización del núcleo monofásico**

Para la realización de la segunda prueba como se muestra en la figura 127. Y realizando una comparación con las magnitudes mostradas en el equipo de calidad de la energía donde se mostrará también el valor de la potencia de vacío y se compara con dicho valor obtenido en la interfaz realizada donde se puede ver en la figura 128.



Figura 127 Segunda prueba de vacío con una tensión de alimentación del transformador por el lado de baja de 35.5 V



Figura 128 Potencia de vacío para el segundo test para la caracterización del material ferromagnético

Las adquisiciones de la señal se tomaron a 0.1 s obteniendo una cantidad de muestras de 2400 para seis ciclos y 800 para dos ciclos mostradas a continuación en la figura 129 se observa la onda de tensión, en la figura 130 se visualizará la corriente, 131 la inducción de campo magnético y por último el ciclo de histéresis figura 132.

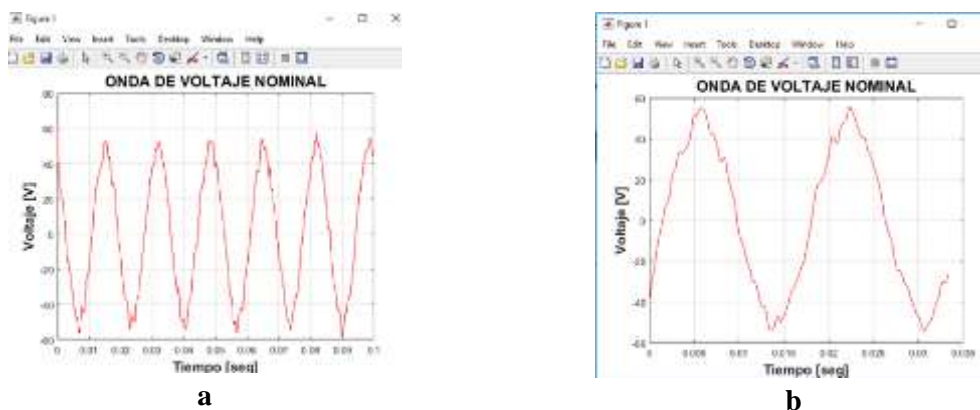


Figura 129 Onda de tensión segunda prueba de vacío caracterización de material ferromagnético a) seis ciclos b) dos ciclos



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

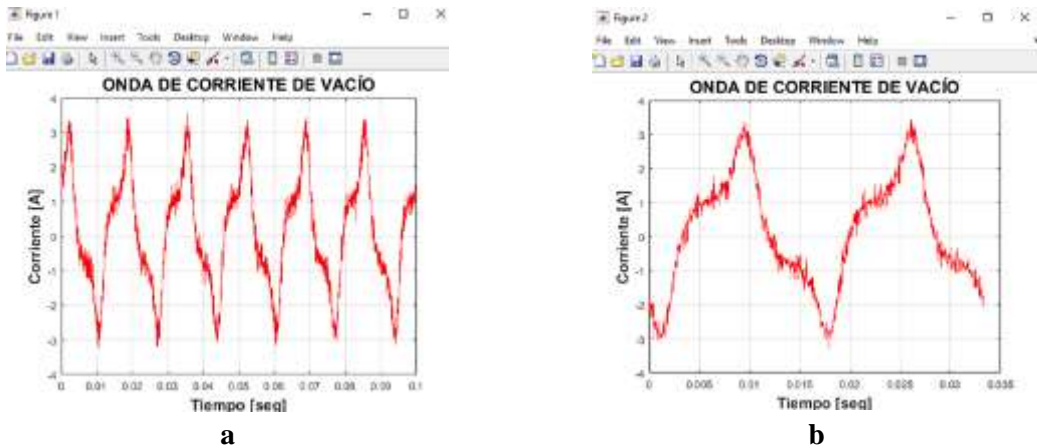


Figura 130 Onda de corriente segunda prueba de vacío caracterización de material ferromagnético a) seis ciclos b) dos ciclos

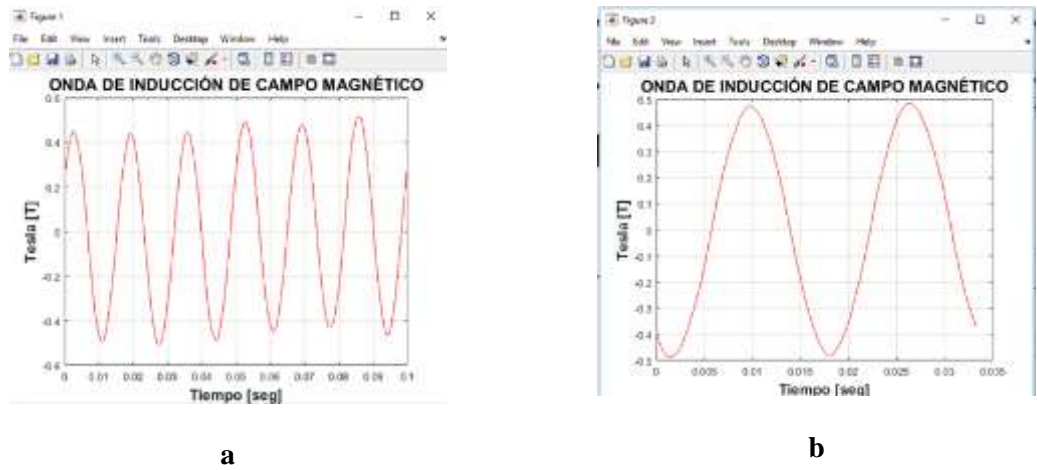


Figura 131 Onda de inducción de campo magnético segunda prueba de vacío caracterización de material ferromagnético a) seis ciclos b) dos ciclos

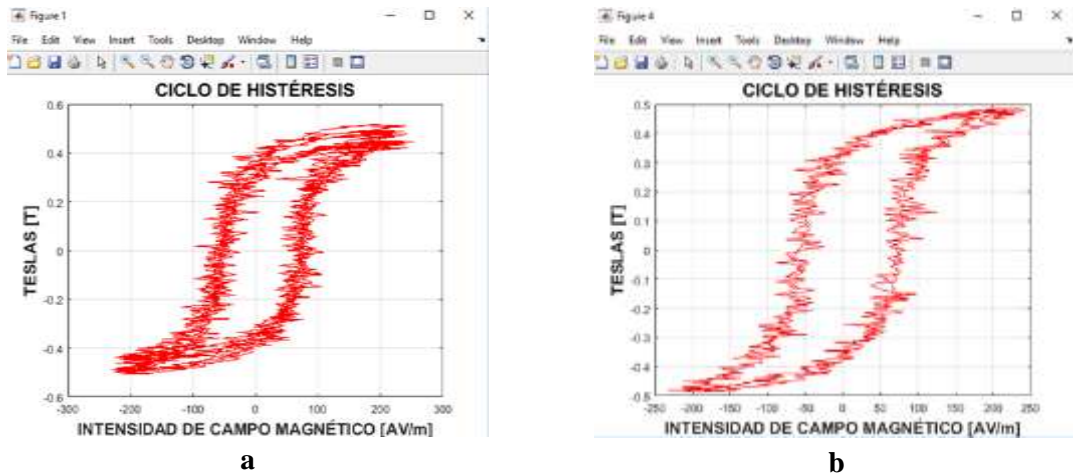


Figura 132 Ciclo de histéresis segunda prueba de vacío caracterización de material ferromagnético a) seis ciclos b) dos ciclos.

Para la realización de la tercera prueba de vacío como se muestra en la figura 133. Y realizando una comparación con las magnitudes mostradas en el equipo de calidad de la energía donde se mostrará también el valor de la potencia de vacío y se compara con dicho valor obtenido en la interfaz realizada donde se puede visualizar la magnitud de la potencia de vacío figura 134.



a



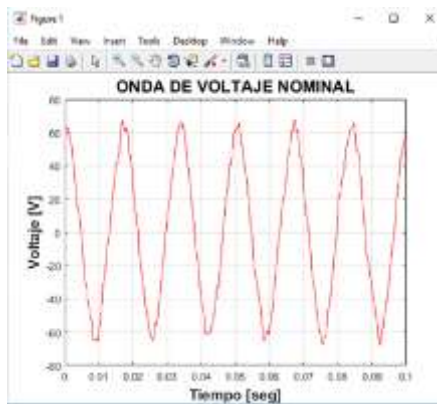
b

**Figura 133 Tercera prueba de vacío caracterización del material ferromagnético a) resultados a tensión nominal 44 V b) datos obtenidos por el equipo calidad de la energía.**

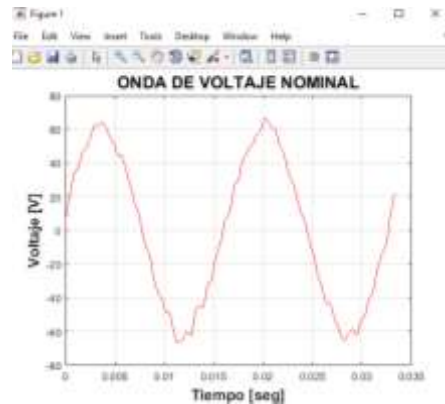


**Figura 134 Potencia de vacío para el tercer test para la caracterización del material ferromagnético**

Las adquisiciones de la señal se tomaron a 0.1 s obteniendo una cantidad de muestras de 2400 para seis ciclos y 800 para dos ciclos mostradas a continuación en la figura 135 se observa la onda de tensión comparada para seis ciclos como para dos, lo mismo para en la figura 136 se visualizará la corriente, 137 la inducción de campo magnético y por último el ciclo de histéresis figura 138. Las ondas se observan de una forma distorsionada debido al ruido que se le está ingresando por las sondas de adquisición, y debido a que el transformador llega al punto de saturación. A la onda de tensión se le está realizando un filtro pasa baja para poder eliminar las altas frecuencias.

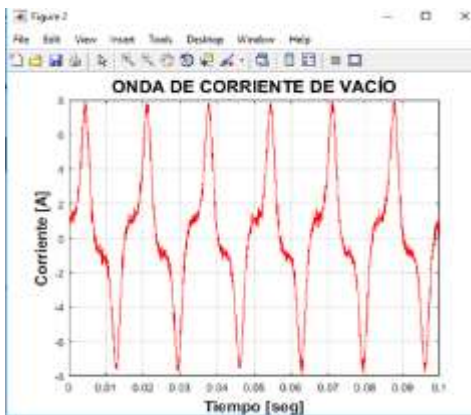


a

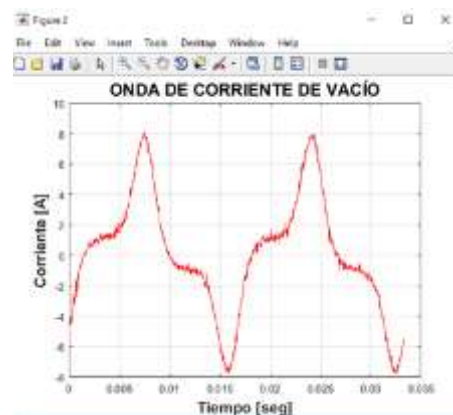


b

Figura 135 Onda de tensión tercera prueba de vacío caracterización de material ferromagnético a) seis ciclos b) dos ciclos

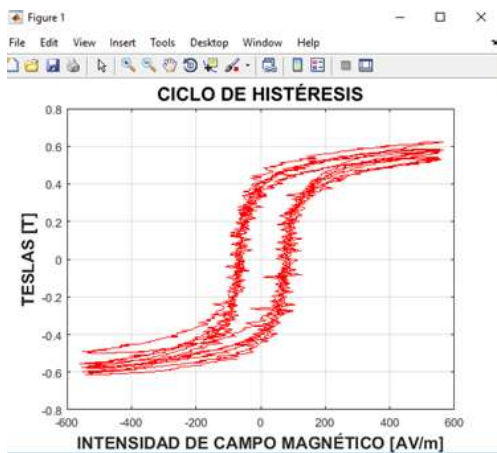


a

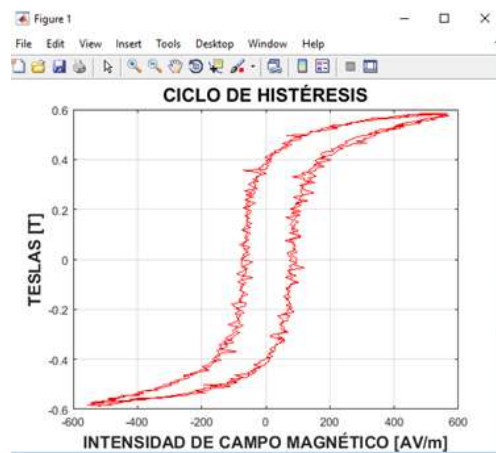


b

Figura 136 Onda de corriente tercera prueba de vacío caracterización de material ferromagnético a) seis ciclos b) dos ciclos



a



b

Figura 137 Ciclo de histéresis tercera prueba de vacío caracterización de material ferromagnético a) seis ciclos b) dos ciclos.

La obtención de las pérdidas de histéresis como de Foucault a través de las tres pruebas de vacío variando la magnitud de tensión, como el valor de conductividad presente en el material y el coeficiente de Steinmetz, es mostrado en la siguiente figura.



Figura 138 Interfaz caracterización del material ferromagnético

## VI.2 Pruebas transformador monofásico

El montaje de la prueba de DC como de vacío y cortocircuito se realizó por el lado de baja tensión como de alta tensión, obteniendo los modelos circuitales tanto para baja como alta tensión como. Se mostró en la figura 114 la conexión para realizar la prueba de DC. Los parámetros al ingresar a la interfaz del transformador monofásico es la siguiente.

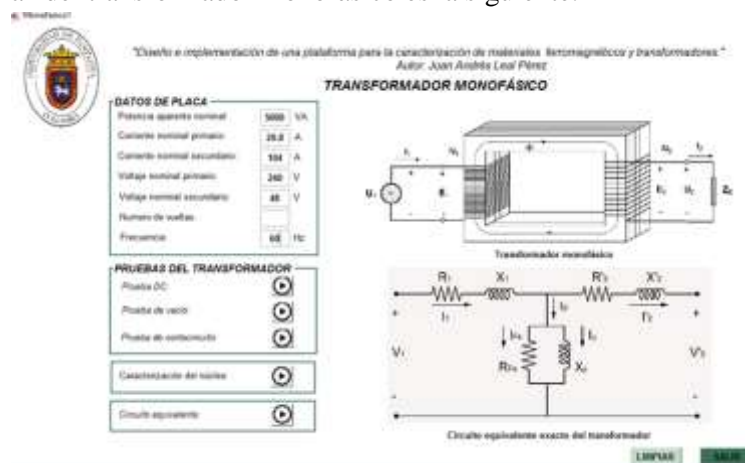


Figura 139 Entorno de trabajo transformador monofásico

Las pruebas se realizaron por el lado de alta tensión obteniendo los siguientes resultados:

- Para la prueba de DC mostrada en la figura 140 se observa los valores adquiridos como también los mostrados por el equipo de la calidad de la energía de marca FLUKE figura 141.

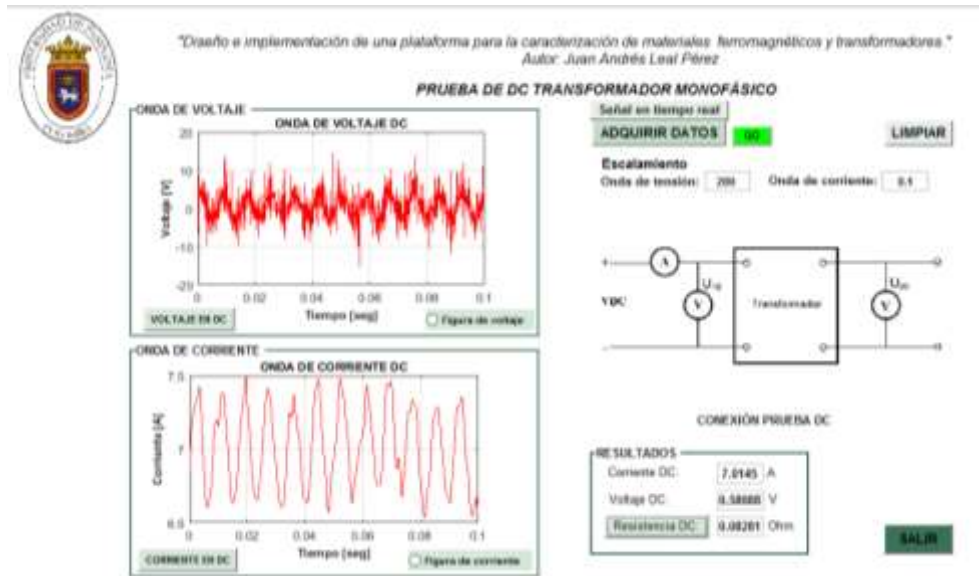


Figura 140 Prueba DC transformador monofásico



Figura 141 Parámetros visualizados por el osciloscopio de calidad de la energía de marca Fluke

La onda de tensión y corriente adquiridas por la interfaz se muestran en la figura 142, donde se visualiza el ruido debido a las sondas de adquisición como del mismo transformador al llevarlo a su corriente nominal.

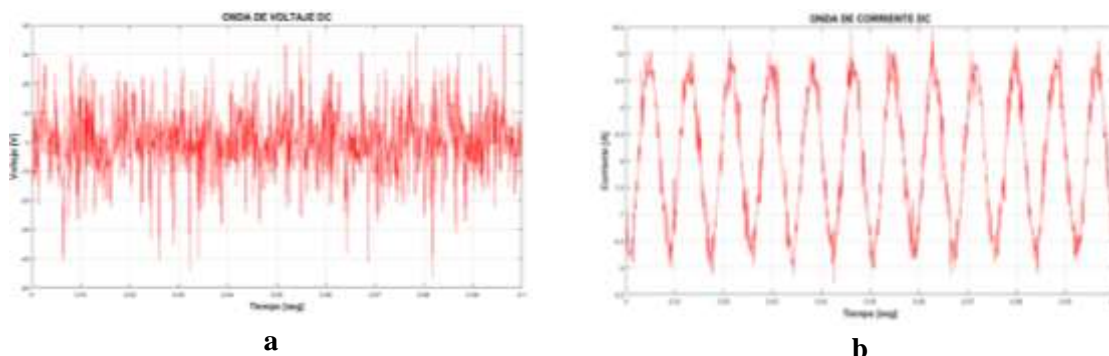


Figura 142 Formas de onda prueba DC a) Onda de tensión b) Onda de corriente

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

- Para la prueba de vacío los parámetros adquiridos a una frecuencia de muestreo de 24000 kS/s se adquirieron 2400 muestras obteniendo el valor RMS de las magnitudes eléctricas como también la potencia y el factor de potencia. Mostradas a continuación.

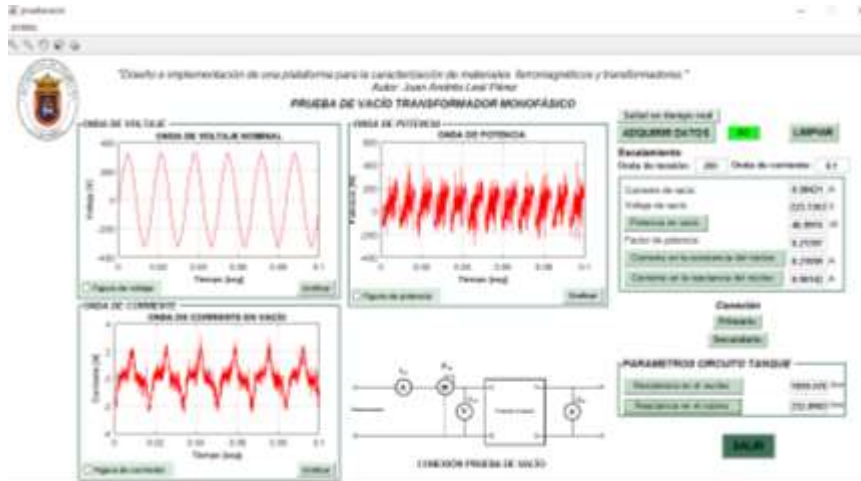
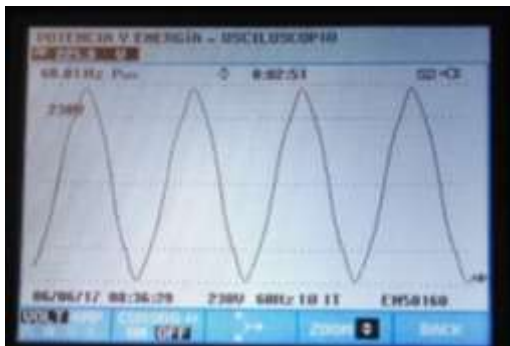


Figura 143 Prueba de vacío transformador monofásico realizada en el lado de alta tensión.



a



b

Figura 144 Parámetros adquiridos prueba de vacío transformador monofásico a través del analizador de red de marca Fluke a) Voltaje b) Corriente



Figura 145 Parámetros de potencia y factor de potencia visualizados a través del analizador de red de marca Fluke

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

A continuación, se muestra la opción de visualizar las señales de una manera más amplia con algunas opciones que se muestran en la barra de menú.

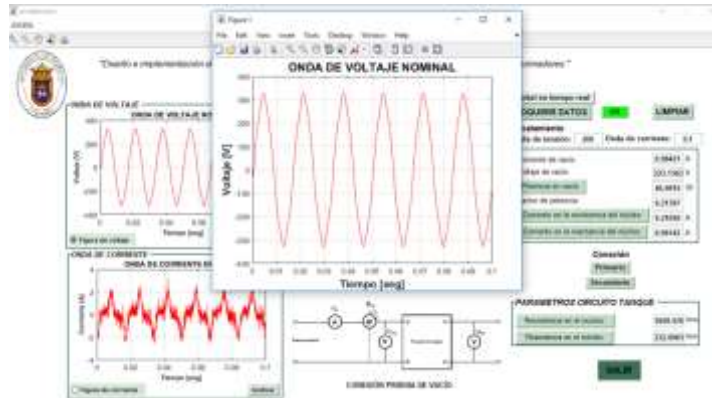


Figura 146 Onda de voltaje para la prueba de vacío realizada en el lado de alta tensión.

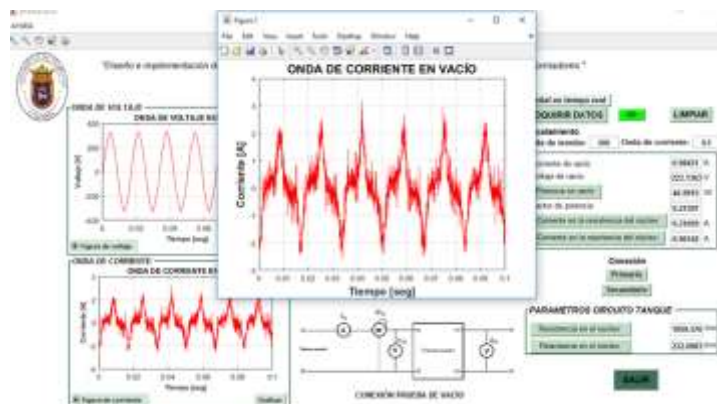


Figura 147 Onda de corriente para la prueba de vacío realizada en el lado de alta tensión.

En la siguiente interfaz damos a terminar la prueba de vacío observando la ayuda que nos permite cerrar la interfaz y volver a la interfaz principal.

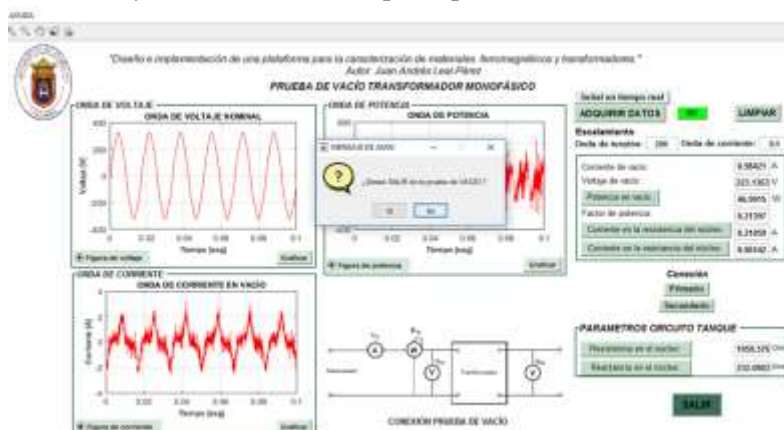
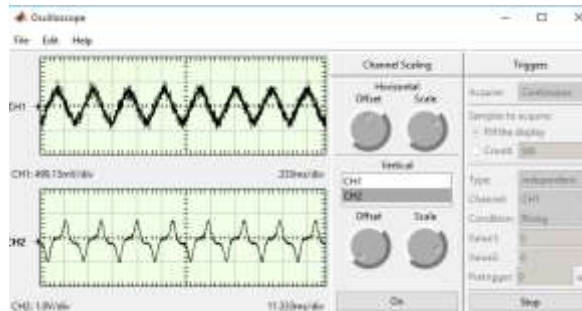


Figura 148 Finalización de la prueba de vacío realizada en el lado de alta tensión del transformador monofásico.

Se le colocó un osciloscopio que me permita ver la señal en tiempo real como lo mostraremos en la figura 149 para la prueba de vacío.



**Figura 149 Osciloscopio para la visualización en tiempo de las magnitudes eléctricas prueba de vacío transformador monofásico**

- Para la prueba de cortocircuito se realizó por el lado de alta tensión, esta conexión se muestra en la siguiente figura donde se visualiza la realización del cortocircuito en el lado de baja tensión figura 150. Las magnitudes eléctricas adquiridas como tensión corriente potencia y factor de potencia por el equipo analizador de red marca Fluke, se muestra en la figura 148.



**Figura 150 Conexión de cortocircuito por el lado de baja tensión transformador monofásico**

La interfaz con los parámetros obtenidos en la prueba de cortocircuito para el transformador monofásico es la mostrada en la figura 151. Donde se indica que la prueba se realizó en el lado de alta tensión. Y en la figura 152 se muestra las señales de voltaje y corriente obtenidas por el analizador de red de marca Fluke. En la figura 153 visualizamos el valor de la potencia como el factor de potencia para esta prueba obtenida con el analizador de red.



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

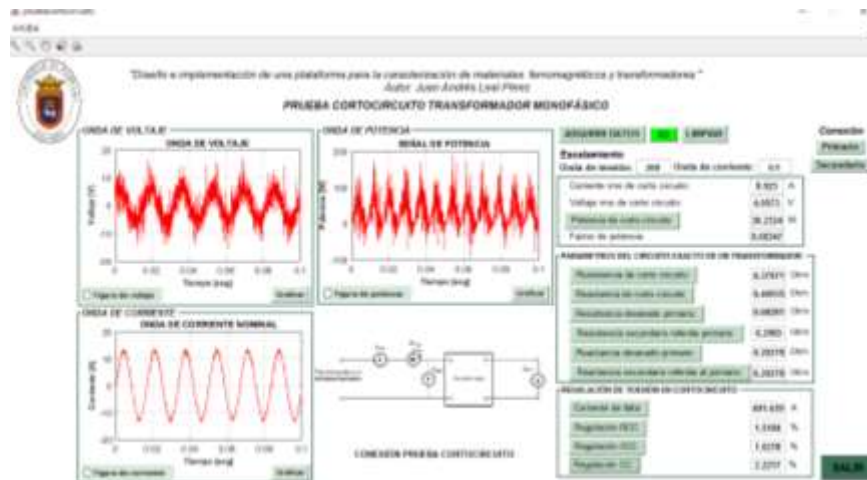
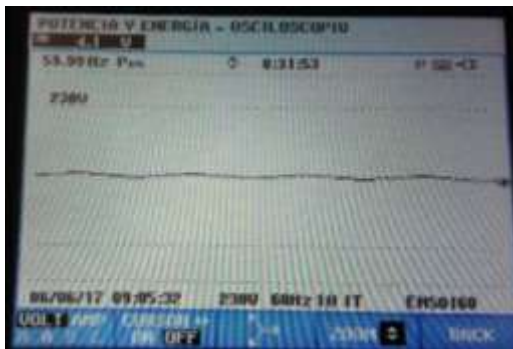


Figura 151 Interfaz prueba de cortocircuito realizada en el lado de alta tensión.



a



b

Figura 152 Prueba de cortocircuito transformador monofásico a) Onda de voltaje b) Onda de corriente.

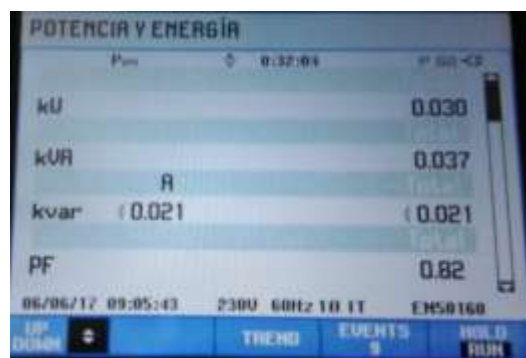
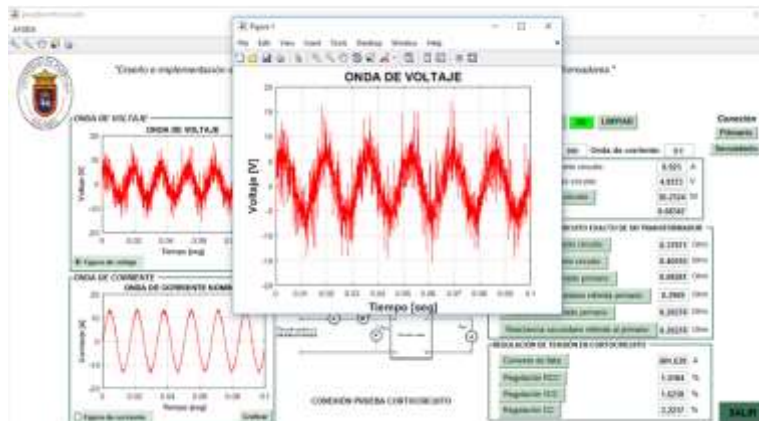
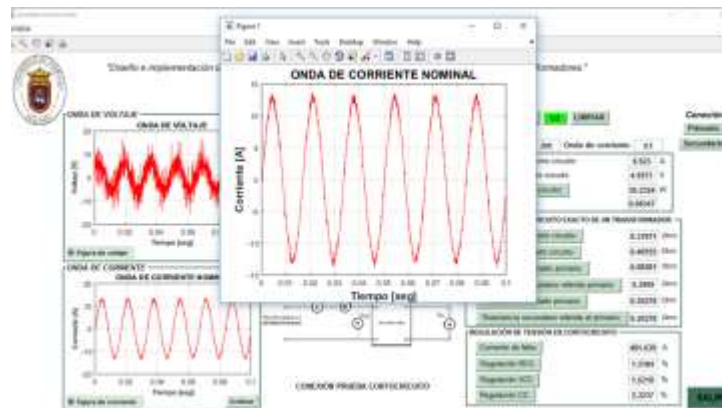


Figura 153 Parámetros de potencia y factor de potencia prueba de cortocircuito visualizados a través del analizador de red de marca Fluke

A continuación, se muestra la opción de visualizar las señales de una manera más amplia con algunas opciones que se muestran en la barra de menú para la prueba de cortocircuito realizada al transformador monofásico.



**Figura 154 Onda de voltaje para la prueba de cortocircuito realizada en el lado de alta tensión.**



**Figura 155 Onda de corriente para la prueba de cortocircuito realizada en el lado de alta tensión.**

Después de haber realizado las pruebas para el transformador monofásico nos dirigimos al botón de circuito equivalente mostrado en la figura 156 donde nos aparecerá un aviso diciéndonos realice las pruebas del transformador le damos que sí y llegamos a la interfaz de resultados para el transformador monofásico.



**Figura 156 opción para la obtención de los modelos circuitales del transformador monofásico.**

Los resultados para los modelos circuitales del transformador se muestran a continuación.

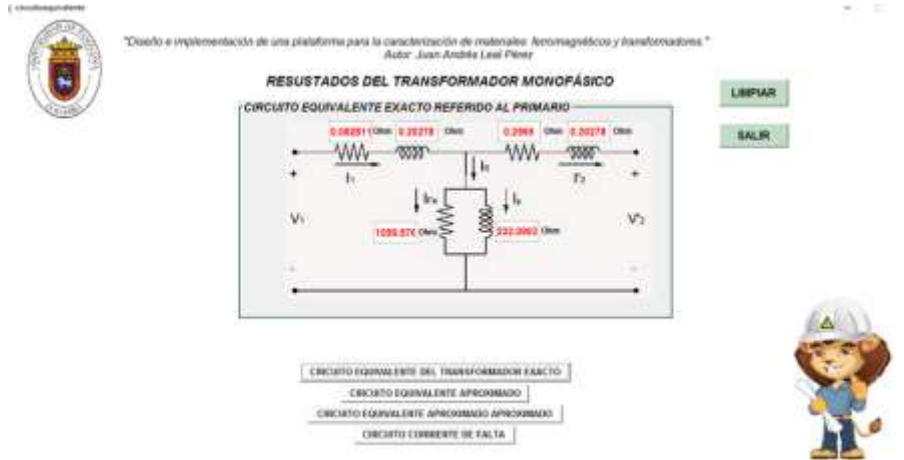


Figura 157 Modelo circuital para la obtención del circuito equivalente exacto referido al primario para el transformador monofásico.

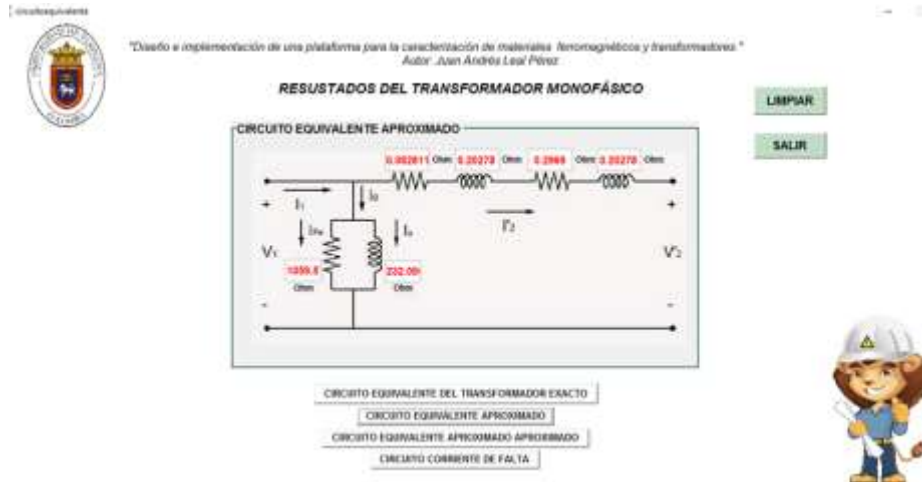


Figura 158 Modelo circuital para la obtención del circuito equivalente aproximado para el transformador monofásico.



Figura 159 Modelo circuital para la obtención del circuito equivalente aproximado aproximado para el transformador monofásico

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ



Figura 160 Modelo circuital para la obtención del circuito corriente de falta del transformador monofásico.

Ahora se realizan las pruebas por el lado de baja tensión, menos la de cortocircuito para obtener los parámetros de cada una de las pruebas y referirlas al lado primario multiplicando por la relación de transformación al cuadrado.

- Para la prueba de DC mostrada en la figura 161 se observa los valores adquiridos para el lado de baja tensión como también los mostrados por el equipo de la calidad de la energía de marca FLUKE figura 162.

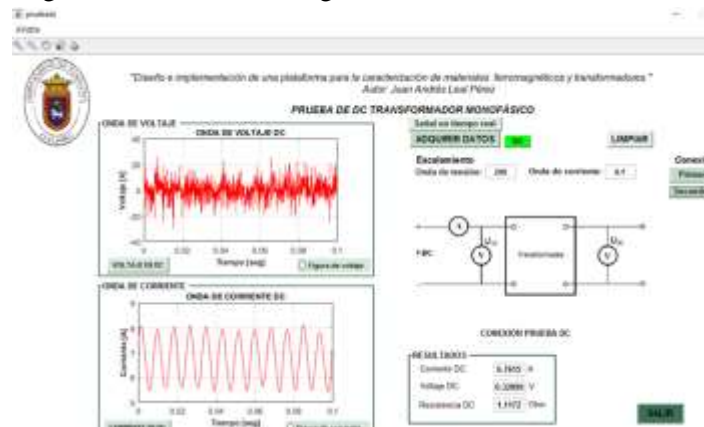


Figura 161 Prueba DC para el transformador monofásico realizada en el lado de baja tensión referida al primario.



a



b

Figura 162 Parámetros visualizados por el osciloscopio de calidad de la energía de marca Fluke prueba de DC baja tensión

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

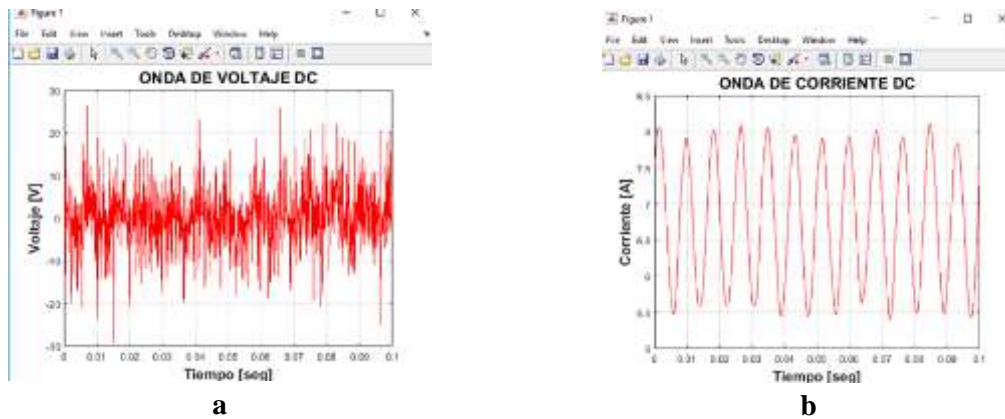


Figura 163 Formas de onda prueba DC realizadas en el lado de baja tensión a) Onda de tensión b) Onda de corriente

- Para la prueba de vacío los parámetros adquiridos a una frecuencia de muestreo de 24000 kS/s se adquirieron 2400 muestras obteniendo el valor RMS de las magnitudes eléctricas como también la potencia y el factor de potencia obtenidos al realizar la prueba por el lado de baja tensión, donde se darán a conocer a continuación.

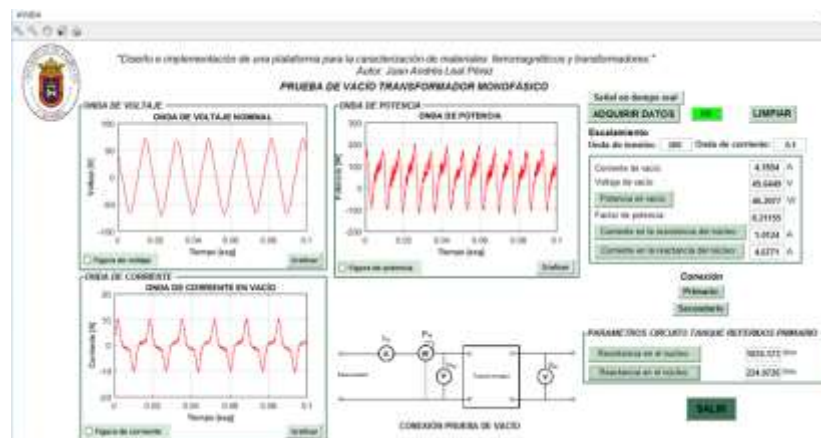


Figura 164 Interfaz prueba de vacío transformador monofásico realizada en el lado de baja tensión.

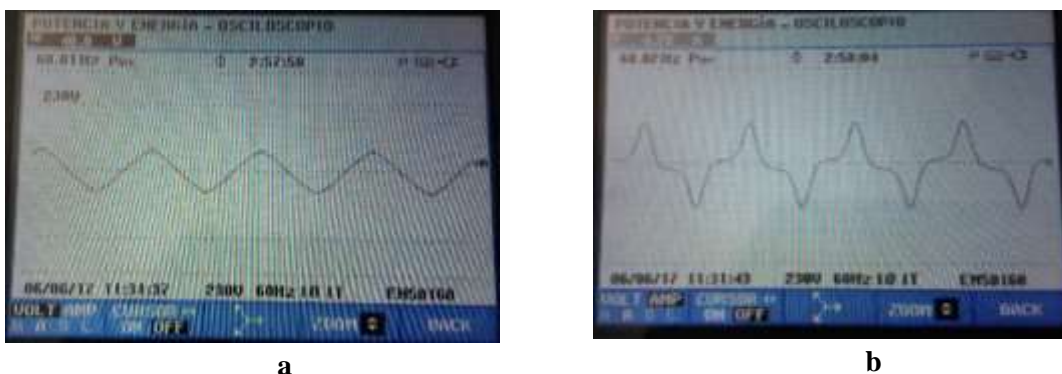
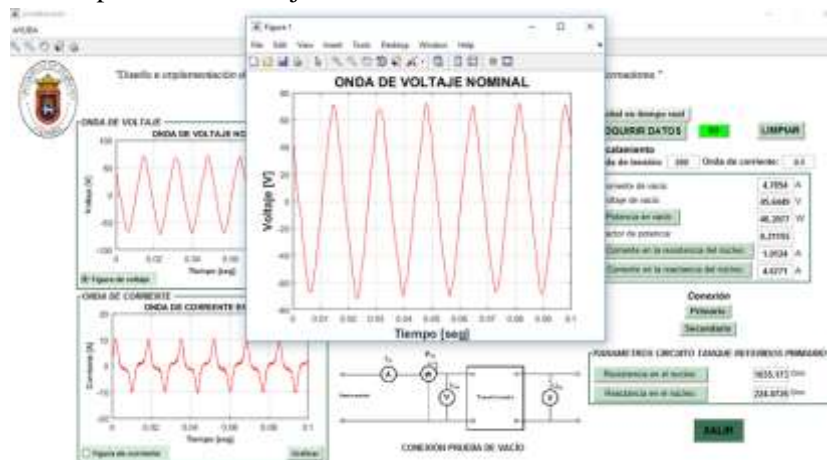


Figura 165 Prueba de vacío transformador monofásico realizada en el lado de baja tensión a) Onda de voltaje b) Onda de corriente

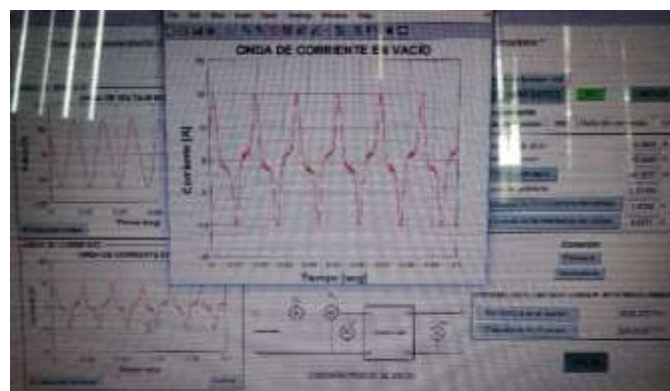


**Figura 166** Parámetros de potencia y factor de potencia prueba de vacío realizada en el lado de baja tensión transformador monofásico visualizados a través del analizador de red de marca Fluke

A continuación, se muestra la opción de visualizar las señales de una manera más amplia con algunas opciones que se muestran en la barra de menú para la prueba de vacío realizada al transformador monofásico por el lado de baja tensión.



**Figura 167** Onda de tensión prueba de vacío transformador monofásico realizada en el lado de baja tensión.



**Figura 168** Onda de corriente prueba de vacío transformador monofásico realizada en el lado de baja tensión.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

- Para la prueba de cortocircuito se realizó por el lado de alta tensión, esta conexión se muestra en la siguiente figura 169 donde se visualiza la realización del cortocircuito en el lado de baja tensión. Las magnitudes eléctricas adquiridas como tensión y corriente se muestran en la figura 170. La potencia y factor de potencia por el equipo analizador de red marca Fluke figura 171.

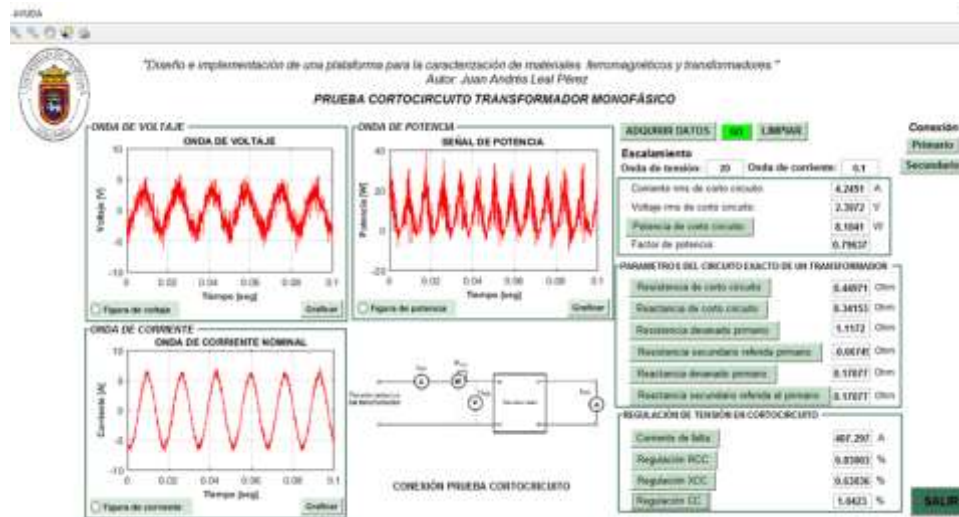


Figura 169 Prueba de cortocircuito transformador monofásico realizada en el lado de alta tensión.

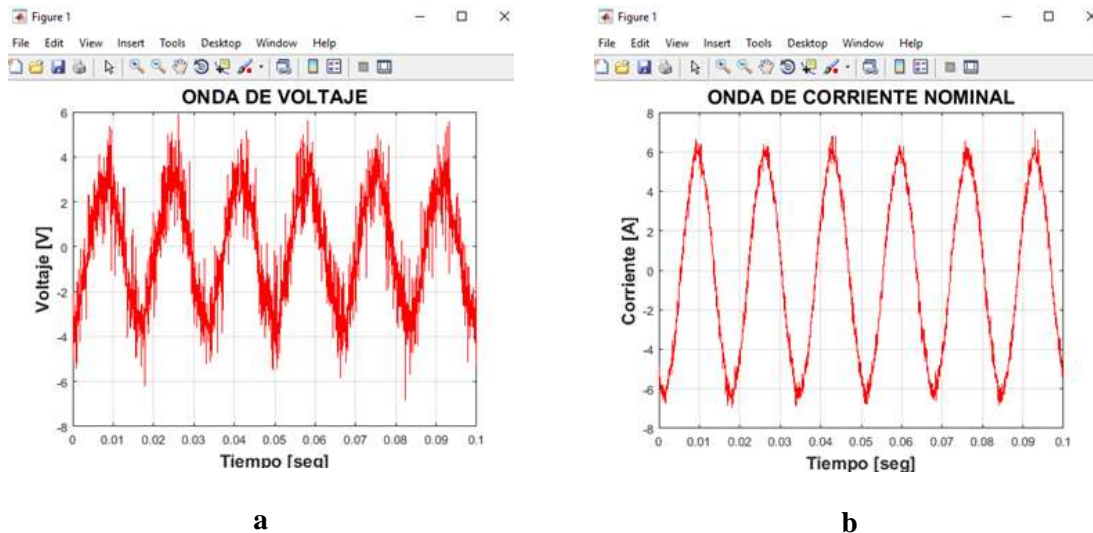
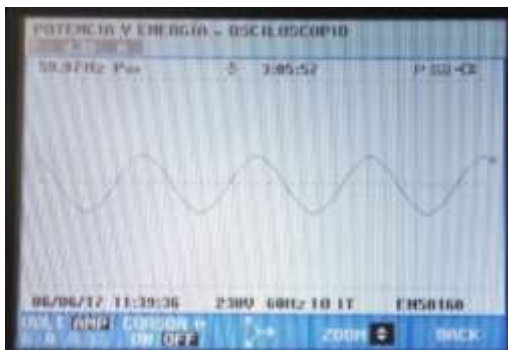
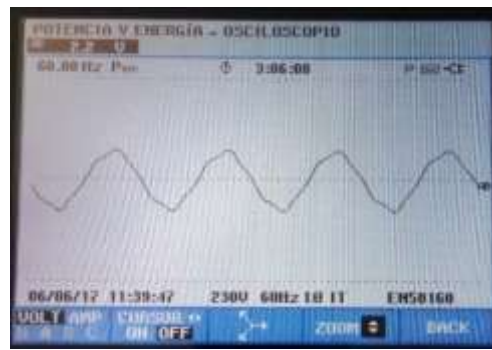


Figura 170 Formas de onda prueba de cortocircuito para el transformador monofásico a) Onda de tensión b) Onda de corriente.

Los resultados obtenidos con el analizador de red de marca Fluke para la prueba de cortocircuito realizada en el lado de alta tensión como forma de onda de las magnitudes de tensión y corriente figura 171, como el valor de su potencia de cortocircuito y el factor de potencia se mostrará en la figura 172.



a



b

Figura 171 Parámetros obtenidos para la prueba de cortocircuito transformador monofásico a través del analizador de red de marca Fluke a) Onda de corriente b) Onda de voltaje



Figura 172 Parámetros de potencia y factor de potencia prueba de cortocircuito realizada en el lado de alta tensión transformador monofásico visualizados a través del analizador de red de marca Fluke

Los resultados obtenidos para los modelos circuitales del transformador habiéndose desarrollado en el lado de baja tensión las pruebas de dc y de vacío, la de cortocircuito en el lado de alta tensión. Llevándolas al lado de alta tensión por medio de la relación de transformación se obtuvieron los siguientes modelos equivalentes mostrados a continuación.

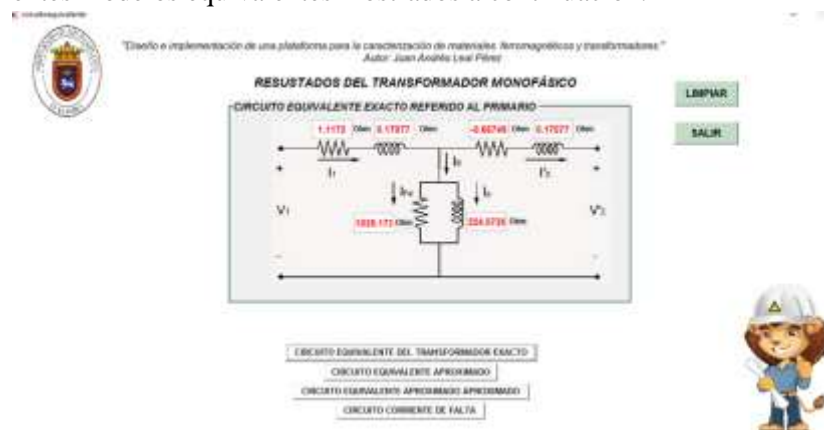


Figura 173 Modelo circuital para la obtención del circuito equivalente exacto referido al primario para el transformador monofásico realizada la prueba en el lado de baja tensión.



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES

AUTOR: JUAN ANDRÉS LEAL PÉREZ

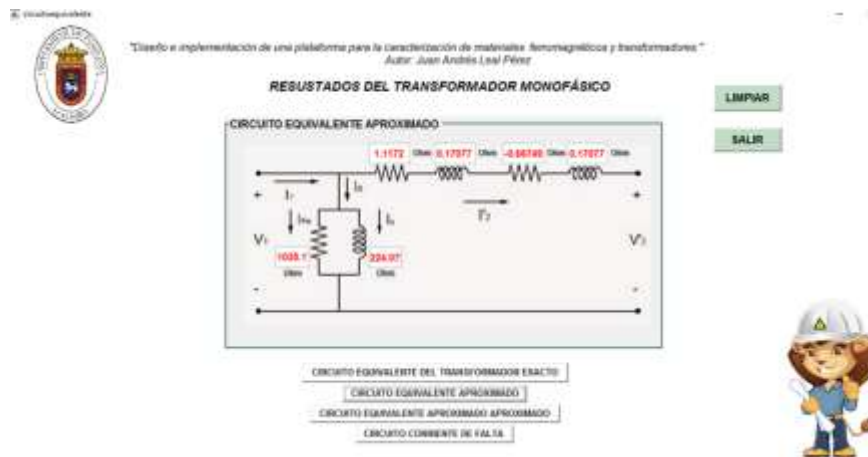


Figura 174 Modelo circuital para la obtención del circuito equivalente aproximado para el transformador monofásico después de haber realizado las pruebas de DC y vacío en el lado de baja tensión.



Figura 175 Modelo circuital para la obtención del circuito equivalente aproximado aproximado para el transformador monofásico habiendo realizado las pruebas de DC y vacío en el lado de baja tensión



Figura 176 Modelo circuital para la obtención del circuito corriente de falta del transformador monofásico realizándose las pruebas de DC y vacío en el lado de baja tensión.

Los resultados obtenidos de los modelos circuitales del transformador monofásico realizados por el lado de alta tensión como los realizados por el lado de baja tensión, podemos observar que los parámetros son muy similares la diferencia presente en los datos se deben a que las magnitudes eléctricas con que se alimentaba el transformador no eran exactas a los datos de placa del transformador como fue al alimentar en la prueba de vacío ya que la fuente de trabajo lo máximo que nos podía dar eran 225.9 V de tensión mientras que la tensión de operación del transformador eran de 240 V, la calibración de las sondas nos proporcionaban una distorsión debido a la sensibilidad de trabajo de estos equipos, otros factores como el valor de la resistencia del devanado varía de acuerdo al tiempo de vida de los materiales como también a los dipolos del material ferromagnético presentes en el núcleo del transformador, dependiendo de su estado de vida, estos valores cambian de una manera proporcional, pero los modelos circuitales obtenidos se aproximan al lugar donde se realicen las pruebas

### **VI.3 Transformador trifásico**

Para las pruebas para el banco de transformadores monofásicos como para el transformador trifásico no se pudieron realizar las pruebas debido a que no se encontraba con los transformadores que me pudieran absorber una corriente admisible para poder realizar las pruebas, como tampoco se contaba con transformadores en los que pudiéramos realizar las conexiones de estrella delta y Zig-Zag. La programación de las interfaces tanto del banco de transformadores como del transformador trifásico se encuentran realizadas para cada una de las pruebas como para la obtención de los modelos circuitales y de la caracterización del material ferromagnético.

## CONCLUSIONES

Como se observó en la elaboración del presente documento, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES”, se puede concluir que dicho trabajo posee como bases tres partes fundamentales, la primera parte una investigación y aplicación de conocimientos teóricos recopilados y adquiridos a lo largo de la formación académica, teniendo como punto central la obtención del ciclo de histéresis y los modelos circuitales propios del transformador. La segunda parte netamente experimental, en donde se hizo una adquisición de datos de las variables eléctricas en tiempo real de un transformador haciendo uso de la interfaz diseñada en el proyecto de investigación. La tercera parte y más importante la comparación de los modelos teóricos con los resultados experimentales, lo cual lleva a establecer las siguientes 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 de sus respectivas pruebas de DC, vacío y cortocircuito.

Logre la obtención de los modelos circuitales del transformador, haciendo uso de la interfaz, a partir de las respectivas 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, además se obtiene el valor de conductividad del material como su respectivo exponente de Steinmetz.

Se elaboró la plataforma como un mecanismo para afianzar los conocimientos y conceptos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería eléctrica, permitiendo a su vez identificar los parámetros que generan una variación entre los resultados experimentales con los aprendidos en la teoría, llevando a una mejor asimilación de los problemas estructurales, físicos presentes en el transformador; pretendiendo de esta manera que sea utilizada por parte de los estudiantes del programa para afianzar sus conocimientos

En la elaboración de la plataforma y del documento se manifiesta de forma clara el proceso de caracterización del material ferromagnético, la obtención de los modelos circuitales del banco de transformadores monofásicos, y para un transformador trifásico, aunque no se realizaron las pruebas con la interfaz para el tipo de transformadores mencionados, esto es debido a que en el laboratorio de máquinas eléctricas no se dispone de ellos; por lo que sugerimos que nuestro trabajo sea la base para futuros trabajos en el momento en que se disponga de un banco de transformadores monofásicos.

Se plantea para una futura investigación tener en cuenta el efecto de los flujos dispersos presentes en el transformador, como una forma de optimización de nuestra plataforma.

Se plantea para futuros trabajos la implementación de sensores con un grado de mayor sensibilidad, para la adquisición de las magnitudes eléctricas, dado que se manifestaron en las pruebas realizadas muestras de corrientes de 3.72 A y tensiones de 0.56 V las cuales debido a la escala y sensibilidad de muestreo de los sensores dp120 y el 80i-110s consideramos que no son óptimos para la caracterización de los transformadores mediante la tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6009. Lo cual se observó en la curva del ciclo de histéresis dada por nuestra interfaz

## REFERENCIAS

- [1] J. F. Mora, Máquinas eléctricas, Madrid, España: Mc. Graw-Hill, 2003.
- [2] A. d. B. Del Hoyo, «Modelización de la histéresis magnética y su aplicación al cálculo numérico en máquinas eléctricas,» Universidad politécnica de Cataluña, Barcelona-Soria, 2005.
- [3] J. M. Alarcón Soriano y M. A. Serrano, «Ciclo de histéresis,» Universidad de Murcia, España Murcia, 2004.
- [4] Ó. R. Tudela, G. Aponte, F. A. Muñoz y A. Cárdenas, «Fenómeno de la Remanencia en Transformadores,» Energía y Computación, vol. 18, nº no, pp. 1-8, 2010.
- [5] P. M. Álvarez, Cálculo fácil de transformadores y autotransformadores monofásicos y trifásicos de baja tensión, México: Alfaomega, 2009..
- [6] S. J. Chapman, Transformadores. En: Máquinas eléctricas, Mc.Graw-Hill.
- [7] . A. Vega Soto, «TRANSFORMADORES TRIFASICOS,» de Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2010, p. 8.
- [8] K. D P y N. I J, «ESTUDIOS DE FLUJO DE CARGA,» de SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA, MÉXICO, MCGRAW-HILL, 2008, pp. 213-214.
- [9] N. A. Lemozy, «TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS,» 2015.
- [10] Hayt, Jr, William H; Kemmerly, Jack E; Durbin, Steven M; , «Metodo de los dos Wattímetros,» de Análisis de circuitos en ingeniería, México, McGraw-Hill, 2007, pp. 481-484.
- [11] FLUKE, «FLUKE,» 1995-2017. [En línea]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/coes/accesorios/sondas-amperimetricas/80i-110s.htm?pid=55352>. [Último acceso: 10 MAYO 2017].
- [12] FLUKE, «FLUKE,» 1995-2017. [En línea]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/eses/accesorios/cables-de-prueba,-sondas-y-pinzas-industriales/dp120.htm?pid=55940>. [Último acceso: 10 MAYO 2017].

- [13] INSTRUMENTS, NATIONAL, «NATIONAL INSTRUMENTS,» [En línea]. Available: <http://www.ni.com/dataacquisition/what-is/esa/>. [Último acceso: 8 1 2017].
- [14] K. Carreño Jaimes y N. G. Jimenez, «Tutorial para la programación de las tarjetas NI-USB 6008/6009 con la toolbox de adquisición de datos de Matlab,» Universidad pontificia, Bucaramanga, 2009.
- [15] 2, Data Acquisition Toolbox™, «User's Guide, Mathworks,» [En línea]. Available: <http://www.matlabanalysis.com/wp-content/uploads/downloads/daqug.pdf>. [Último acceso: 10 1 2017].
- [16] C. E. Rodríguez Sarmiento y W. E. Rodríguez Sarmiento, «Implementación de la “Toolbox” de adquisición de datos de Matlab y prácticas de laboratorio con el uso de las tarjetas NI-USB 6008/6009,» Bucaramanga, Universidad pontificia bolivariana, 2010.
- [17] J. Romero Carrasco, «Herramienta para la adquisición, procesamiento y monitorización de señales. Detección de fallos en ejes y rodamientos mecánicos,» Universidad carlos III de Madrid, Madrid, 2011.
- [18] Barragán Guerrero, Diego Orlando, «MANUAL GUIDE MATLAB,» MATPIC, QUITO, 2016.
- [19] Fernández de Córdoba Martos, Gonzalo, «Creación de Interfaces Gráficas de Usuario (GUI) con Matlab,» Salamanca España, 2007.
- [20] Serrano, Borrero, «Creación de una GUI en Matlab,» de Diseño de interfaz gráfica en Matlab, Madrid, 2015, pp. 56-74.
- [21] Barragán Guerrero, Diego Orlando, «Manual de Interfaz Gráfica de Usuario en Matlab,» matpic, Loja, Ecuador, 2008.