

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS ELECTRÓNICOS**

**TEMA:
DESARROLLO Y CONTRASTACIÓN DE UN TRANSFORMADOR PARA
MEDICIÓN DE CORRIENTE CLASE 0,2 DE RELACIÓN 100:1 CON
LÁMINAS MAGNÉTICAS ESPECIALES.**

**AUTORES:
HENRY PAUL ARELLANO GARCÍA
IVÁN SANTIAGO CARRIÓN VALLES**

**TUTOR:
JAVIER ARTURO ROJAS URBANO**

Quito, marzo del 2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTORES

Nosotros, Henry Paul Arellano García, con documento de identificación N° 1719634584 e Iván Santiago Carrión Valles, con documento de identificación N° 1718684879 manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos los autores del trabajo de titulación intitulado: “DESARROLLO Y CONTRASTACIÓN DE UN TRANSFORMADOR PARA MEDICIÓN DE CORRIENTE CLASE 0,2 DE RELACIÓN 100:1 CON LÁMINAS MAGNÉTICAS ESPECIALES”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Electrónicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Henry Paul Arellano García
C.I: 1719634584



.....
Iván Santiago Carrión Valles
C.I: 1718684879

Quito, marzo del 2019.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “DESARROLLO Y CONTRASTACIÓN DE UN TRANSFORMADOR PARA MEDICIÓN DE CORRIENTE CLASE 0,2 DE RELACIÓN 100:1 CON LÁMINAS MAGNÉTICAS ESPECIALES”, realizado por Henry Paul Arellano García e Iván Santiago Carrión Valles, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, marzo del 2019.



.....
Javier Rojas Urbano
C.I: 020189802-0

DEDICATORIA

Cada granito de arena forma grandes bases, por ello dedico este Trabajo de Titulación a mi familia ya que sin su apoyo nada de esto sería posible, y sobre todo a mis padres Alberto Arellano y Cecibel García quienes son los autores principales y la fuente de sabiduría que día a día guiaron mi camino, aunque tú, madre querida, ya no estés presente para compartir este momento sé que desde el cielo celebras este triunfo; a mis hermanos Carlos Arellano, Israel Arellano, Esteban Arellano y Diego Tejada que sin sus consejos y ayuda no sería la persona que soy, hoy en día; también dedico este Trabajo de Titulación a mi abuelito Carlos García quien con su ayuda y guía supo darme las fuerzas necesarias para nunca rendirme; a mis amigos(as) que siempre estuvieron ahí en los momentos más difíciles para apoyarme y darme una mano cuando más lo necesitaba y esta última dedicatoria va a esa persona especial en mi vida, Yesenia Paredes, que nunca dejo que me rinda, brindándome su amor incondicional para cumplir mis metas.

Se los agradezco a todas y todos quienes confiaron en mí.

Henry.

Dedico este Trabajo de Titulación primero a Dios ya que sin su consentimiento nada de esto pudo ser posible; a los pilares fundamentales de toda mi vida, mi familia; sobre todo a mis padres Iván y Cecilia quienes me enseñaron desde muy pequeño a no darme por vencido; me educaron con valores y principios, los cuales me han convertido en la gran persona que soy hoy en día, me brindaron sus consejos y nunca me dejaron que decayera, siempre me dieron su apoyo incondicional para que pudiera salir adelante ante cualquier adversidad en todos estos años de universidad. Agradezco a mi hermano Francisco que siempre estuvo ahí dándome una palabra de apoyo incondicional para que pueda terminar mi carrera; a mi hermana Karlita que desde el cielo siempre me cuidó, me guió y protegió; a mis mejores amigos, casi hermanos que siempre estuvieron a mi lado en los momentos buenos, malos y en los peores nunca me abandonaron y siempre me brindaron su mano para levantarme y seguir adelante. Agradezco de todo corazón a todas y todos los que siempre confiaron en mí.

Santiago.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana por la formación académica y la formación espiritual, a cada ingeniero perteneciente a la Carrera de Ingeniería Electrónica, quienes, además de compartir sus conocimientos, supieron brindarnos su amistad y apoyo dentro y fuera del salón de clases.

A nuestro tutor, el Ingeniero Javier Rojas, MSc. quien nos supo guiar de la mejor manera durante toda la elaboración del Trabajo de Titulación dándonos siempre su apoyo y las guías necesarias para entregar un trabajo digno y sobresaliente.

ÍNDICE

Cesión de derechos de autor	i
Declaratoria de Coautoría del Docente Tutor	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Índice.....	v
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	x
Resumen	xi
Abstract	xii
Introducción	xiii
CAPÍTULO 1	1
ANTECEDENTES	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Objetivos	1
1.3.1 Objetivo general.....	1
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
1.4 Grupo objetivo.....	2
1.5 Metodología.....	2
CAPÍTULO 2	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1 La empresa	4
2.2 Conceptos relacionados a campos magnéticos.....	4
2.2.1 Flujo de campo eléctrico.....	4
2.2.2 Flujo magnético.....	5
2.2.3 Fuerza electromagnética.....	5

2.2.4	Campo Magnético	5
2.2.5	Corriente de magnetización	5
2.3	Componentes magnéticos en circuitos eléctricos y electrónicos.....	6
2.3.1	Bobina.....	6
2.3.2	Trasformador	6
2.3.3	Transformador de Medición	11
2.3.4	Tipos de transformadores de medición de corriente	12
2.4	Elementos constructivos de componentes magnéticos	15
2.4.1	Conductor eléctrico	15
2.5	Burden de los transformadores para medición de corriente	15
2.5.1	Efecto de la variación de Burden	16
2.6	Clase de precisión para transformadores de medición.....	16
2.7	Límites de los errores de los transformadores de corriente para medida.....	17
2.8	Normativa para definir el error en el transformador de corriente	17
2.8.1	Error según la norma ASA americana.....	17
2.8.2	Error según la norma VDE alemana	18
2.9	Metodología de construcción de un transformador de medición de corriente.....	19
2.9.1	Forma del núcleo.....	19
2.9.2	Dimensiones del núcleo.....	19
2.9.3	Material del núcleo.....	19
2.9.4	Curva de magnetización	19
2.9.5	Bobina.....	19
	CAPÍTULO 3	20
	DISEÑO DEL TRANSFORMADOR.....	20
3.1	Especificaciones del transformador de corriente.....	20
3.1.1	Especificaciones del núcleo	20

3.1.2	Especificaciones del conductor	20
3.2	Diseño y construcción del transformador de corriente	20
3.2.1	Diseño del núcleo	21
3.2.2	Diseño del bobinado	24
3.3	Construcción del transformador	26
3.3.1	Núcleo.....	26
3.3.2	Forma del núcleo.....	27
3.3.3	Laminado del núcleo	28
3.3.4	Tratamiento térmico	31
3.3.5	Barnizado.....	32
3.3.6	Tapas	33
3.3.7	Bobinado del secundario	33
3.3.8	Carcasa	34
A.	Especificaciones finales del transformador.....	35
CAPÍTULO 4	37
PRUEBAS Y RESULTADOS	37
4.1	Prueba de Aislamiento	37
4.1.1	Realización de prueba de aislamiento	37
4.2	Prueba de polaridad	40
4.2.1	Realización de la prueba de polaridad.....	40
4.3	Prueba de medición corriente de Magnetización.....	42
4.3.1	Realización de la prueba de medición de Corriente de Magnetización ...	42
4.4	Prueba de contrastación y funcionamiento de los transformadores de corriente	45
4.4.1	Realización de la prueba de contratación y funcionamiento de los transformadores de corriente	45
CAPÍTULO 5	48

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
5.1 Conclusiones	48
5.2 Recomendaciones	50
REFERENCIAS	51
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Transformador	7
Figura 2.2 Transformador tipo columna.	8
Figura 2.3. Transformador tipo acorazado	9
Figura 2.4. Transformador tipo toroidal.....	9
Figura 2.5. Transformador de bobinados separados	10
Figura 2.6. Transformador de bobinados concéntricos.....	10
Figura 2.7. Transformador de bobinados concéntricos.....	11
Figura 2.8. Transformador de medición de corriente servicio interior	13
Figura 2.9. Transformador de medición de corriente tipo Bushing.....	13
Figura 2.10. Transformador de medición de corriente tipo núcleo partido	14
Figura 2.11. Transformador de medición de corriente tipo ventana con núcleo toroidal	15
Figura 3.1. Curvas B vs H de los materiales ferromagnéticos	22
Figura 3.2. Núcleo toroidal	23
Figura 3.3. Dimensiones del núcleo toroidal.....	23
Figura 3.4. Distribución de las bobinas en el toroide	24
Figura 3.5. Bobinadora.....	27
Figura 3.6. Núcleo de acero.....	28
Figura 3.7. Topes de madera para la bobinadora.....	28
Figura 3.8. Fleje enrollado en núcleo de acero.....	29
Figura 3.9. Laminado de fleje.....	29
Figura 3.10. Recubrimiento del laminado con cinta de fibra	30
Figura 3.11. Soldadura en el núcleo	30
Figura 3.12. Pulido de los puntos de suelda en el núcleo	31
Figura 3.13. Colocación del núcleo sobre molde para tratamiento térmico.....	31
Figura 3.14. Tratamiento térmico del núcleo	32
Figura 3.15. Enfriamiento del núcleo	32
Figura 3.16. Barnizado del núcleo	33
Figura 3.17. Aisladores de núcleo	33
Figura 3.18. Pieza en forma de hueso para enrollar el alambre esmaltado	34

Figura 3.19. Bobinado en el núcleo toroidal	34
Figura 3.20. Diseño de la carcasa	35
Figura 4.1. Pruebas de aislamiento en bobinado de los TC	38
Figura 4.2. Pruebas de aislamiento entre núcleo y bobinado de los TC	39
Figura 4.3. Circuito a implementarse para la prueba de polaridad en los TC	40
Figura 4.4. Circuito armado para prueba de polaridad	41
Figura 4.5. Forma de onda positiva	41
Figura 4.6. Forma de onda negativa	42
Figura 4.7. Circuito por implementarse para la prueba de medición de corriente de magnetización en los transformadores de corriente.....	43
Figura 4.8. Circuito armado para la prueba de medición de corriente de magnetización en los transformadores de corriente.....	43
Figura 4.9. Prueba medición corriente de magnetización	44
Figura 4.10. Circuito para la prueba de contrastación y funcionamiento en los transformadores de corriente.	45
Figura 4.11. Prueba de contrastación y funcionamiento en los transformadores de corriente clase 0,5 y clase 0,2.....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Límites de errores en los transformadores de intensidad para medición...	17
Tabla 2.2. Clase de precisión.....	18
Tabla 3.1. Permeabilidad mínima y máxima de cada material.....	21
Tabla 3.2. Selección de densidad de flujo	22
Tabla 3.3. Cálculos.	35
Tabla 4.1. Pruebas de aislamiento de los TC	39
Tabla 4.2. Valores promedios obtenidos y porcentaje de error, en prueba contrastación y funcionamiento en transformadores de corriente	46

RESUMEN

Actualmente, en la industria Ecuatoriana se adquieren equipos y dispositivos eléctricos - electrónicos que son fabricados en otros países, la Empresa Imetrilec se dedica a la fabricación de equipos y dispositivos eléctricos - electrónicos como lo son transformadores monofásicos, bifásicos y trifásicos, autotransformadores, transformadores de aislamiento, transformadores para medición de corriente, cargadores de baterías de uso industrial, reguladores de voltaje monofásicos, bifásicos y trifásicos, inversores entre otros.

En general, los transformadores para medición de corriente que son utilizados actualmente son los de clase 0,5. La necesidad de una mayor exactitud al momento de realizar mediciones utilizando estos dispositivos, llevo al diseño y construcción de un transformador para medición de corriente de clase 0,2. En el presente proyecto se implementa el diseño del transformador mediante la utilización de diferentes núcleos magnéticos, la ventaja de utilizar tres tipos de materiales magnéticos nos lleva a la comparación de los resultados después de someter a los dispositivos a diferentes pruebas con el fin de alcanzar la precisión de la clase 0,2 para el correcto funcionamiento a nivel industrial.

Palabras claves: transformador para medición de corriente, núcleos magnéticos, clase de precisión.

ABSTRACT

Currently, in the Ecuadorian industry, electrical-electronic equipment and devices are purchased and manufactured in other countries, the company Imetrilec is dedicated to the manufacture of equipment and electrical-electronic devices such as single-phase, biphasic and three-phase transformers, autotransformers, insulation transformers, transformers for current measurement, battery chargers for industrial use, single-phase, two-phase and three-phase voltage regulators, inverters, among others.

In general, the transformers for current measurement that are currently used are those of class 0.5. The need for greater accuracy when making measurements using these devices, led to the design and construction of a transformer for current measurement of class 0.2. In the present project the design of the transformer is implemented through the use of different magnetic cores, the advantage of using three types of magnetic materials leads us to compare the results after subjecting the devices to different tests in order to reach the precision of class 0.2 for the correct operation at industrial level.

Keywords: transformer for current measurement, magnetic cores, accuracy class.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los transformadores para medición de corriente que son utilizados en la industria eléctrica son importados y por más de 20 años de funcionamiento de la empresa Imetrilec, nunca han fabricado dispositivos como estos, por lo que muchos de sus clientes han sugerido la fabricación de esta clase de dispositivos y esto se lo podrá llevar a cabo con la utilización de diferentes materiales magnéticos en la construcción del núcleo.

En el primer capítulo se describe el problema a resolver el cual es el gran margen de error que existe en los transformadores para medición de corriente de clase 0,5, el objetivo general y los específicos, y la metodología para el desarrollo del proyecto. En el segundo capítulo se describe el marco teórico, perteneciente a la descripción de los transformadores, materiales magnéticos, clases de errores y niveles de precisión de los transformadores para medición de corriente.

En el tercer capítulo se realiza la caracterización completa del transformador para medición de corriente, especificando su núcleo, las dimensiones que este tendrá, así como también una explicación total de los materiales magnéticos que serán utilizados en la construcción de los núcleos, además de los bobinados y los cálculos realizados.

En el cuarto capítulo se describe la construcción del transformador para medición de corriente, la forma que debe tener el núcleo ya que por condiciones comerciales se debe establecer una forma estándar de construcción, como se realizó el laminado del núcleo a partir de la materia prima y el tratamiento que se le dio al núcleo terminado para que pueda conservar su forma y no tienda a desarmarse. El barnizado para aislar al núcleo y la fabricación de las tapas que aislaran al bobinado del núcleo.

En el quinto capítulo se detallan todas las pruebas que se realizaron en los prototipos de los transformadores para medición de corriente y en el sexto capítulo se describen las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

En este capítulo se detalla el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos que se deberán cumplir, el alcance del proyecto como también la metodología que será utilizada a lo largo del desarrollo del tema.

1.1 Planteamiento del problema

Cuando se realiza la medición de corriente de alto valor se utilizan normalmente transformadores para medición de corriente clase 0,5. Estos dispositivos tienen un error considerable especialmente cuando la corriente es menor al 10% de la corriente nominal. El margen de error obtenido por estos dispositivos, normalmente se debe al tipo de construcción y a los materiales utilizados.

Con la implementación del Transformador para medición de corriente clase 0,2 se obtendrá una disminución importante del margen de error en comparación con el de clase 0,5.

1.2 Justificación

Actualmente, las Empresas Eléctricas del Ecuador compran, anualmente, entre 1000 y 5000 transformadores para medición de corriente. Al no ser desarrollados en el país, todos estos dispositivos son importados. Con el desarrollo del Transformador para medición de corriente de clase 0,2 se logrará la apertura comercial para la producción y venta de dicho transformador a nivel nacional. Además, se garantizará la calidad del producto gracias a la contrastación que se llevará a cabo durante el desarrollo del Transformador.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar y contrastar un Transformador para medición de corriente clase 0,2 con láminas magnéticas especiales para usarlo en la industria eléctrica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el funcionamiento de los transformadores de corriente para determinar las variables de funcionamiento.
- Determinar los parámetros de contrastación de las diferentes láminas magnéticas para definir las pruebas de validación.
- Diseñar el Transformador para medición de corriente clase 0,2 para usarlo en la industria eléctrica.
- Implementar el Transformador para medición de corriente clase 0,2 para pruebas en la planta de la empresa Imetrilec.
- Validar el Transformador para medición de corriente clase 0,2 en empresas especializadas para su posterior comercialización.

1.4 Grupo objetivo

El beneficiario directo será la Empresa Imetrilec, debido a que producirá y comercializará el Transformador para medición de clase 0,2.

Los beneficiarios secundarios son los clientes como empresas eléctricas ya que evitarán la importación directa de estos dispositivos.

1.5 Metodología

A través del método deductivo se realizarán los cálculos de los parámetros tanto de bobina como del núcleo del Transformador partiendo del estudio previo de las leyes electromagnéticas y eléctricas.

A través del desarrollo experimental se construirá el Transformador con la utilización de las diferentes láminas magnéticas especiales como son hierro níquel, grano orientado y grano nano estructurado para luego realizar el encapsulamiento mediante el uso de resinas.

A través del método deductivo se realizarán las pruebas necesarias en el Transformador para establecer los parámetros de funcionamiento y posteriormente realizar las correcciones de los errores que se obtengan en las pruebas.

La contrastación se realizará en empresas calificadas para metrología e incluso en la propia Empresa Eléctrica Quito S.A.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se detalla los fundamentos teóricos requeridos para el desarrollo del proyecto en específico el “transformador para medición de corriente de clase 0,2”, su estructura y sus características de funcionamiento.

2.1 La empresa

La Empresa IMETRILEC Cía. Ltda. Ingeniería y mercadeo de equipos eléctricos y electrónicos, es una empresa jurídica legalmente constituida en el Ecuador, tiene como actividad principal la fabricación, diseño, instalación y mercadeo de partes y piezas eléctricas, electrónicas, mecánicas y el mantenimiento e instalación de redes eléctricas de baja y media tensión, redes de telecomunicaciones y de computación así como también la instalación de pararrayos y sistemas de puesta a tierra y la fabricación de todo tipo de transformadores.

La Empresa Imetrilec tiene más de 20 años en el mercado ecuatoriano, brindando soporte y respaldo técnico a la Industria. Está ubicada en la provincia de Pichincha cantón Quito. Dedicar sus funciones a la fabricación de equipos eléctricos y electrónicos. Durante los últimos años Imetrilec ha fabricado unos 10.000 transformadores de tipo seco de mediana potencia (entre los 50 VA y los 250 kVA) y alrededor de 500 transformadores de medida de corriente para distintos usos.

2.2 Conceptos relacionados a campos magnéticos.

2.2.1 Flujo de campo eléctrico.

Es la cantidad de flujo de carga eléctrica a través de una superficie cerrada (S) por unidad de tiempo.

La Ley de Gauss permite determinar el flujo del campo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada como el número de cargas (q) contenida dentro de la superficie, dividida por la constante ϵ_0 que representa la permitividad del material por el cual circula el campo eléctrico. (Hayt & Buck, 2006)

$$\phi = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

2.2.2 Flujo magnético

El flujo magnético es una medida del campo magnético total que atraviesa una superficie establecida, el cual si está dentro de una superficie cerrada es cero ya que contiene el mismo flujo magnético dirigido hacia el polo sur que el flujo magnético proveniente del polo norte. (Hayt & Buck, 2006)

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad \text{Ec. (2.2)}$$

2.2.3 Fuerza electromagnética

El voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la velocidad que varía con relación al tiempo del flujo magnético que atraviesa dicha superficie.

Es decir, la fuerza electromagnética inducida en cualquier circuito cerrado es igual al negativo de la velocidad del tiempo del flujo magnético encerrado. (Hayt & Buck, 2006)

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

2.2.4 Campo Magnético

El campo magnético es producido con la circulación de corrientes eléctricas asociadas al salto de los electrones que se encuentran dentro de una superficie cerrada como por ejemplo la de un conductor eléctrico.

El campo magnético en cualquier punto esta descrito por dos valores, la dirección y el módulo lo que quiere decir que es un campo vectorial. (Hayt & Buck, 2006)

2.2.5 Corriente de magnetización

La corriente de magnetización (I_m) es la cantidad de corriente mínima requerida para producir un flujo magnético en el núcleo ferromagnético.

La corriente de magnetización (I_m) se produce cuando una fuente de corriente alterna (AC) se conecta dispositivos como inductores y transformadores, generando la

cantidad de corriente mínima para producir un flujo magnético dentro del núcleo ferromagnético. (Ras, 2002)

2.3 Componentes magnéticos en circuitos eléctricos y electrónicos

2.3.1 Bobina

La bobina es un elemento pasivo que almacena energía en forma de campo magnético cuando por ella circula una corriente. Está constituida por un alambre conductor aislado enrollado en forma de espiral a través de un núcleo que generalmente es de material magnético.

En los circuitos eléctricos y electrónicos las bobinas tienen los siguientes usos:

- En las fuentes de alimentación se utilizan para filtrar componentes de corriente alterna y obtener corriente continua en la salida.
- Se utilizan en relés, cuando por la bobina circula una corriente que genera un campo magnético que mueve un elemento ferromagnético el cual abre o cierra un interruptor eléctrico.
- Se utilizan en circuitos convertidores de corriente continua y circuitos de carga, por que reducen el ruido que se genera con las fugas en las líneas de alimentación, a estas bobinas se las conoce como bobinas de choque.

La bobina se cuantifica mediante la inductancia la cual representa la relación que existe entre el flujo magnético y la corriente que fluye a través de la bobina. Su unidad de medida es el Henrio (H). (Fitzgerald, Kingsley, & Umans, 2004)

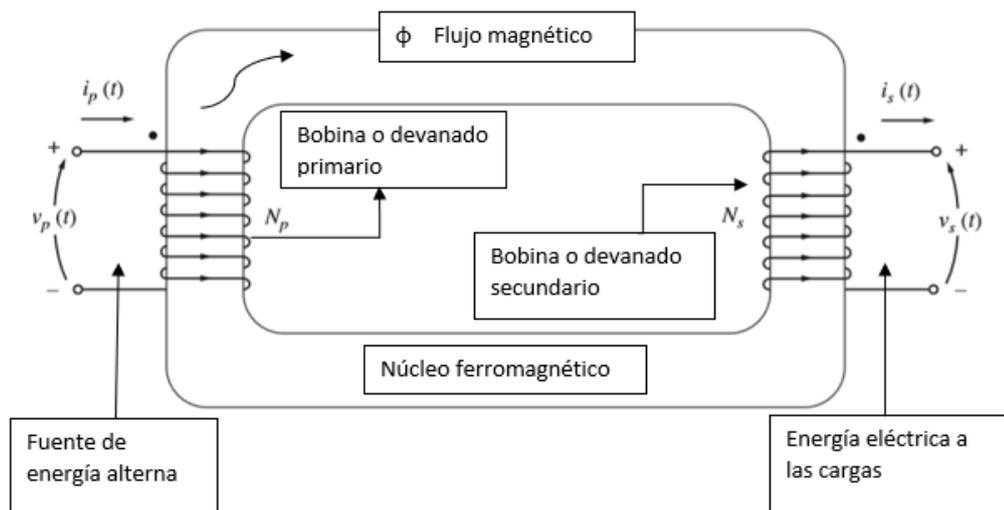
2.3.2 Transformador

Al transformador se le puede definir como un equipo capaz de cambiar el voltaje alterno de cierto valor, a un voltaje alterno de diferente valor por la acción del campo magnético.

El transformador está compuesto por un núcleo magnético y dos o más bobinas de alambre conductor enrolladas en este.

El bobinado que recibe el voltaje, bobinado primario, crea una fuerza electromotriz lo que provoca que circule por las espiras una corriente. Esta corriente genera un flujo magnético en el núcleo del transformador, el cual se encuentra circulando llegando así hasta otro de los bobinados que está enrollado sobre el mismo núcleo, bobinado secundario, este flujo magnético atraviesa las espiras del bobinado secundario induciendo un voltaje en él, este proceso se lo puede observar en la Figura 2.1. (Fitzgerald, Kingsley, & Umans, 2004)

Figura 2.1 Transformador



Funcionamiento del transformador. Elaborador por: Paul Arellano

Los transformadores se clasifican en:

- **Por el número de fases**

Se dividen en monofásicos y trifásicos:

Los transformadores monofásicos poseen una fase a su entrada y a su vez una fase a la salida.

Los transformadores trifásicos poseen tres fases y a la salida del transformador obtenemos tres fases en los devanados del secundario.

- **Por el tipo de tensión**

Se dividen en elevadores, reductores, de potencia y de medida:

Los transformadores elevadores incrementan el nivel de voltaje y corriente a la salida del devanado secundario.

Los transformadores reductores reducen el nivel de voltaje y corriente a la salida del devanado secundario.

Los Transformadores de potencia son los que trabajan con valores grandes de potencia para elevar o disminuir los valores de voltaje para alta tensión, se utilizan en subestaciones para la distribución y la transformación de energía alta tensión. También se distribuyen en subestaciones, centrales de generación y usuarios de grandes potencias.

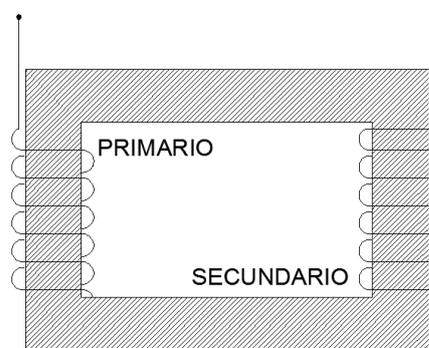
Los transformadores de medida reducen los valores de voltaje o corriente para que los diferentes equipos de medida o protección se conecten y puedan ser utilizados ya que trabajan con voltajes o corrientes bajas en comparación a los valores primarios.

- **Por la forma del núcleo:**

De acuerdo con la forma del núcleo se dividen en tipo columna, acorazado y toroide:

Los transformadores tipo columna son aquellos que las bobinas primarias y secundarias se encuentran ubicadas en columnas diferentes, como se observa en la Figura 2.2.

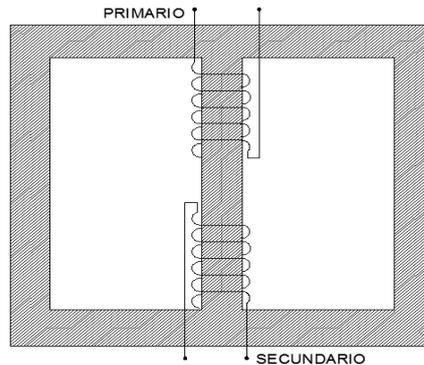
Figura 2.2 Transformador tipo columna.



Distribución de bobinas en transformador tipo columna. Elaborado por: Santiago Carrión.

Los transformadores tipo acorazado son aquellos que poseen dos columnas exteriores sin devanados y una columna interior donde se colocan los devanados del primario y secundario, esto se puede observar en la Figura 2.3.

Figura 2.3. Transformador tipo acorazado



Distribución de bobinas en transformador tipo acorazado. Elaborado por: Santiago Carrión.

Los Transformadores tipo toroidal como se observa en la Figura 2.4, tienen un alto rendimiento, nivel de ruido bajo y menor calentamiento.

Figura 2.4. Transformador tipo toroidal



Bobinado en transformador tipo toroidal. Elaborado por: Santiago Carrión.

- **Por la posición de sus bobinados:**

Este tipo de transformadores se diferencian por la ubicación de los bobinados en el núcleo se clasifican en: bobinados separados, bobinados concéntricos y de bobinas alternadas.

Los transformadores de bobinados separados son aquellos que los bobinados primarios y secundarios se encuentran ubicados en lugares opuestos, como se observa en la Figura 2.5.

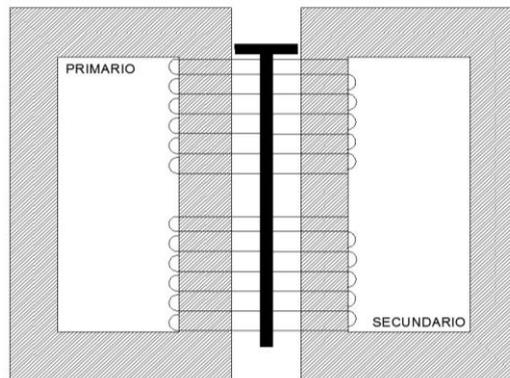
Figura 2.5. Transformador de bobinados separados



Transformador con bobinados separados. Elaborado por: Santiago Carrión.

Los transformadores de bobinados concéntricos son aquellos en los que cada bobinado está sujeto a ambos núcleos, los cuales están separados por un acople mecánico fijo debido a que la bobinas se mueven.

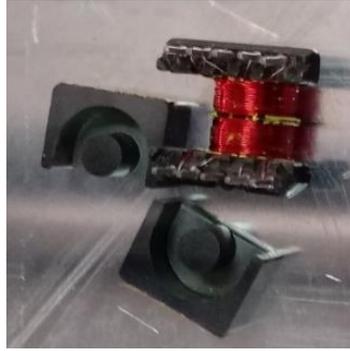
Figura 2.6. Transformador de bobinados concéntricos



Transformador con bobinados concéntricos. Elaborado por: Santiago Carrión.

Los transformadores de bobinas alternadas son aquellos que sus bobinados se encuentran ubicados en el mismo lugar con la diferencia que uno va a continuación del otro bobinado, como se observa en la Figura 2.7.

Figura 2.7. Transformador de bobinados concéntricos



Transformador con bobinados concéntricos. Elaborado por: Santiago Carrión, Quito.

2.3.3 Transformador de Medición

Los transformadores de medida reducen corrientes y voltajes de valores muy altos en corrientes y voltajes que entran en los rangos normalizados para los aparatos de medida y dispositivos de control. Clases de transformadores de medición

a. Transformador de medición de voltaje

Los transformadores de medición de voltaje son aquellos que reducen altos voltajes en voltajes medibles por instrumentos. Estos transformadores tienen un solo núcleo magnético y pueden tener varios bobinados secundarios. (Milano, 2008)

b. Transformador de medición de corriente

Los transformadores de corriente son diseñados y construidos para convertir valores de corrientes altos en corrientes medibles por instrumentos.

Los valores establecidos para estos transformadores vienen en relación de corriente primaria a corriente secundaria, como por ejemplo en relación de 100 a 1 A.

El bobinado primario de estos transformadores se conecta en serie al circuito donde se va a medir la corriente de manera que por este bobinado circule la corriente a medir y en el bobinado secundario se conecta el equipo de medición que constituye la carga para el transformador de corriente. (Milano, 2008)

2.3.4 Tipos de transformadores de medición de corriente

Los transformadores de corriente se clasifican dependiendo de su tipo de construcción y condiciones de montaje. **Por su tipo de construcción:**

a. Transformador de medición de corriente de servicio interior

Es un transformador de corriente para servicio interior, actúa como soporte de barras y tiene una encapsulación en base de resina como se observa en la Figura 2.8. (Milano, 2008)

Aplicaciones:

- Celdas de potencia de media tensión aisladas en aire.
- Celdas de distribución secundarias de media tensión aisladas en el aire.
- Banco de condensadores.

Ventajas:

- Corrientes secundarias normalizadas.
- Posibilidad de frecuencias diferentes a las normalizadas.
- Diseño anti-vibraciones.
- Buena condición para climas extremos.
- Montaje del transformador en cualquier posición.

Figura 2.8. Transformador de medición de corriente servicio interior



Transformador de medición de corriente de servicio interior. Fuente: (Revalco, 2014).

b. Transformador de medición de corriente tipo Bushing

El conductor del circuito a medir pasa a través del núcleo actuando como bobinado primario mientras que el bobinado secundario se encuentra completamente aislado y ensamblado permanentemente al núcleo laminado esto se puede observar en la Figura 2.9.

Ventajas:

- Corrientes secundarias normalizadas.
- Posibilidad de diseño para usos en el exterior.

Figura 2.9. Transformador de medición de corriente tipo Bushing



Transformador para medición de corriente tipo Bushing. Fuente: (Revalco, 2014)

c. De núcleo partido

Es aquel transformador cuyo núcleo consta de dos partes las cuales se anclan directamente sobre el conductor primario (riel o cable de corriente) que pasa por la abertura. La parte secundaria (habitualmente un dispositivo de medición) se conecta mediante las abrazaderas de montaje delanteras y traseras.

Gracias a su diseño y su forma de instalación los transformadores de corriente de núcleo partido son especialmente adecuados para espacios reducidos o sitios de difícil acceso. La separación de las mitades del núcleo facilita aún más la instalación sobre un cable o un riel de montaje.

Figura 2.10. Transformador de medición de corriente tipo núcleo partido



Transformador de núcleo partido. Fuente: (Revalco, 2014)

d. Tipo ventana

Es aquel transformador que tiene una abertura en el centro conocida como ventana por donde pasara el conductor del circuito que se desea realizar la medición de la corriente.

Su núcleo garantiza un menor flujo de dispersión y unas bajas pérdidas por corrientes de Foucault. Una ventaja es que, dado que el campo magnético está confinado en el interior, los transformadores tipo ventana se pueden colocar cerca de otros componentes electrónicos sin preocupación acerca de las interacciones inductivas no deseadas.

Figura 2.11. Transformador de medición de corriente tipo ventana con núcleo toroidal



Transformador de medición de corriente tipo ventana con núcleo toroidal. Fuente: (Revalco, 2014)

2.4 Elementos constructivos de componentes magnéticos

2.4.1 Conductor eléctrico

Un conductor eléctrico es un cable que permite la fácil circulación de carga eléctrica y que posee poca resistencia a este movimiento.

Existen diversos materiales que permiten la conducción de las cargas eléctricas, los de menor resistencia y mayor facilidad de conducción son los metales como el oro, la plata, el hierro, el cobre, el aluminio entre otros.

A nivel industrial los conductores eléctricos más utilizados son el cobre y el aluminio por sus características conductivas, su maleabilidad y su costo. (Viakon, 2010)

2.5 Burden de los transformadores para medición de corriente

El burden es un término que representa a la carga que se conecta en el secundario de un transformador de medición. Debido a que por el burden va a circular la corriente del secundario tiene influencia directa sobre la corriente de magnetización y a su vez tendrá influencia sobre la corriente a ser medida.

Se le conoce como la potencia activa y reactiva que ingresa al terminal del secundario su medida son los (VA), también se le conoce como la impedancia total secundaria expresada en ohmios (Ohm) con sus componentes resistivos y reactivos.

El burden nominal para un transformador de medición es la potencia del secundario que corresponde a la carga (Z_c) con la cual los errores de relación y fase deben ser inferiores a las normas establecidas por la clase de precisión del transformador.

Actualmente en el mercado existen 4 clases de precisión en los transformadores de medición los cuales van desde los 0.1, 0.2, 0.5, y 1 estos valores determinan el error admisible en su precisión.

2.5.1 Efecto de la variación de Burden

Se considera como variación de Burden al aumento de los VA de carga en los transformadores de medición de corriente. Esto implica que para un valor de corriente secundaria dada se debe inducir un voltaje secundario mayor con el fin de incrementar los valores de flujo y de densidad de flujo en el núcleo.

Si un transformador de medición trabaja con una carga o una potencia secundaria superior mayores a las nominales, proporciona errores superiores a los que se permite en su clase incluso en el margen normal de la corriente esto puede ser del 10% al 120% de la corriente nominal.

Por esta razón es preciso conocer aproximadamente que cantidad de potencia necesaria se consumirá en VA con el fin de elegir el transformador de medición adecuado. (Ras, 2002)

2.6 Clase de precisión para transformadores de medición

La clase de precisión es designada por un número (índice de clase) que es igual al límite superior del error de intensidad o de tensión admisible, expresado en tanto por ciento, para la intensidad o tensión primaria asignada y la carga de precisión. (Ras, 2002)

Las clases de precisión normalizadas de los transformadores de intensidad para medida son:

0,1 – 0,2 – 0,5 – 1,0 – 3,0

2.7 Límites de los errores de los transformadores de corriente para medida

Para los transformadores de clases 0,1 – 0,2 – 0,5 y 1,0, el error de intensidad y el desfase a la frecuencia asignada, no deberá sobrepasar los valores de la tabla 2.1 cuando la carga secundaria este comprendida entre el 25% y el 100% de la carga de precisión. (Ras, 2002)

Tabla 2.1. Límites de errores en los transformadores de intensidad para medición

Clase de precisión	Error de intensidad en %, \pm , para los valores de intensidad expresados en % de la intensidad asignada				Desfase, \pm , para los valores de la intensidad expresados en % de la intensidad asignada							
					Minutos				Grados			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,257	0,137	0,085	0,085
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,515	0,257	0,171	0,171
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	1,546	0,773	0,515	0,515
1	3	1,5	1	1	180	90	60	60	3,093	1,546	1,031	1,031

Límites de error de intensidad y del desfase de los transformadores de intensidad para medida (clases 0,1 a 1). Fuente: (Ras, 2002)

2.8 Normativa para definir el error en el transformador de corriente

Los errores dentro de un transformador de corriente varían con la tensión conectada a la carga en el bobinado secundario y el valor de la corriente secundaria.

2.8.1 Error según la norma ASA americana

Esta norma hace una diferencia entre la clase de precisión de los transformadores de corriente al ser utilizados en medición o protección.

- Clase de precisión para el servicio de medición:

Están definidas por los límites de error, en porcentaje de los factores de corrección del transformador para la corriente nominal secundaria del 100%. Los límites en porcentaje se doblan al 10% de corriente nominal, los límites de corriente del 100% se aplican también a la corriente secundaria correspondiente al valor de corriente térmica máxima del transformador de corriente.

Tabla 2.2. Clase de precisión

Clase de precisión	Límites del factor de corrección del transformador				Límites del factor de potencia (inductivo) de la línea que se mide
	100% de la corriente nominal		10% de la corriente nominal		
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
1,2	0,988	1,012	0,976	1,024	0,6-1,0
0,6	0,994	1,006	0,988	1,012	0,6-1,0
0,3	0,997	1,003	0,994	1,006	0,6-1,0

Límites de corrección del transformador de corriente para medición. Fuente: (Ras, 2002)

- Clase de precisión para el servicio de protección:

Las normas ASA han establecido la clasificación de precisión de los transformadores de corriente para el servicio de protección en tres factores:

Límite de error porcentual: los porcentajes máximos de error en la relación de transformación son de 2.5 y 10%. Se la conoce como precisión normalizada.

Valor nominal de tensión secundaria: los valores establecidos en el secundario son: 10, 20, 50, 100, 400 y 800. Corresponden a cargas normalizadas USA de 100 A.

Clase de funcionamiento: se designa con la letra L (baja impedancia) o H (alta impedancia).

2.8.2 Error según la norma VDE alemana

A diferencia de las normas ASA en estas normas no se hace referencia entre los servicios de medición y protección. La única diferencia entre ellos es la clase de precisión y el índice de sobre corriente.

- En la clase 1 se garantiza esta precisión para corriente entre 1 y 1,2 veces la corriente nominal, en cambio para las cargas secundarias están entre el 25% y 100% la nominal con factor de potencia 0,80.

- En la clase 3 se garantiza esta precisión para corriente entre 0,5 y 1 veces la corriente nominal y para cargas entre el 50% y 10% la nominal con factor de potencia 0,80. (Schiffre & Bruschi, 2002)

2.9 Metodología de construcción de un transformador de medición de corriente

2.9.1 Forma del núcleo

Existe varias formas de núcleos para la construcción de transformadores, pero la forma de núcleo que presenta menores pérdidas y una menor reluctancia es el núcleo de tipo toroidal.

2.9.2 Dimensiones del núcleo

Se puede construir núcleos de diferentes tamaños, pero el tamaño del núcleo debe garantizar que la densidad de flujo necesaria para cumplir la clase de precisión 0,2 sin que el núcleo se sature.

2.9.3 Material del núcleo

Los materiales para la construcción de los núcleos deben ser de elementos ferromagnéticos con una alta permeabilidad como son los materiales de grano orientado, grano no orientado y nano estructurados.

En el mercado existen materiales ferromagnéticos en forma de láminas enrolladas o de masa sólida.

2.9.4 Curva de magnetización

Mediante las curvas de magnetización de los materiales se puede determinar la densidad de flujo B adecuada para que el transformador de corriente cumpla con los errores admisibles para entrar en la clase de precisión 0,2.

2.9.5 Bobina

Mediante la relación de transformación $N_p I_p = N_s I_s$ se puede determinar el número de vueltas en la bobina primaria y el número de vueltas en la bobina secundaria y a su vez el calibre del alambre de cobre tanto para la bobina primaria y secundaria.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL TRANSFORMADOR

3.1 Especificaciones del transformador de corriente

3.1.1 Especificaciones del núcleo

Para el núcleo se requiere una estructura que garantice un flujo de electrones dirigido en una sola dirección, evitando saltos para así tener menor reluctancia y menores pérdidas en el campo magnético.

El núcleo requiere ser construido de elementos ferromagnéticos de alta permeabilidad en forma de láminas o de masa sólida, considerando que la permeabilidad depende del material y representa la oposición a la circulación del flujo magnético, este influye directamente en la precisión.

Las dimensiones del núcleo deben ser adecuadas en función de la densidad de flujo magnético, las cuales se debe determinar para cumplir con el requerimiento de error en la medición. La ventana requerida en el núcleo debe tener la dimensión necesaria para que por ahí atraviese el conductor primario y secundario con todas sus vueltas, con el fin de tener el espacio suficiente de maniobrabilidad y reducir pérdidas por proximidad.

La relación entre el número de vueltas del primario y secundario debe ser elegido para establecer la relación de transformación de corriente adecuada en función de los límites de corriente a medir.

3.1.2 Especificaciones del conductor

Para el conductor se requiere determinar el calibre que soporte el paso de la corriente RMS máxima a medir, además de reducir las pérdidas por efecto Skin y Térmicas.

3.2 Diseño y construcción del transformador de corriente

3.2.1 Diseño del núcleo

Para obtener la precisión de clase 0,2 en el transformador de corriente se evalúan tres tipos de materiales ferromagnéticos diferentes, con distinta permeabilidad para determinar el que tenga la mejor precisión.

Los materiales ferromagnéticos elegidos son: Grano no orientado, que es una aleación de hierro y silicio (FeSi); Grano orientado, que es una aleación de hierro y níquel (FeNi) y Nanoestructurado, el cual está compuesto de ferrita a escalas nanométricas.

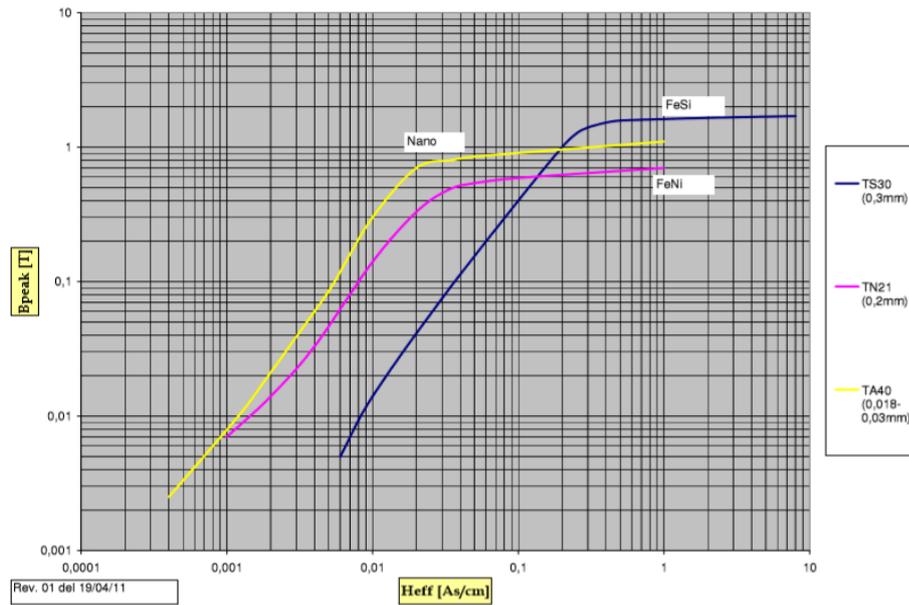
Tabla 0.1. Permeabilidad mínima y máxima de cada material

Material	Grano no orientado (FeSi)	Grano orientado (FeNi)	Nano estructurado
Permeabilidad mínima	7300	27000	28000
Permeabilidad máxima	9600	98000	204000

Permeabilidad del material ferromagnético. Elaborado por: Paul Arellano

La densidad de flujo adecuada se determina con las curvas de densidad de flujo magnético vs intensidad de flujo magnético (B vs H) de cada material como se observa en la Figura 3.1, estableciendo los valores que se muestran en la tabla 3.2, que son elegidos por la permeabilidad relativa mínima para que el transformador entre en la clase de precisión, que el núcleo no se sature y las dimensiones geométricas no sean muy grandes.

Figura 3.1. Curvas B vs H de los materiales ferromagnéticos



Curvas B vs H de los materiales ferromagnéticos nanoestructurado, grano orientado y grano no orientado. Fuente: (OMEM S.P.A, Quito, 2018).

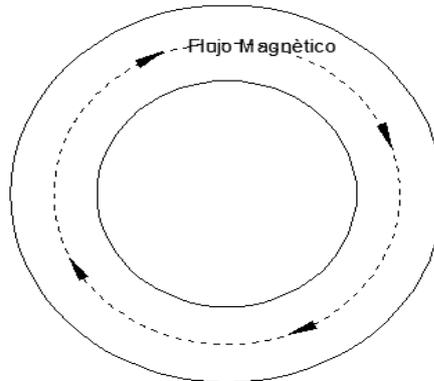
Tabla 0.2. Selección de densidad de flujo

Densidad de flujo	Grano no Orientado	Grano Orientado	Nano estructurado
B	1 T	0,7 T	0,3 T

Selección de densidad de flujo. Elaborado por: Paul Arellano

De acuerdo con los valores de (B) los núcleos se construyen de forma toroidal porque se tiene un flujo magnético en una sola dirección, disminuyendo las pérdidas térmicas y con menor valor de reluctancia, como se observa en la Figura 3.2.

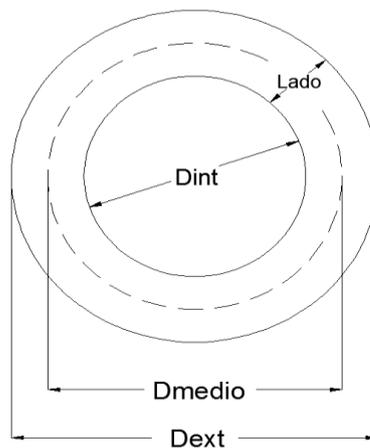
Figura 3.2. Núcleo toroidal



Circulación de flujo magnético en núcleo toroidal. Elaborado por: Santiago Carrión.

Las dimensiones del núcleo son: Diámetro interior (D_{int}) 65 mm, Diámetro exterior (D_{ext}) 75 mm y el espesor de 25 mm, la disposición física de estas dimensiones se observa en la Figura 3.3.

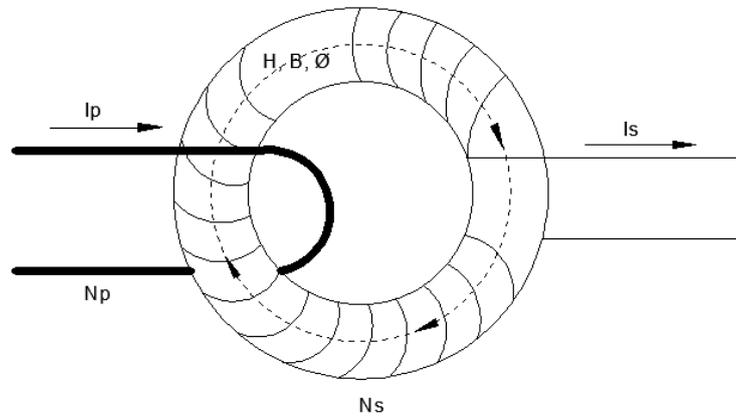
Figura 3.3. Dimensiones del núcleo toroidal



Distribución de las dimensiones en el núcleo toroidal. Elaborado por: Santiago Carrión.

Estas dimensiones garantizan la no saturación del núcleo por el paso del flujo magnético seleccionado en la tabla 3.2, el D_{int} tiene la dimensión necesaria para que por ahí pase el conductor de línea y de una vuelta siendo así el bobinado primario y de la misma forma se encuentra enrollado el bobinado secundario, en la Figura 3.4 se puede observar la disposición de las bobinas en el toroide.

Figura 3.4. Distribución de las bobinas en el toroide



Distribución de bobinas en el toroide y circulación de corrientes y flujo magnético. Elaborado por: Santiago Carrión.

Donde:

- I_p = Corriente en el primario
- I_s = Corriente en el secundario
- E = Voltaje RMS inducido en el secundario
- N_p = Numero de espiras en el primario
- N_s = Numero de espiras en el secundario
- Φ = Flujo magnético
- H = Intensidad del campo magnético
- B = densidad de flujo

3.2.2 Diseño del bobinado

Considerando que la corriente máxima a medir es de 100 A y realizar esta medición de forma directa primero resulta costosa por los equipos que se necesitan y segundo por seguridad no se recomienda realizar una medición directa de estos valores altos de

corrientes, además que el equipo tiene que permanecer conectado siempre, por estos motivos es necesario realizar una medición indirecta utilizando el transformador de corriente en el cual se utilizan equipos de medición hasta de 1 A.

Se establece la relación de trabajo de 100 a 1 A, la cual determina el número de vueltas tanto para el bobinado primario como para el bobinado secundario.

De acuerdo con la ecuación 3.1 queda que el bobinado primario de 1 vuelta y el bobinado secundario con 100 vueltas.

$$N_p I_p = N_s I_s \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde:

- N_p = Numero de vueltas en el primario
- N_s = número de vueltas del secundario.
- I_p = corriente del primario.
- I_s = corriente del secundario.

Para el bobinado primario se utiliza un conductor calibre #1/0 AWG el cual soporta hasta la cantidad de 130 amperios (A), los datos técnicos de conductor se detallan en el anexo 7. Mientras que para el bobinado secundario se utiliza un conductor calibre #20 AWG el cual soporta hasta la cantidad de 1,5 (A). Con estos calibres se garantiza el buen funcionamiento del sistema para los rangos de medición considerados.

Tanto el bobinado primario como el bobinado secundario están enrollados en el núcleo de manera que todas las vueltas formen una sola capa, los diámetros de los bobinados primario y secundario de 8,226 mm y 0,805 mm respectivamente, permiten que la cantidad de vueltas necesarias de los bobinados ocupen de manera proporcional el perímetro del toroide.

Tomando en cuenta el calibre, el número de vueltas y el tipo de bobinado se puede determinar la longitud del alambre con la ecuación 3.2.

$$Long_{Alam} = \frac{Ns * \text{factor de dobléz} * 2 * (An + la) + \text{factor de conexiones}}{100} [m] \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Donde:

Factor del dobléz= es la cantidad de cobre extra necesario cuando se realizan los giros en el bobinado al momento de ir enrollando el conductor sobre el núcleo toroidal, se considera el 10% de la sección del alambre.

Factor de conexión= este valor representa una reserva de alambre en los terminales por cualquier conexión que se realice con el transformador de corriente, se considera el 4% de la sección del alambre.

La resistencia del bobinado está dada por la ecuación 3.3.

$$Res_{alam} = \frac{Long_{alam} * R / Km}{1000} [\Omega] \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Se obtiene un valor muy pequeño de la resistencia del bobinado de $0,33\Omega$ lo que indica que las pérdidas en el cobre son mínimas, por este motivo se la considera despreciable.

3.3 Construcción del transformador

3.3.1 Núcleo

Se debe tener presente que la clase de precisión está íntimamente relacionada a la permeabilidad del núcleo, por lo cual es indispensable obtener un material con alta permeabilidad. Se adquiere tres tipos de materiales para la elaboración del núcleo toroidal del transformador para medición de corriente, los cuales están descritos previamente en la Tabla 3.1.

Para la construcción de los 3 prototipos de núcleo se adquiere carretes de láminas envueltas con 100 m de longitud, las tres tipas de materiales ferromagnéticos tienen el mismo espesor de 25 mm.

3.3.2 Forma del núcleo

Para la elaboración de los 3 prototipos de núcleo se utiliza las instalaciones de la Empresa IMETRILEC CIA. LTDA. debido a que se dispone de máquinas especializadas que serán útiles para la construcción del transformador de corriente.

Para dar la forma toroidal al núcleo se utiliza la bobinadora marca MAX LOADING modelo ZPX-600 que dispone de un controlador de velocidad y del número de vueltas en la Figura 3.5 se puede observar a la bobinadora.

Figura 3.5. Bobinadora



Bobinadora. Elaborado por: Santiago Carrión.

Se construye un cilindro en acero con las medidas del diámetro interior del núcleo toroidal, ya que esta está sujeta a la bobinadora dando la forma toroidal al momento de realizar el laminado del núcleo, en la Figura 3.6 se puede observar el cilindro de acero.

Figura 3.6. Núcleo de acero.



Molde de núcleo de acero. Elaborado por: Santiago Carrión.

3.3.3 Laminado del núcleo

Se elabora un par de topes de manera de tal forma que no se pierda el centrado de la lámina al momento de realizar el laminado como indica la Figura 3.7.

Figura 3.7. Topes de madera para la bobinadora



Topes de madera para que el molde de acero no se mueva. Elaborado por: Santiago Carrión.

Se ubica el cilindro de acero en la bobinadora con los topes de madera y a su vez se traslada el carrete de 100 m a la bobinadora de tal manera que estén paralelas el carrete y la bobinadora como se puede observar en la Figura 3.8.

Figura 3.8. Fleje enrollado en núcleo de acero



Laminado del fleje sobre el molde de acero. Elaborado por: Santiago Carrión.

Se calibra la bobinadora a 5 rpm ya que esta velocidad es la adecuada para realizar el bobinado y también se selecciona el giro en sentido horario para poder ir ajustando conforme avance el laminado, este proceso se lo realiza hasta alcanzar el diámetro exterior del toroidal como se observa en la Figura 3.9.

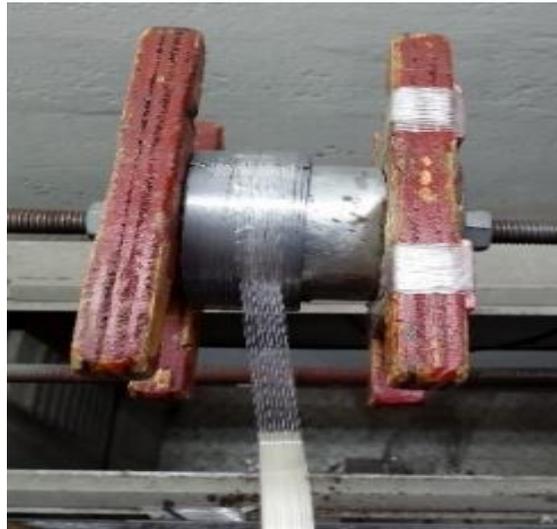
Figura 3.9. Laminado de fleje



Enrollando fleje sobre molde de acero. Elaborador por: Santiago Carrión.

Una vez culminado el laminado se procede a asegurar el núcleo con cinta de fibra de vidrio como indica la Figura 3.10.

Figura 3.10. Recubrimiento del laminado con cinta de fibra



Fijación del laminado con cinta de fibra. Elaborado por: Santiago Carrión.

Una vez sujetado el núcleo laminado con fibra de vidrio se coloca un punto de suelda en los extremos con el fin de evitar que el núcleo se deforme como indica la Figura 3.11.

Figura 3.11. Soldadura en el núcleo



Puntos de suelda sobre el fleje laminado. Elaborador por: Santiago Carrión.

Para dar un mejor acabado al núcleo se realiza un pulido en los puntos de suelda, esto con el fin de dejar una superficie lisa antes de realizar el bobinado sobre el núcleo como se observa en la Figura 3.12.

Figura 3.12. Pulido de los puntos de suelda en el núcleo



Puntos de suelda pulidos. Elaborado por: Santiago Carrión.

Se retira la cinta fibra de vidrio para luego ubicar el núcleo en un molde para realizar un tratamiento térmico como indica la Figura 3.13.

Figura 3.13. Colocación del núcleo sobre molde para tratamiento térmico



Núcleo listo para el tratamiento térmico. Elaborado por: Santiago Carrión

3.3.4 Tratamiento térmico

Consiste en recuperar las cualidades magnéticas del núcleo sometiéndolo a una temperatura que va entre los 750 °C hasta los 820°C ya que estas temperaturas son adecuadas para que los materiales magnéticos logren aliviar las tensiones mecánicas generadas por el trabajo en frío, la aplicación de esta temperatura se lo realiza por una hora como se observa en la Figura 3.14.

Figura 3.14. Tratamiento térmico del núcleo



Núcleo en horno. Elaborado por: Santiago Carrión.

Una vez culminado el tiempo del tratamiento se deja enfriar lentamente en el mismo horno como se muestra en la Figura 3.15.

Figura 3.15. Enfriamiento del núcleo



Núcleo frío después del tratamiento térmico. Elaborado por: Santiago Carrión

3.3.5 Barnizado

Culminado el tratamiento térmico se le aplica una capa de barniz dieléctrico ECOMEG 2301 clase B el cual brinda un secado rápido y aísla el núcleo del bobinado secundario como se muestra en la Figura 3.16.

Figura 3.16. Barnizado del núcleo



Colocación de barniz aislante sobre el núcleo. Elaborado por: Santiago Carrión.

3.3.6 Tapas

Las tapas van acopladas en la cara frontal y posterior del núcleo, tienen 150 muescas para poder tener un espacio simétrico entre espiras como se observa en la Figura 3.17 Las dimensiones son de:

$D_i = 64\text{mm}$

$D_e = 77\text{mm}$

Figura 3.17. Aisladores de núcleo



Aisladores del núcleo. Elaborado por: Santiago Carrión.

3.3.7 Bobinado del secundario

Se construye en fibra de vidrio una pieza en forma de Hueso con dos orificios en sus extremos para sujetar el alambre esmaltado AWG #20, las dimensiones son Largo: 50cm ancho 10cm. Esta pieza en forma de hueso nos ayuda con el bobinado manual, ya que actualmente en la Empresa IMETRILEC no se dispone de una maquina

bobinadora de núcleos toroidales en la Figura 3.18 se muestra la pieza en forma de Hueso.

Figura 3.18. Pieza en forma de hueso para enrollar el alambre esmaltado



Pieza en forma de hueso para enrollar el alambre esmaltado antes de realizar el bobinado. Elaborado por: Santiago Carrión.

Una vez envuelto todo el alambre esmaltado AWG #20 en la pieza en forma de hueso se instala las tapas en el núcleo para si poder realizar el bobinado del secundario mediante el uso de las guías dando exactamente 100 vueltas como se muestra en la Figura 3.19.

Figura 3.19. Bobinado en el núcleo toroidal



Bobinado sobre el núcleo toroidal. Elaborado por: Santiago Carrión.

3.3.8 Carcasa

Mediante el programa SolidWord se diseña la carcasa del transformador de corriente la cual tendrá las siguientes dimensiones y se puede observar en la Figura 3.20.

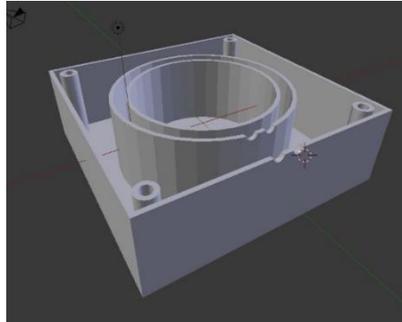
Alto: 100 mm

Ancho: 85mm

fondo: 45mm

ventana: 45mm

Figura 3.20. Diseño de la carcasa



Diseño de la carcasa para poder imprimirla en 3D. elaborado por: Paul Arellano.

a. Especificaciones finales del transformador

Se realiza los cálculos para los tres prototipos tomando los valores (B) descritos en la tabla 4 y tomando también como referencia las curvas de magnetización propias de cada material que están en los anexos 1, 2 y 3, dando como resultado los valores descritos en la Tabla 3.3.

Tabla 0.3. Cálculos.

MAGNITUD	RESULTADO	UNIDAD DE MEDIDA
BURDE	10	[Va]
CORRIENTE PRIMARIA	100	[A]
CORRIENTE DEL SECUNDARIO	1	[A]
DIAMETRO INTERIOR	65	[mm]
DIAMETRO EXTERIOR	75	[mm]
ANCHO	25	[mm]
DENSIDAD DE FLUJO	1, 0.7, 0.3	[Teslas]
NUMERO DE ESPIRAS SECUNDARIO	100	[ADIMENSIONAL]
AREA T	2,5	[cm ²]
LADO	1	[cm]
LONMED	23,562	[cm]
PESO NUCLEO	0,041	[Kg]
DENSIDAD DE CORRIENTE	1,8	

SECCION DEL ALAMBRE	0,66	mm^2
# AWG alambre primario	1/0	[AWG]
# AWG alambre secundario	22	[AWG]
LONG ALAMBRE	8	[mtr]
RESISTENCIA DEL ALAMBRE	0,43	[Ω]

Tabla de cálculos. Elaborado por: Paul Arellano

Los cálculos están hechos tomando en cuenta las normas ASA para transformadores de corriente, donde se debe realizar los cálculos con un BURDE nominal del 25% y 100%, para la corriente serán valores del 10%, 20%, 100% y 120% de la corriente nominal.

En el Anexo 4, 5 y 6 se encuentran los cálculos individuales de los prototipos y el % de erro de los núcleos.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

Una vez que se tiene el diseño y con la construcción de los prototipos del Transformador para medición de corriente, es necesario realizar pruebas con el fin de determinar el nivel de precisión y el correcto funcionamiento de estos cuando ya se encuentren trabajando en la industria.

Las pruebas que se llevan a cabo en cada uno de los prototipos de los TC son las siguientes:

- a. Prueba de aislamiento.
- b. Prueba de polaridad.
- c. Prueba de medición Corriente de Magnetización.
- d. Prueba de contrastación y Funcionamiento del transformador de corriente.

4.1 Prueba de Aislamiento

La prueba de aislamiento tiene como fin comprobar si durante el proceso de construcción de los prototipos de los Transformadores para medición de corriente el conductor no tiene ningún daño tanto en su constitución física como en el aislante y que el bobinado se encuentre separado del núcleo.

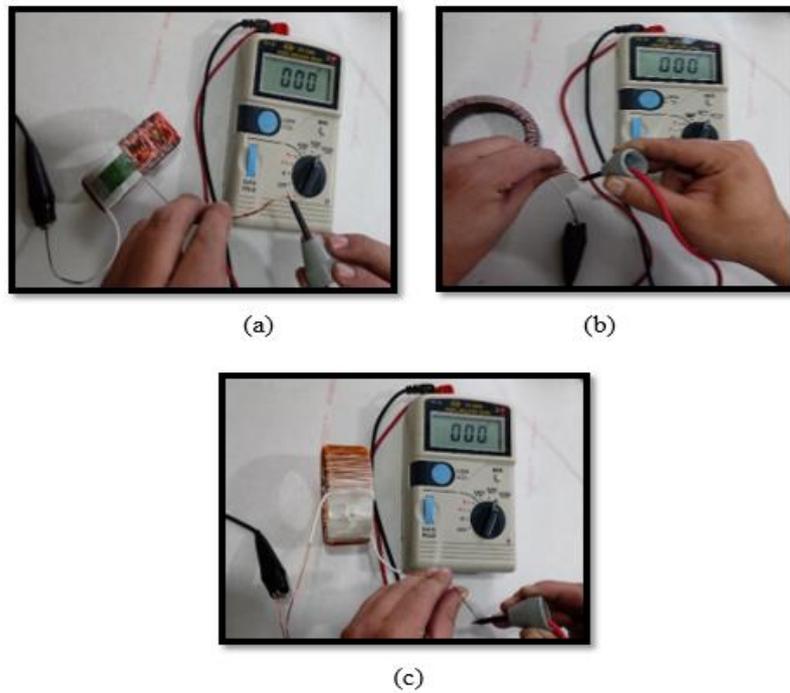
Para esta prueba se utiliza un Analizador Digital de Aislamiento (Digital Insulation Tester YF – 509) cuya función es proporcionar alto voltaje hacia la parte que se desea comprobar si se encuentra aislada.

4.1.1 Realización de prueba de aislamiento

- Prueba de aislamiento en bobinado

En la Figura 4.1 se observa cómo se realiza la prueba de aislamiento en el bobinado de los tres prototipos de los transformadores de corriente.

Figura 4.1. Pruebas de aislamiento en bobinado de los TC



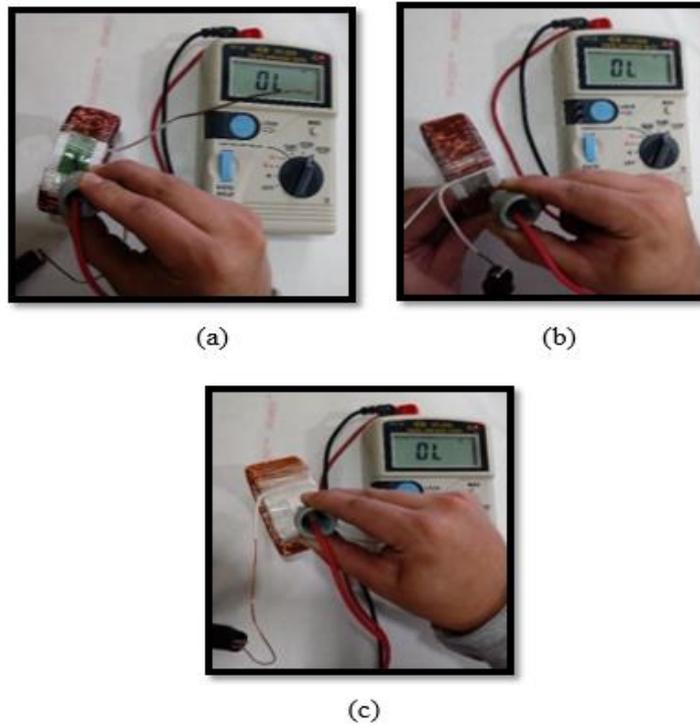
Pruebas de aislamiento en bobinados de los transformadores de corriente. (a) Bobinado en núcleo Nanoestructurado, (b) Bobinado en núcleo Grano Orientado, (c) Bobinado en núcleo Grano no Orientado. Elaborador por: Santiago Carrión

En el caso de la prueba de aislamiento en el bobinado, cuando este se encuentra en buenas condiciones es decir no tiene ningún daño en su constitución física ya sea algún corte o grieta como también en su aislante, el resultado que se obtiene en el analizador de aislamiento será un valor de 0, lo que muestra que bobinado se encuentra en perfectas condiciones.

- **Prueba de aislamiento entre bobinado y núcleo**

En la Figura 4.2 se observa cómo se realiza la prueba de aislamiento entre el bobinado y el núcleo de los tres prototipos de los transformadores de corriente.

Figura 4.2. Pruebas de aislamiento entre núcleo y bobinado de los TC



Pruebas de aislamiento entre núcleo y bobinados de los Transformadores de corriente. (a) Bobinado en núcleo Nanoestructurado, (b) Bobinado en núcleo Grano Orientado, (c) Bobinado en núcleo Grano no Orientado. Fuente: Fotografías tomadas por (Santiago Carrión, Quito, 2018)

En el caso de la prueba de aislamiento entre el núcleo y el bobinado, si no existe ningún contacto entre las dos partes el resultado que nos muestra el analizador de aislamiento será de OL (Circuito Abierto) asegurándonos que el bobinado se encuentra completamente aislado del núcleo. En la Tabla 4.1 se observa un resumen en general de la prueba de aislamiento realizada a los tres prototipos de los transformadores para medición de corriente.

Tabla 0.1. Pruebas de aislamiento de los TC

MATERIAL	PRUEBAS	
	BOBINA-NUCLEO	BOBINA-BOBINA
GRANO NO ORIENTADO	OL	0
GRANO ORIENTADO	OL	0
NANO ESTRUCTURADO	OL	0

Tabla de resumen de los resultados finales de las Pruebas de aislamiento realizadas en los prototipos del Transformador para medición de corriente. Elaborador por: Santiago Carrión

De acuerdo con los resultados, en las dos pruebas, el aislamiento no se ha visto afectado ni en el bobinado ni con respecto al núcleo, lo que garantiza el completo aislamiento entre las dos partes del transformador de corriente.

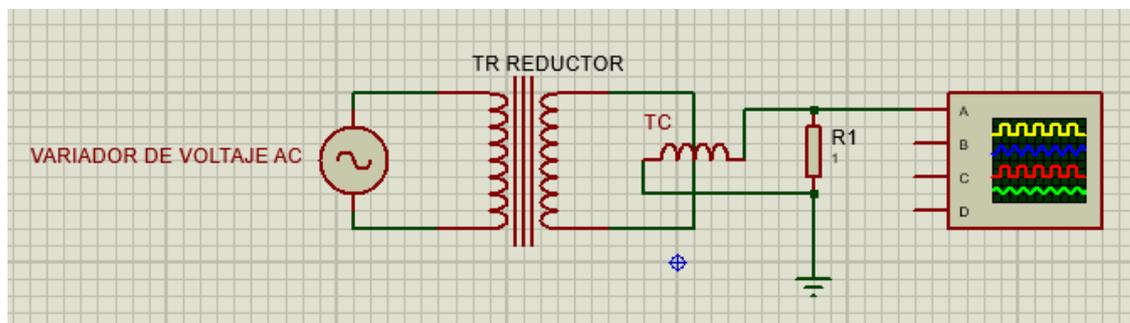
4.2 Prueba de polaridad

Esta prueba tiene como fin determinar el sentido que va a tener el flujo de la corriente al momento de circular por el bobinado, para establecer el inicio o punto de partida del bobinado se denotará con la letra “K”, y el final del bobinado que se denotará con la letra “L”. Esta información es necesaria para poder conectar de manera correcta el instrumento de medida que se vaya a utilizar con el transformador de corriente, adicionalmente cuando se trabaja en sistemas trifásicos los transformadores para medición de corriente deben tener el mismo sentido, es decir deben estar sincronizados, para así evitar mediciones erróneas.

4.2.1 Realización de la prueba de polaridad

Con el circuito que se muestra en la Figura 4.3, se lleva a cabo la prueba de polaridad en los tres prototipos de los transformadores para medición de corriente.

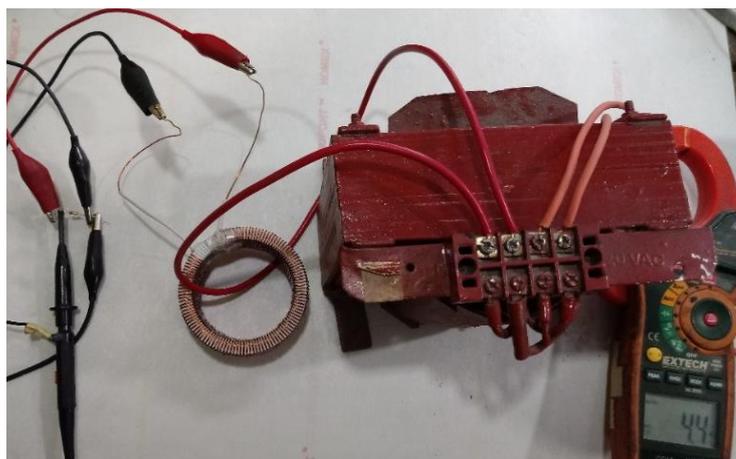
Figura 4.3. Circuito a implementarse para la prueba de polaridad en los TC



Circuito para realizar la prueba de polaridad. Elaborado por: Santiago Carrión.

El circuito consiste en alimentar al bobinado primario del transformador reductor utilizando el variador de voltaje, posteriormente se debe cortocircuitar al bobinado secundario del transformador reductor y es ahí en donde va colocado el transformador para medición de corriente. La resistencia de medición ira en los terminales del transformador de corriente y en los extremos de la resistencia conectaremos las puntas de medición del osciloscopio para observar la gráfica, como se observa en la Figura 4.4.

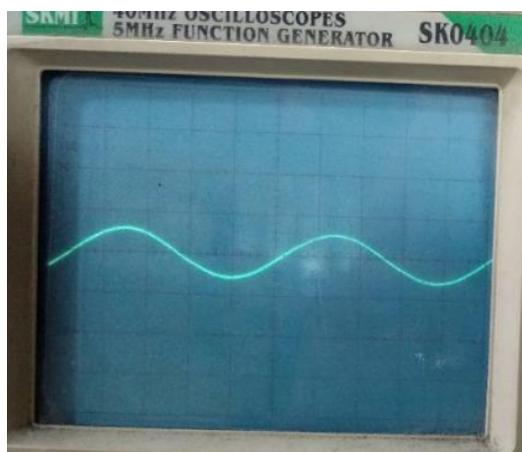
Figura 4.4. Circuito armado para prueba de polaridad



Realización de la prueba de polaridad. Elaborador por: Santiago Carrión.

En la Figura 4.5 se muestra la forma de onda desplazada por encima del eje (x) lo que indica que el transformador de corriente está polarizado de manera positiva, y muestra también que la corriente de medición está ingresando por el terminal “K” del transformador de corriente.

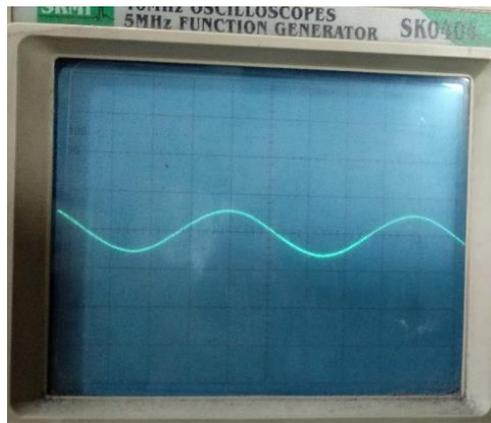
Figura 4.5. Forma de onda positiva



Resultado de la polaridad positiva. Elaborado por: Santiago Carrión.

En la Figura 4.6 se muestra la forma de onda desplazada por debajo del eje (x) lo que indica que el transformador de corriente está polarizado de manera negativa, y muestra también que la corriente de medición está ingresando por el terminal “L” del transformador de corriente.

Figura 4.6. Forma de onda negativa



Resultado de la polaridad positiva. Elaborado por: Santiago Carrión.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de polaridad se identificó cada uno de los terminales “K” y “L” de los transformadores de corriente, para cuando vayan a ser colocados en las carcasas los terminales estén identificadas para su posterior utilización y conexión.

4.3 Prueba de medición corriente de Magnetización

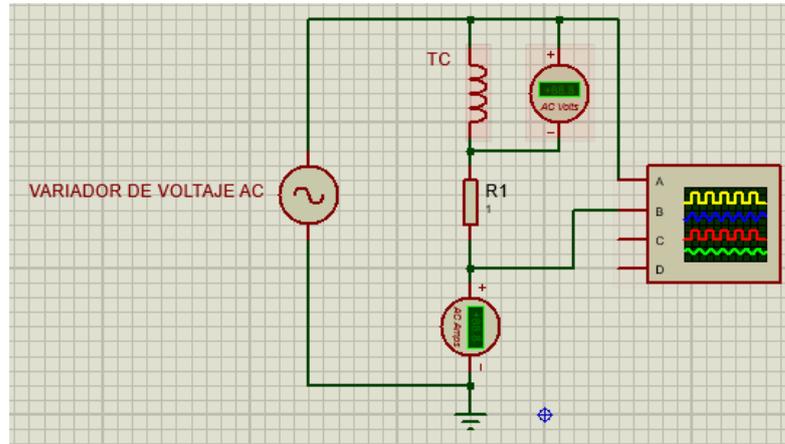
Esta prueba tiene como fin determinar la corriente de magnetización en el transformador para medición de corriente, y así establecer la clase del transformador.

Existe un valor máximo de (I_m) que es de 10 mA que fue obtenida mediante cálculos.

4.3.1 Realización de la prueba de medición de Corriente de Magnetización

En la Figura 4.7 se observa el circuito que se emplea para llevar a cabo la prueba de medición de corriente de magnetización.

Figura 4.7. Circuito por implementarse para la prueba de medición de corriente de magnetización en los transformadores de corriente



Circuito para realizar la prueba de medición de corriente de magnetización. Elaborado por: Santiago Carrión.

Con el variador de voltaje se alimenta al bobinado secundario del transformador de corriente, iniciando desde los 2 voltios se aumenta en escala de 1 voltio hasta aproximadamente los 17 voltios con el fin de realizar varias mediciones y que el núcleo ferromagnético no se sature. La resistencia que se colocó sirve para medir voltaje y corriente.

Como se observa en la Figura 4.8, se obtiene un resultado de corriente de magnetización de 2 mA al aplicar 10 V, este valor representa la corriente máxima permitida para que el transformador entre en la clase de precisión 0,2.

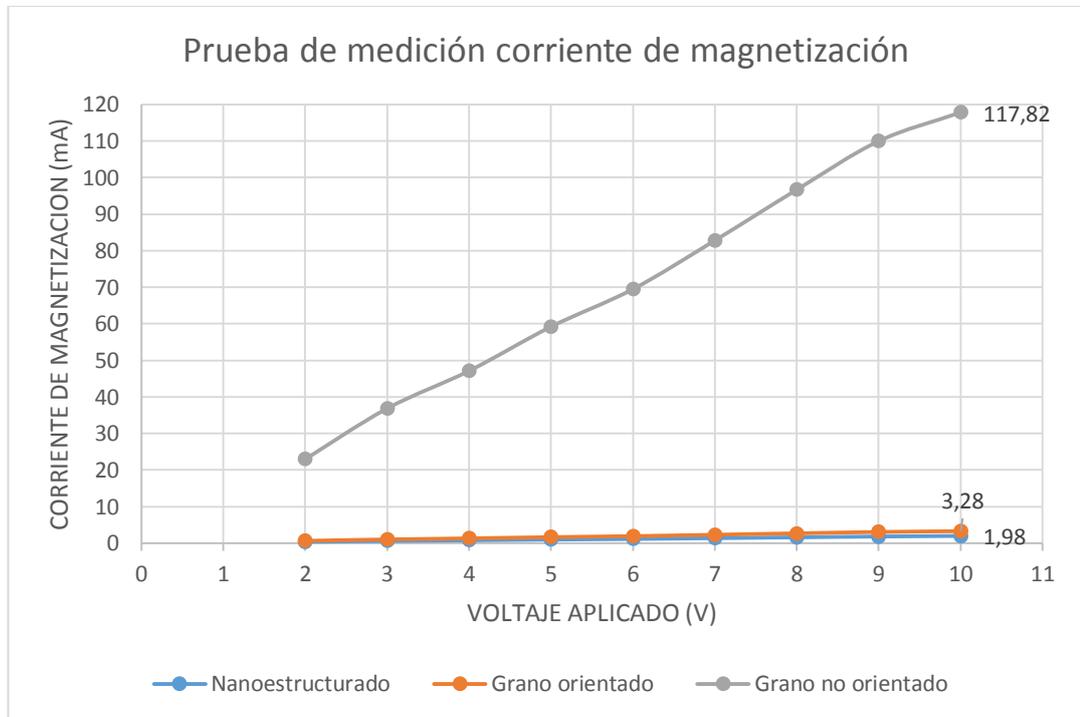
Figura 4.8. Circuito armado para la prueba de medición de corriente de magnetización en los transformadores de corriente



Medición de la corriente de magnetización. Elaborado por: Santiago Carrión.

En la Figura 4.9 se observa el comportamiento de la corriente de magnetización en cada uno de los materiales ferromagnéticos con respecto a las mediciones realizadas que se muestran en el Anexo 7.

Figura 4.9. Prueba medición corriente de magnetización



Valores obtenidos en prueba de medición de corriente de magnetización. Elaborado por: Santiago Carrión.

De acuerdo con la Figura 4.9, los valores de las corrientes máximas de magnetización que se obtienen cuando se aplica un voltaje de 10 V en los núcleos son: nanoestructurado= 1,98 mA; grano orientado= 3,28 mA; grano no orientado= 117,82 mA.

Con estos resultados se tiene que el núcleo nanoestructurado está dentro de la clase de precisión 0.2, el núcleo grano orientado se encuentra en la clase 0.5 y el núcleo grano no orientado se encuentra en la clase 5.

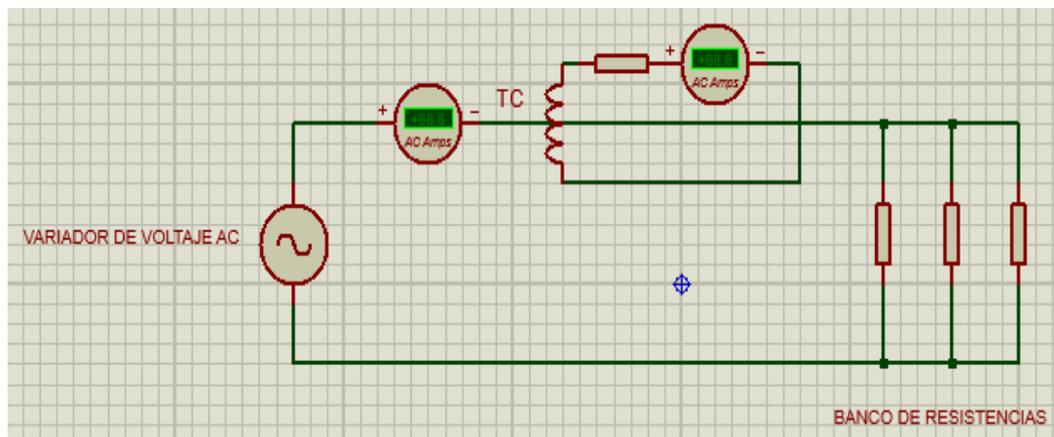
4.4 Prueba de contrastación y funcionamiento de los transformadores de corriente

El objetivo de esta prueba es determinar el error en la medición de corriente, tomando como referencia un transformador patrón de clase 0,5.

4.4.1 Realización de la prueba de contratación y funcionamiento de los transformadores de corriente

Para esta prueba se utiliza el circuito de la Figura 4.10, que permite variar la corriente circulante, de manera que se obtengan corrientes de 20 A, 40 A, 60 A, 80 A y 100 A, que abarcan la totalidad del rango de trabajo del transformador de corriente. Para cada valor de corriente se realizaron diez mediciones con el transformador de corriente construido, así como con un transformador de corriente de clase 0.5, considerado como patrón, de manera que se pueda establecer tanto la exactitud como la precisión en la medición y realizar un análisis comparativo.

Figura 4.10. Circuito para la prueba de contrastación y funcionamiento en los transformadores de corriente.



Circuito para realizar la prueba de funcionamiento y contrastación. Elaborado por: Santiago Carrión

Esta prueba consiste en alimentar una carga resistiva por la cual van a circular los distintos valores de corrientes, donde se ubican los transformadores de corriente con el fin de medir la relación de transformación que existe a la salida de estos.

En la Figura 4.11 se muestra el funcionamiento de los transformadores para corriente de clase 0,5 y de clase 0,2.

Figura 4.11. Prueba de contrastación y funcionamiento en los transformadores de corriente clase 0,5 y clase 0,2



Medición de las corrientes en la prueba de funcionamiento de los transformadores de corrientes. Elaborado por: Santiago Carrión.

Los valores obtenidos con cada transformador para todos los valores de corrientes se pueden observar en los anexos del 8 al 12. En la Tabla 4.2 se observan los resultados de las mediciones promedio obtenidas para cada valor de corriente circulante,

Tabla 0.2. Valores promedios obtenidos y porcentaje de error, en prueba de contrastación y funcionamiento en transformadores de corriente

Corriente nominal	TC Clase 0,5 de contratación	Error del TC clase 0,5	TC grano no orientado	Error del TC grano no orientado	TC grano orientado	Error en el TC grano orientado	TC nano estructurado	Error en el TC nano estructurado
20	0,1989	80,11%	0,1493	85,07%	0,172	82,80%	0,1995	80,05%
40	0,398	60,02%	0,2988	70,12%	0,3441	65,59%	0,3992	60,08%
60	0,5971	40,29%	0,4483	55,17%	0,5163	48,37%	0,5987	40,13%
80	0,7961	20,39%	0,5977	40,23%	0,6883	31,17%	0,7984	20,16%
100	0,9952	0,48%	0,7472	25,28%	0,8604	13,96%	0,9982	0,18%

Valores obtenidos en prueba de contrastación y funcionamiento de los transformadores de corriente relación 10:0,1. Elaborado por: Paul Arellano

Con los resultados obtenidos en la Tabla 4.2 se observa que el núcleo que tiene el menor error es el nanoestructurado, de la misma manera con los valores de exactitud en la medición este núcleo entra en la clase de precisión de 0,2 con respecto a los demás núcleos grano orientado y grano no orientado los cuales no están dentro de la clase de precisión deseada.

Con los valores descritos en la Tabla 7 queda demostrado que el TC nano estructurado cumple con los errores máximos permitidos por la clase 0,2.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Los transformadores para medición de corriente o (TC) están diseñados para uso industrial, específicamente en aplicaciones de medio y alto voltaje donde se tienen corrientes circulantes muy elevadas, ya que mediante la relación de transformación disminuyen las corrientes a valores manejables para operaciones de control y medición mediante equipos convencionales.

El error de medición al utilizar transformadores de corriente como cualquier se relaciona directamente con la cantidad de corriente utilizada para que se magnetice el núcleo ferromagnético, corriente de magnetización (I_m), y con un Burden nominal conectado en el bobinado secundario del transformador, motivo por el cual la I_m determina la clase de precisión del transformador de corriente.

Para mejorar la precisión de un TC es necesario disminuir las pérdidas producidas por la forma que dispone el núcleo y el material del cual está constituido, factores que influyen directamente en la I_m , por lo cual el núcleo necesita tener una forma en la que los electrones no realicen un salto entre chapas para tener un campo magnético más homogéneo, así mismo es necesario una alta permeabilidad para obtener la máxima densidad de flujo posible.

Las curvas de magnetización brindadas por el proveedor del material de grano no orientado, grano orientado y nano estructurado permiten visualizar los parámetros de saturación de cada material y a su vez las permeabilidades relativas máximas y mínimas que dispone cada uno, lo que hace posible una comparación entre los 3 prototipos construidos con estas laminas, de entre estos tres materiales el material nano estructura cumple con la clase de precisión 0,2 debido a su alta permeabilidad relativa estableciendo un campo magnético más alto en un área menor.

De acuerdo con el valor obtenido de 0,18%, el porcentaje de error calculado con respecto a la corriente nominal se logra determinar que el transformador de corriente con núcleo nanoestructurado cumple con todos los requerimientos necesarios para

pertenecer a la clase de precisión 0,2 que fue el objetivo planteado al inicio de este trabajo de titulación.

De acuerdo con los valores obtenidos en los anexos del 8 al 12 se puede realizar un método estadístico para determinar el valor promedio de los errores en las pruebas de contrastación para si obtener un valor con mayor exactitud que termine la clase de precisión que pertenece cada uno de los prototipos realizados.

En base a las pruebas realizadas en el laboratorio de IMETRILEC S.A. se pudo visualizar los valores de la corriente de magnetización de cada prototipo a diferentes valores de voltaje cumpliendo con la norma ASA americana donde determina que se deben realizar las pruebas en los TC a voltajes que van entre 10%, 20%, 100% y 120% del voltaje nominal que puede inducirse en el bobinado secundario para así lograr visualizar la corriente de magnetización a estos diferentes voltajes. Como resultado se tiene que la corriente de magnetización del núcleo construido con el material nanoestructurado es de 1,9982 miliamperios al 100% del voltaje nominal obteniendo como error el 0,2%, logrando así entrar en la clase 0,2 que es la razón por la cual se desarrolló este proyecto de titulación.

5.2 Recomendaciones

Antes de emprender en el diseño de un transformador de corriente, se debe tener claro el valor del Burden al cual se va a diseñar el TC. Ya que, si se conecta en el bobinado secundario un Burden de diferente valor al que previamente fue elegido para su diseño, el error que presentará el TC será más alto por ende se perderá la precisión a la cual fue diseñado.

Se recomienda al momento de desconectar la carga del secundario del transformador de corriente, primero cortocircuitar los terminales de dicho bobinado ya que el secundario de un TC no puede permanecer sin carga cuando está en funcionamiento porque se crean altos voltajes debido a que el flujo magnético crece exponencialmente, pudiendo causar daños al núcleo del transformador de corriente por las altas temperaturas y voltajes que se generan en su interior.

Se recomienda que el tamaño del transformador de corriente no debe ser muy grande, ya que el lugar donde trabajan son los tableros eléctricos de medio y alto voltaje, por lo que se dispone de un espacio reducido, por este motivo es necesario construir un TC de tamaño adecuado para que cumpla con las necesidades comerciales y de la clase de precisión planteada en este proyecto.

Se recomienda que en las pruebas de medición de la corriente de magnetización no se debe exceder los valores de 120% del voltaje nominal, ya que podría llevar a la saturación del núcleo y provocar lecturas falsas en la corriente de magnetización.

Para la construcción del núcleo utilizando el material nano estructurado, se debe tener mucho cuidado, ya que la estructura cristalina del material a presiones grandes tiende a rasgarse, debido a esto el campo magnético es mucho más débil que los núcleos creados con un material diferente que toleran presiones más grandes.

REFERENCIAS

Fitzgerald, A., Kingsley, C., & Umans, S. (2004). *Máquinas Eléctricas*. Mexico: McGraw-Hill.

Hayt, W., & Buck, J. (2006). *Teoría Electromagnética*. México, D.F: McGraw-Hill/Interamericana.

Milano, F. (2008). *Transformadores*. España: La mancha.

Ras, E. (2002). *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. Barcelona: Marcombo.

Revalco. (2014). Manual Técnico. *Sebatelec*, 50-65.

Schiffrer, M., & Bruschi, M. (2002). *Construcción de líneas aéreas de energía eléctrica*. España: Techint.

Viakon. (2010). Conductores Electricos. *Viakon Conductores Monterrey*, 77-79.

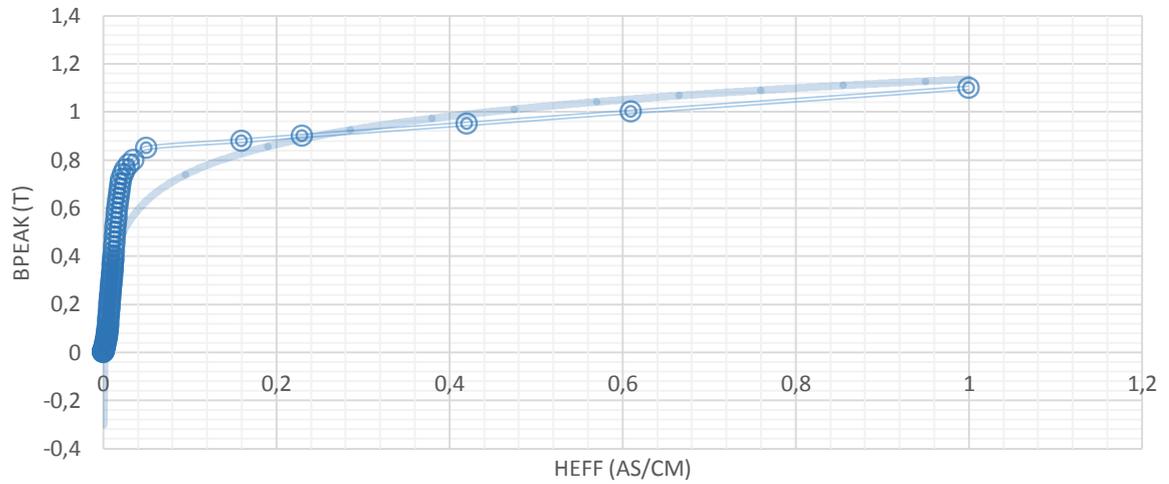
ANEXOS

Anexo 1. Datos núcleo Nano estructurado

Heff [As/cm]	Bpeak [T] nano	Angle [°] nano	Hreactive [As/cm] nano	Hactive [As/cm] nano	Permeabilidad relativa
0,0002	0,001	89,2	0,0002	2,7924E-06	28134,88488
0,00028	0,0015	88,8	0,0002799	5,8639E-06	30144,51951
0,00035	0,002	88,4	0,0003499	9,7726E-06	32154,15415
0,0004	0,0025	88	0,0003998	1,396E-05	35168,6061
0,00046	0,003	87	0,0004594	2,4075E-05	36697,67593
0,00056	0,004	84,5	0,0005574	5,3674E-05	40192,69269
0,00068	0,005	82	0,0006734	9,4638E-05	41374,83071
0,00079	0,006	79	0,0007755	0,00015074	42736,53399
0,0009	0,007	76,5	0,0008751	0,0002101	43765,37648
0,001	0,008	74	0,0009613	0,00027564	45015,81581
0,0011	0,009	71,9	0,0010456	0,00034174	46038,90253
0,0012	0,01	70	0,0011276	0,00041042	46891,4748
0,00162	0,015	62	0,0014304	0,00076054	52101,63867
0,0018	0,018	59	0,0015429	0,00092707	56269,76976
0,00191	0,02	57	0,0016019	0,00104026	58921,22488
0,0022	0,025	52	0,0017336	0,00135446	63942,92018
0,00245	0,03	48,5	0,0018349	0,00162342	68901,75889
0,0027	0,035	45	0,0019092	0,00190919	72942,29413
0,003	0,04	43	0,002046	0,00219406	75026,35968
0,00325	0,045	40	0,0020891	0,00248964	77911,9889
0,0035	0,05	38,5	0,0021788	0,00273913	80385,38537
0,00375	0,055	36,5	0,0022306	0,00301446	82528,99565
0,004	0,06	35	0,0022943	0,00327661	84404,65464
0,0042	0,065	33,2	0,0022998	0,00351441	87084,16749
0,00445	0,07	32	0,0023581	0,00377381	88514,24457
0,00465	0,075	30,8	0,002381	0,00399416	90757,69316
0,0048	0,08	30,09	0,0024065	0,00415315	93782,9496
0,005	0,085	29,63	0,002472	0,00434618	95658,60859
0,0052	0,09	29,16	0,0025337	0,00454096	97389,98612
0,00535	0,095	28,61	0,0025618	0,00469676	99918,28275
0,0055	0,1	28,51	0,0026252	0,00483304	102308,6723
0,0057	0,11	28,05	0,0026804	0,00503046	108590,7837
0,00595	0,12	27,77	0,0027722	0,00526471	113485,2499
0,00615	0,13	27,49	0,0028388	0,00545561	118944,2288
0,0064	0,14	27,12	0,0029175	0,00569634	123090,1213
0,0066	0,15	27,12	0,0030086	0,00587435	127885,8404
0,0068	0,16	26,84	0,0030702	0,00606744	132399,4583
0,007	0,17	27,31	0,0032116	0,00621976	136655,1551
0,00725	0,18	27,31	0,0033263	0,00644189	139704,256
0,00745	0,19	27,86	0,0034815	0,00658649	143506,7954
0,0077	0,2	27,86	0,0035983	0,00680751	146155,2461
0,0079	0,21	27,96	0,003704	0,00697787	149577,869
0,0081	0,22	28,51	0,0038662	0,00711774	152831,4734
0,0084	0,23	28,89	0,0040583	0,00735461	154071,9886
0,0086	0,24	29,38	0,0042192	0,00749391	157031,9156

0,0088	0,25	29,57	0,0043427	0,00765383	159857,3005
0,00905	0,26	29,77	0,0044935	0,00785563	161659,007
0,0093	0,27	30	0,00465	0,00805404	163363,8477
0,0095	0,28	30,28	0,0047901	0,00820393	165847,7424
0,00975	0,29	30,58	0,0049602	0,00839397	167366,4947
0,01	0,3	31	0,0051504	0,00857167	168809,3093
0,0102	0,31	31,5	0,0053295	0,00869693	171015,9669
0,0104	0,32	32	0,0055112	0,0088197	173137,7531
0,0107	0,33	32,5	0,0057491	0,00902429	173542,2806
0,0109	0,34	33	0,0059366	0,00914151	175520,3827
0,0111	0,35	33,5	0,0061265	0,00925613	177427,2019
0,0113	0,36	34	0,0063189	0,00936812	179266,5231
0,0115	0,37	34,6	0,0065302	0,00946607	181041,8679
0,0117	0,38	35,2	0,0067443	0,0095606	182756,5172
0,0119	0,39	35,7	0,0069441	0,00966379	184413,5311
0,0121	0,4	36,4	0,0071804	0,00973921	186015,7678
0,0125	0,42	37,5	0,0076095	0,00991692	189066,4264
0,013	0,44	38,7	0,0081282	0,0101456	190451,5284
0,0134	0,46	39,9	0,0085954	0,01028001	193164,8813
0,0138	0,48	41	0,0090536	0,01041499	195720,9383
0,0142	0,5	42,5	0,0095934	0,01046934	198132,9921
0,0146	0,52	43,6	0,0100684	0,01057291	200412,8786
0,0151	0,54	44,9	0,0106587	0,01069593	201229,6402
0,0156	0,56	46,2	0,0112595	0,01079743	201994,0453
0,016	0,58	47,5	0,0117964	0,01080944	203977,9154
0,0166	0,6	48,8	0,0124901	0,01093425	203384,71
0,0171	0,62	50,2	0,0131376	0,01094588	204019,0483
0,0177	0,64	51,6	0,0138714	0,01099432	203461,3144
0,0184	0,66	53	0,0146949	0,0110734	201837,2176
0,0191	0,68	54,5	0,0155496	0,01109143	200332,1646
0,02	0,7	56	0,0165808	0,01118386	196944,1942
0,0212	0,72	57,75	0,0179294	0,01131263	191104,8784
0,023	0,74	60,3	0,0199785	0,01139555	181041,8679
0,0255	0,76	63,1	0,0227408	0,01153709	167705,9805
0,03	0,78	67,3	0,0276761	0,01157718	146301,4014
0,035	0,8	70,6	0,0330128	0,01162564	128616,6166
0,05	0,85	76,45	0,0486083	0,01171469	95658,60859
0,16	0,88	85,78	0,1595662	0,01177381	30948,37337
0,23	0,9	87,05	0,2296952	0,01183683	22018,60556
0,42	0,95	88,37	0,4198301	0,01194691	12727,68602
0,61	1	88,87	0,6098814	0,01202977	9224,55242
1	1,1	89,3	0,9999254	0,012217	6189,674674

CURVA DE MAGNETIZACION NANOESTRUCTURADO

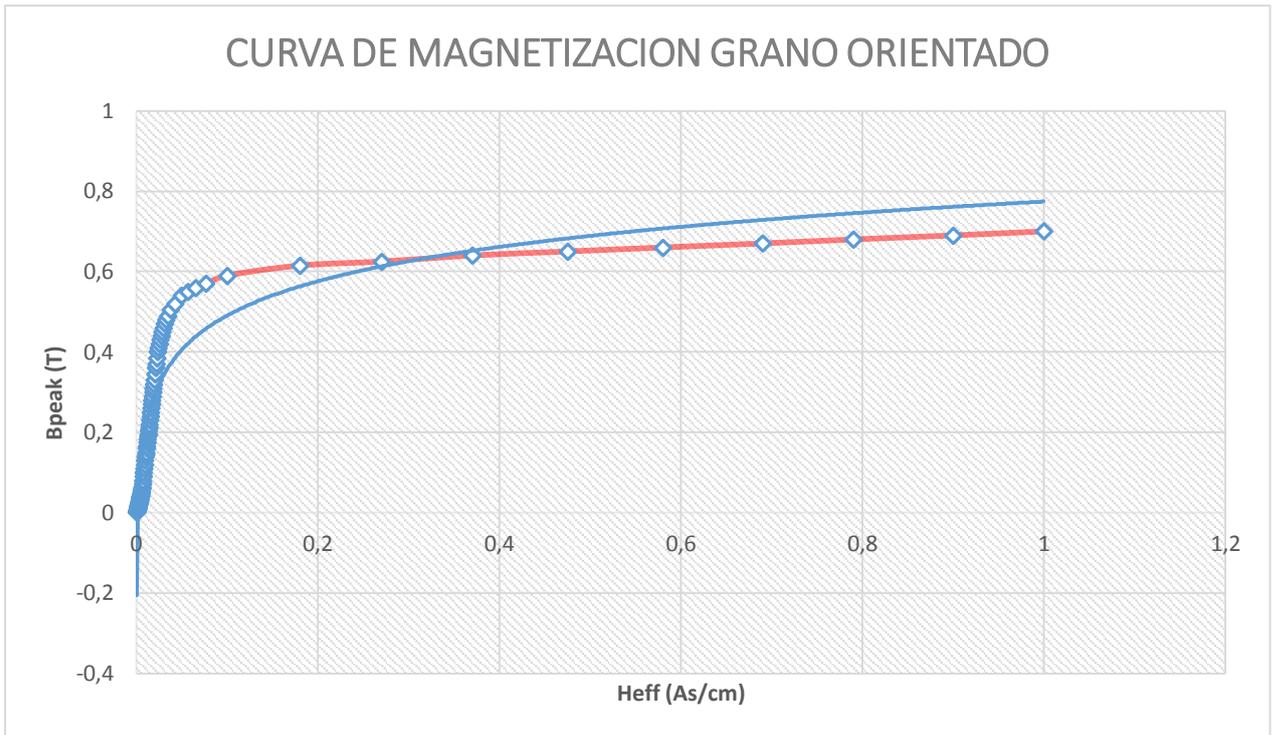


Anexo 2. Datos núcleo Grano Orientado

Heff [As/cm]	Bpeak [T] mum	Angle [°] mum	Hreactive [As/cm] mum	Hactive [As/cm] mum	Permeabilidad relativa
0,00035	0,0017	83,6	0,0003478	3,9E-05	27331,03103
0,00046	0,0024	83,3	0,0004569	5,37E-05	29358,14074
0,00058	0,003	83	0,0005757	7,07E-05	29105,05332
0,00072	0,0039	82,2	0,0007133	9,77E-05	30479,45862
0,00086	0,0046	81,5	0,0008506	0,000127	30097,78383
0,001	0,0051	81	0,0009877	0,000156	28697,58258
0,00105	0,0055	80,8	0,0010365	0,000168	29474,6413
0,0011	0,006	80,6	0,0010852	0,00018	30692,60169
0,00125	0,0069	80,15	0,0012316	0,000214	31060,91291
0,00135	0,0077	80	0,0013295	0,000234	32094,60942
0,0015	0,009	79,7	0,0014758	0,000268	33761,86186
0,0016	0,01	79,35	0,0015724	0,000296	35168,6061
0,0017	0,011	78,65	0,0016668	0,000335	36409,85102
0,0018	0,012	77,8	0,0017593	0,00038	37513,17984
0,0019	0,013	77,1	0,001852	0,000424	38500,36878
0,002	0,014	76,5	0,0019447	0,000467	39388,83883
0,0021	0,015	76,05	0,0020381	0,000506	40192,69269
0,00222	0,016	75,65	0,0021507	0,00055	40554,78902
0,00235	0,017	75,3	0,0022731	0,000596	40705,79089
0,00246	0,018	75	0,0023762	0,000637	41173,00226
0,00257	0,019	74,75	0,0024795	0,000676	41600,21889
0,00269	0,02	74,5	0,0025922	0,000719	41836,26004
0,00279	0,021	74,3	0,0026859	0,000755	42353,59014

0,0029	0,022	74,1	0,002789	0,000794	42687,41154
0,00298	0,023	73,9	0,0028631	0,000826	43429,68807
0,00307	0,024	73,7	0,0029466	0,000862	43989,39655
0,00316	0,025	73,5	0,0030299	0,000897	44517,22291
0,00325	0,0255	73,4	0,0031145	0,000928	44150,12704
0,0034	0,027	73,15	0,003254	0,000986	44684,81716
0,00347	0,028	72,95	0,0033175	0,001017	45405,00154
0,00354	0,029	72,75	0,0033808	0,00105	46096,70404
0,00366	0,03	72,55	0,0034916	0,001098	46122,7621
0,00378	0,031	72,35	0,0036021	0,001146	46147,16568
0,0039	0,032	72,2	0,0037133	0,001192	46170,0675
0,004	0,033	72	0,0038042	0,001236	46422,56005
0,0041	0,035	71,8	0,0038949	0,001281	48035,16931
0,00419	0,036	71,5	0,0039735	0,00133	48346,34156
0,00428	0,037	71,3	0,0040541	0,001372	48644,42713
0,00438	0,038	71,1	0,0041439	0,001419	48818,52171
0,00447	0,039	70,9	0,0042239	0,001463	49094,42999
0,00457	0,04	70,75	0,0043145	0,001507	49251,43961
0,00466	0,041	70,3	0,0043873	0,001571	49507,73734
0,00475	0,042	70	0,0044635	0,001625	49754,32273
0,00484	0,043	69,9	0,0045452	0,001663	49991,7376
0,00505	0,045	69,7	0,0047363	0,001752	50141,37899
0,0053	0,047	69,4	0,0049611	0,001865	49899,60715
0,0055	0,05	68,8	0,0051278	0,001989	51154,33615
0,0057	0,052	68,3	0,0052961	0,002108	51333,82504
0,0059	0,054	68	0,0054704	0,00221	51501,1452
0,0061	0,057	67,75	0,0056458	0,00231	52579,94879
0,0063	0,0605	66,6	0,0057819	0,002502	54036,84239
0,00655	0,064	65,5	0,0059602	0,002716	54981,14908
0,00695	0,071	64,1	0,0062519	0,003036	57484,22522
0,0074	0,08	61,8	0,0065216	0,003497	60832,18352
0,0078	0,09	59,4	0,0067138	0,003971	64926,65742
0,00825	0,1	57,2	0,0069347	0,004469	68205,78153
0,00865	0,11	55,1	0,0070943	0,004949	71556,93264
0,0091	0,12	53,1	0,0072771	0,005464	74201,89419
0,00955	0,13	51,3	0,0074531	0,005971	76597,59234
0,01	0,14	49,6	0,0076154	0,006481	78777,67766
0,0104	0,145	49,4	0,0078964	0,006768	78453,04438
0,0108	0,15	49,2	0,0081755	0,007057	78152,458
0,0113	0,16	47	0,0082643	0,007707	79674,01028
0,0117	0,165	46,5	0,0084869	0,008054	79354,80351
0,0121	0,175	45,5	0,0086303	0,008481	81381,89841
0,0125	0,182	45	0,0088388	0,008839	81928,78477
0,0129	0,19	44,2	0,0089934	0,009248	82877,95546
0,0133	0,195	43,9	0,0092222	0,009583	82500,79025
0,0137	0,205	43,6	0,0094478	0,009921	84199,29052
0,0142	0,212	43,1	0,0097025	0,010368	84008,38866
0,0146	0,22	42,6	0,0098824	0,010747	84790,06402
0,015	0,23	42,2	0,0100758	0,011112	86280,31363
0,0154	0,24	41,8	0,0102646	0,01148	87693,14768
0,0158	0,25	41,4	0,0104487	0,011852	89034,44582
0,0163	0,26	41,1	0,0107152	0,012283	89755,46097

0,0168	0,27	40,8	0,0109775	0,012718	90433,55854
0,0172	0,28	40,6	0,0111933	0,013059	91601,95077
0,0177	0,29	40,3	0,0114482	0,013499	92193,40808
0,0182	0,3	40,2	0,0117473	0,013901	92752,36774
0,0188	0,31	40	0,0120844	0,014402	92785,25865
0,0194	0,32	39,8	0,0124181	0,014905	92816,11507
0,02	0,33	39,7	0,0127754	0,015388	92845,1201
0,0206	0,345	39,55	0,0131171	0,015884	94238,20664
0,0214	0,36	39,4	0,0135832	0,016536	94659,42576
0,022	0,37	39,35	0,0139492	0,017012	94635,52187
0,0228	0,385	39,45	0,0144872	0,017606	95016,93578
0,0236	0,4	39,6	0,0150432	0,018184	95372,49112
0,0245	0,41	39,8	0,0156827	0,018823	94165,73715
0,0255	0,42	40	0,0163911	0,019534	92679,62078
0,0265	0,43	40,4	0,0171752	0,020181	91305,66414
0,0275	0,44	41	0,0180416	0,020755	90031,63162
0,0286	0,45	41,7	0,0190256	0,021354	88536,35102
0,03	0,46	41,8	0,019996	0,022364	86280,31363
0,0315	0,47	43,9	0,0218422	0,022697	83958,06917
0,033	0,48	45,2	0,0234158	0,023253	81846,93783
0,035	0,49	47	0,0255974	0,02387	78777,67766
0,038	0,505	49	0,028679	0,02493	74779,56244
0,043	0,52	53,6	0,0346104	0,025517	68047,16343
0,05	0,54	57,4	0,0421226	0,026939	60771,35134
0,057	0,55	60,8	0,0497566	0,027808	54295,39187
0,0655	0,56	63,6	0,0586691	0,029124	48108,50544
0,077	0,57	67,1	0,0709313	0,029963	41654,24515
0,1	0,59	72,2	0,0952129	0,03057	33199,16416
0,18	0,615	80	0,1772654	0,031257	19225,50467
0,27	0,625	83,3	0,2681561	0,031501	13025,40967
0,37	0,64	85	0,368592	0,032248	9733,149364
0,475	0,65	86,1	0,4739	0,032307	7700,073757
0,58	0,66	86,8	0,5790956	0,032376	6403,111731
0,69	0,67	87,3	0,689234	0,032503	5463,876194
0,79	0,68	87,6	0,789307	0,033082	4843,473853
0,9	0,69	87,9	0,8993956	0,032979	4314,015682
1	0,7	88,1	0,9994502	0,033155	3938,883883

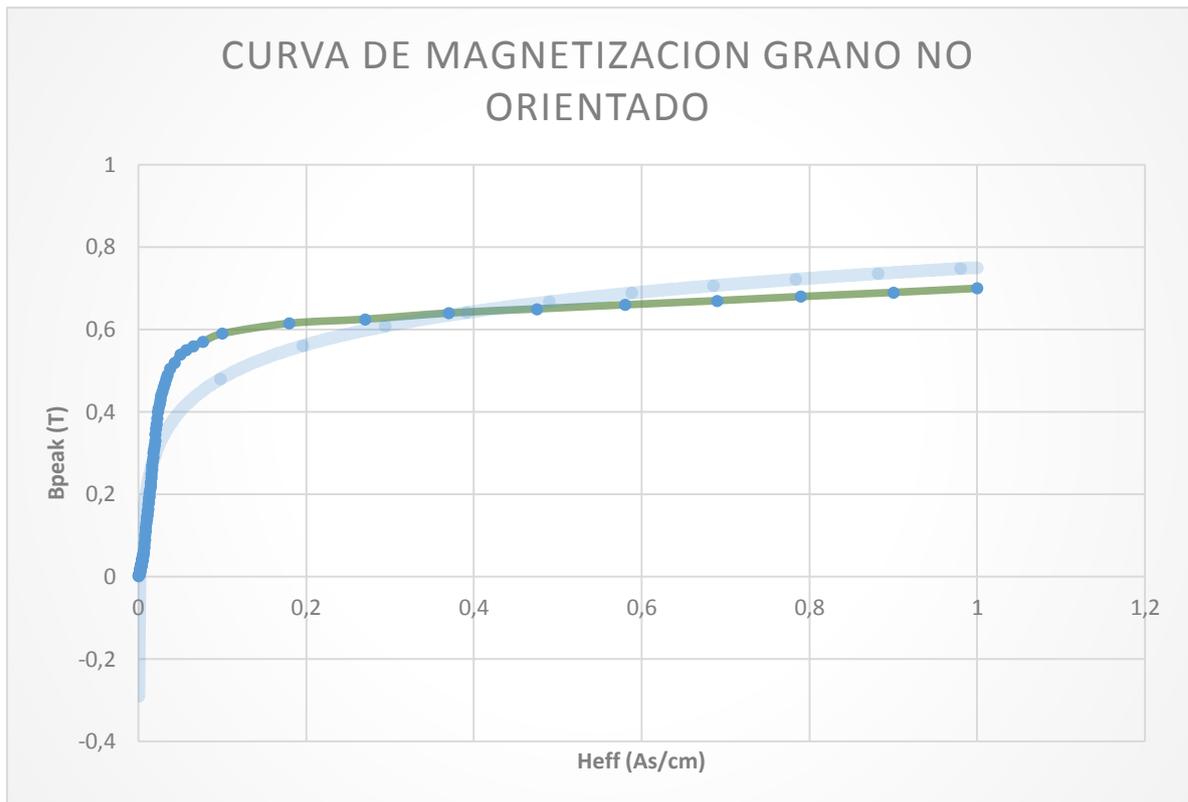


Anexo 3. Datos núcleo Grano no Orientado

Heff [As/cm]	Bpeak [T] mum	Angle [°] mum	Hreactive [As/cm] mum	Hactive [As/cm] mum	permeabilidad relativa
0,00013	0,0017	83,6	0,0001292	1,45E-05	73583,54507
0,00024	0,0024	83,3	0,0002384	2,8E-05	56269,76976
0,00036	0,003	83	0,0003573	4,39E-05	46891,4748
0,00072	0,0039	82,2	0,0007133	9,77E-05	30479,45862
0,00064	0,0046	81,5	0,000633	9,46E-05	40443,89701
0,00078	0,0051	81	0,0007704	0,000122	36791,77254
0,00083	0,0055	80,8	0,0008193	0,000133	37287,19683
0,00088	0,006	80,6	0,0008682	0,000144	38365,75211
0,00103	0,0069	80,15	0,0010148	0,000176	37695,28265
0,00113	0,0077	80	0,0011128	0,000196	38343,11745
0,00128	0,009	79,7	0,0012594	0,000229	39564,68186
0,00138	0,01	79,35	0,0013562	0,000255	40775,19548
0,00148	0,011	78,65	0,0014511	0,000291	41822,12617
0,00158	0,012	77,8	0,0015443	0,000334	42736,53399
0,00168	0,013	77,1	0,0016376	0,000375	43542,08374
0,00178	0,014	76,5	0,0017308	0,000416	44257,12228
0,00188	0,015	76,05	0,0018246	0,000453	44896,09289
0,002	0,016	75,65	0,0019376	0,000496	45015,81581
0,00213	0,017	75,3	0,0020603	0,000541	44910,14488
0,00224	0,018	75	0,0021637	0,00058	45216,77927
0,00235	0,019	74,75	0,0022673	0,000618	45494,70747
0,00247	0,02	74,5	0,0023802	0,00066	45562,56661

0,00257	0,021	74,3	0,0024741	0,000695	45979,1893
0,00268	0,022	74,1	0,0025775	0,000734	46191,60204
0,00276	0,023	73,9	0,0026518	0,000765	46891,4748
0,00285	0,024	73,7	0,0027354	0,0008	47385,06927
0,00294	0,025	73,5	0,0028189	0,000835	47848,44367
0,00303	0,0255	73,4	0,0029037	0,000866	47355,74683
0,00318	0,027	73,15	0,0030435	0,000922	47776,21961
0,00325	0,028	72,95	0,0031072	0,000953	48478,57087
0,00332	0,029	72,75	0,0031707	0,000985	49151,30491
0,00344	0,03	72,55	0,0032817	0,001032	49072,47363
0,00356	0,031	72,35	0,0033924	0,001079	48998,95681
0,00368	0,032	72,2	0,0035038	0,001125	48930,23457
0,00378	0,033	72	0,003595	0,001168	49124,40217
0,00388	0,035	71,8	0,0036859	0,001212	50758,81293
0,00397	0,036	71,5	0,0037648	0,00126	51025,48391
0,00406	0,037	71,3	0,0038457	0,001302	51280,33205
0,00416	0,038	71,1	0,0039357	0,001347	51400,27045
0,00425	0,039	70,9	0,004016	0,001391	51635,78872
0,00435	0,04	70,75	0,0041068	0,001434	51742,31702
0,00444	0,041	70,3	0,0041801	0,001497	51960,82343
0,00453	0,042	70	0,0042568	0,001549	52170,64746
0,00462	0,043	69,9	0,0043386	0,001588	52372,29653
0,00483	0,045	69,7	0,00453	0,001676	52425,25133
0,00508	0,047	69,4	0,0047552	0,001787	52060,61375
0,00528	0,05	68,8	0,0049227	0,001909	53285,76682
0,00548	0,052	68,3	0,0050916	0,002026	53394,67203
0,00568	0,054	68	0,0052664	0,002128	53495,90787
0,00588	0,057	67,75	0,0054422	0,002226	54547,22579
0,00608	0,0605	66,6	0,0055799	0,002415	55992,12287
0,00633	0,064	65,5	0,0057601	0,002625	56892,0263
0,00673	0,071	64,1	0,006054	0,00294	59363,35294
0,00718	0,08	61,8	0,0063278	0,003393	62696,1223
0,00758	0,09	59,4	0,0065244	0,003859	66811,07227
0,00803	0,1	57,2	0,0067497	0,00435	70074,43308
0,00843	0,11	55,1	0,0069139	0,004823	73424,37335
0,00888	0,12	53,1	0,0071012	0,005332	76040,22941
0,00933	0,13	51,3	0,0072814	0,005834	78403,75208
0,00978	0,14	49,6	0,0074478	0,006339	80549,77266
0,01018	0,145	49,4	0,0077294	0,006625	80148,49327
0,01058	0,15	49,2	0,008009	0,006913	79777,55637
0,01108	0,16	47	0,0081034	0,007557	81255,98521
0,01148	0,165	46,5	0,0083273	0,007902	80875,54016
0,01188	0,175	45,5	0,0084734	0,008327	82888,97061
0,01228	0,182	45	0,0086833	0,008683	83396,5643
0,01268	0,19	44,2	0,0088401	0,00909	84315,90106
0,01308	0,195	43,9	0,0090697	0,009425	83888,41822
0,01348	0,205	43,6	0,0092961	0,009762	85573,46291
0,01398	0,212	43,1	0,0095522	0,010208	85330,40908
0,01438	0,22	42,6	0,0097335	0,010585	86087,26945
0,01478	0,23	42,2	0,009928	0,010949	87564,59435
0,01518	0,24	41,8	0,010118	0,011316	88964,06286
0,01558	0,25	41,4	0,0103032	0,011687	90291,67163

0,01608	0,26	41,1	0,0105706	0,012117	90983,45857
0,01658	0,27	40,8	0,0108337	0,012551	91633,52132
0,01698	0,28	40,6	0,0110501	0,012892	92788,78406
0,01748	0,29	40,3	0,0113059	0,013331	93353,73702
0,01798	0,3	40,2	0,0116053	0,013733	93887,26879
0,01858	0,31	40	0,011943	0,014233	93883,90003
0,01918	0,32	39,8	0,0122773	0,014736	93880,74204
0,01978	0,33	39,7	0,0126348	0,015219	93877,77564
0,02038	0,345	39,55	0,012977	0,015714	95255,49837
0,02118	0,36	39,4	0,0134436	0,016366	95642,66815
0,02178	0,37	39,35	0,0138097	0,016842	95591,43623
0,02258	0,385	39,45	0,0143474	0,017436	95942,69866
0,02338	0,4	39,6	0,014903	0,018015	96269,9226
0,02428	0,41	39,8	0,0155419	0,018654	95018,9687
0,02528	0,42	40	0,0162497	0,019366	93486,16811
0,02628	0,43	40,4	0,0170326	0,020013	92070,01901
0,02728	0,44	41	0,0178973	0,020588	90757,69316
0,0286	0,45	41,7	0,0190256	0,021354	88536,35102
0,03	0,46	41,8	0,019996	0,022364	86280,31363
0,0315	0,47	43,9	0,0218422	0,022697	83958,06917
0,033	0,48	45,2	0,0234158	0,023253	81846,93783
0,035	0,49	47	0,0255974	0,02387	78777,67766
0,038	0,505	49	0,028679	0,02493	74779,56244
0,043	0,52	53,6	0,0346104	0,025517	68047,16343
0,05	0,54	57,4	0,0421226	0,026939	60771,35134
0,057	0,55	60,8	0,0497566	0,027808	54295,39187
0,0655	0,56	63,6	0,0586691	0,029124	48108,50544
0,077	0,57	67,1	0,0709313	0,029963	41654,24515
0,1	0,59	72,2	0,0952129	0,03057	33199,16416
0,18	0,615	80	0,1772654	0,031257	19225,50467
0,27	0,625	83,3	0,2681561	0,031501	13025,40967
0,37	0,64	85	0,368592	0,032248	9733,149364
0,475	0,65	86,1	0,4739	0,032307	7700,073757
0,58	0,66	86,8	0,5790956	0,032376	6403,111731
0,69	0,67	87,3	0,689234	0,032503	5463,876194
0,79	0,68	87,6	0,789307	0,033082	4843,473853
0,9	0,69	87,9	0,8993956	0,032979	4314,015682
1	0,7	88,1	0,9994502	0,033155	3938,883883



Anexo 4. Cálculos en núcleo Nanoestructurado

Nanoestructurado Burden 25%				
Magnitud	Isec(prueba) 10% 0,1 A	Isec(prueba) 20% 0,2 A	Isec(prueba)100% 1A	Isec(prueba) 120% 1,2 A
ZC [Ω]	250	62,5	2,5	1,73
RC [Ω]	200	50	2	13,84
XC [Ω]	150	37,5	1,5	1,038
RT [Ω]	200,43	50,43	2,43	1,814
ZT [Ω]	250,34	62,84	2,855	2,089
θ [ADIMENSIONAL]	0,642	0,6343	0,553	0,5197
SENθ [ADIMENSIONAL]	0,599	0,5967	0,5253	0,4968
COSθ [ADIMENSIONAL]	0,8	0,8025	0,8511	0,8683
VOLIND [v]	25,034	12,568	2,86	2,5
B [GAUSS]	718,26	360,59	81,91	71,42
EXITACION [A/cm]	0,14	0,14	0,14	0,14
PERDIDAS [W/Kg]	2,50E-03	2,50E-03	2,50E-03	2,50E-03
IM [A]	2,29E-04	4,57E-04	2,02E-03	2,29E-03
IW [A]	1,85E-04	3,70E-04	1,63E-03	1,85E-03
β [RADIANES]	0,63	0,62	0,62	0,63

Nanoestructurado Burden 100%				
Magnitud	Isec(prueba) 10% 0,1 A	Isec(prueba) 20% 0,2 A	Isec(prueba) 100% 1 A	Isec(prueba) 120% 1,2 A
ZC [Ω]	1000	250	10	6,94
RC [Ω]	800	200	8	5,35
XC [Ω]	600	150	6	4,164
RT [Ω]	800,43	200,43	8,43	5,98
ZT [Ω]	1000,34	250,34	10,34	7,286
θ [ADIMENSIONAL]	0,6432	0,64	0,6185	0,6082
SEN θ [ADIMENSIONAL]	0,5997	0,5991	0,5802	0,5715
COS θ [ADIMENSIONAL]	0,8001	0,8006	0,8152	0,821
VOLIND [v]	100,034	50,068	10,34	8,7432
B [GAUSS]	2870,15	1436,53	296,67	250,85
EXITACION [A/cm]	0,14	0,14	0,14	0,14
PERDIDAS [W/Kg]	2,50E-03	2,50E-03	2,50E-03	2,50E-03
IM [A]	5,74E-05	1,14E-04	5,55E-04	6,56E-04
IW [A]	4,64E-05	9,28E-05	4,49E-04	5,31E-04
β [RADIANES]	0,62	0,62	0,62	0,62

ERROR	
Is (calculado) [A]	0,9929
γ [radianes]	0,619
error de relación [%]	0,71%
error de fase [minutos]	1,718

Anexo 5. Cálculos en núcleo Grano Orientado

Grano orientado Burden 25%				
Magnitud	Isec(prueba) 10% 0,1 A	Isec(prueba) 20% 0,2 A	Isec(prueba)100% 1A	Isec(prueba) 120% 1,2 A
ZC [Ω]	250	62,5	2,5	1,73
RC [Ω]	200	50	2	13,84
XC [Ω]	150	37,5	1,5	1,038
RT [Ω]	200,43	50,43	2,43	1,814
ZT [Ω]	250,34	62,84	2,855	2,089
θ [ADIMENSIONAL]	0,642	0,6343	0,553	0,5197
SEN θ [ADIMENSIONAL]	0,599	0,5967	0,5253	0,4968
COS θ [ADIMENSIONAL]	0,8	0,8025	0,8511	0,8683
VOLIND [v]	25,034	12,568	2,86	2,5

B [GAUSS]	1750,78	878,39	199,66	175,316
EXITACION [A/cm]	0,19	0,19	0,19	0,19
PERDIDAS [W/Kg]	0,018	0,018	0,018	0,018
IM [A]	3,11E-04	6,20E-04	2,73E-03	3,10E-03
IW [A]	2,68E-05	5,35E-05	2,35E-04	2,68E-04
β [RADIANES]	1,24	1,247	1,248	1,247

Grano orientado Burden 100%				
Magnitud	Isec(prueba) 10% 0,1 A	Isec(prueba) 20% 0,2 A	Isec(prueba) 100% 1 A	Isec(prueba) 120% 1,2 A
ZC [Ω]	1000	250	10	6,94
RC [Ω]	800	200	8	5,35
XC [Ω]	600	150	6	4,164
RT [Ω]	800,43	200,43	8,43	5,98
ZT [Ω]	1000,34	250,34	10,34	7,286
θ [ADIMENSIONAL]	0,6432	0,64	0,6185	0,6082
SENθ [ADIMENSIONAL]	0,5997	0,5991	0,5802	0,5715
COSθ [ADIMENSIONAL]	0,8001	0,8006	0,8152	0,821
VOLIND [v]	100,034	50,068	10,34	8,7432
B [GAUSS]	6995,99	3501,56	723,13	611,96
EXITACION [A/cm]	0,19	0,19	0,19	0,19
PERDIDAS [W/Kg]	0,018	0,018	0,018	0,018
IM [A]	7,79E-05	1,55E-04	7,53E-04	8,91E-04
IW [A]	6,72E-06	1,34E-05	6,50E-05	7,69E-05
β [RADIANES]	1,247	1,247	1,247	1,247

ERROR	
Is (calculado) [A]	0,87
γ [radianes]	0,687
error de relacion [%]	13,00%
error de fase [minutos]	234,79

Anexo 6. Cálculos núcleo Grano no Orientado

Grano no orientado Burden 25%				
Magnitud	Isec(prueba) 10% 0,1 A	Isec(prueba) 20% 0,2 A	Isec(prueba)100% 1A	Isec(prueba) 120% 1,2 A
ZC [Ω]	250	62,5	2,5	1,73
RC [Ω]	200	50	2	13,84
XC [Ω]	150	37,5	1,5	1,038
RT [Ω]	200,43	50,43	2,43	1,814

ZT [Ω]	250,34	62,84	2,855	2,089
Θ [ADIMENSIONAL]	0,642	0,6343	0,553	0,5197
SEN Θ [ADIMENSIONAL]	0,599	0,5967	0,5253	0,4968
COS Θ [ADIMENSIONAL]	0,8	0,8025	0,8511	0,8683
VOLIND [v]	25,034	12,568	2,86	2,5
B [GAUSS]	2546,59	1278,48	289,91	255,004
EXITACION [A/cm]	0,25	0,25	0,25	0,25
PERDIDAS [W/Kg]	0,02	0,02	0,02	0,02
IM [A]	4,04E-04	8,16E-04	3,54E-03	4,04E-03
IW [A]	2,98E-05	5,94E-05	2,62E-04	2,98E-04
β [RADIANES]	1,299	1,294	1,298	1,299

Grano no orientado Burden 100%				
Magnitud	Isec(prueba) 10% 0,1 A	Isec(prueba) 20% 0,2 A	Isec(prueba) 100% 1 A	Isec(prueba) 120% 1,2 A
ZC [Ω]	1000	250	10	6,94
RC [Ω]	800	200	8	5,35
XC [Ω]	600	150	6	4,164
RT [Ω]	800,43	200,43	8,43	5,98
ZT [Ω]	1000,34	250,34	10,34	7,286
Θ [ADIMENSIONAL]	0,6432	0,64	0,6185	0,6082
SEN Θ [ADIMENSIONAL]	0,5997	0,5991	0,5802	0,5715
COS Θ [ADIMENSIONAL]	0,8001	0,8006	0,8152	0,821
VOLIND [v]	100,034	50,068	10,34	8,7432
B [GAUSS]	10175,98	5093,18	1051,83	889,4
EXITACION [A/cm]	0,25	0,25	0,25	0,25
PERDIDAS [W/Kg]	0,02	0,02	0,02	0,02
IM [A]	1,03E-04	2,04E-04	4,91E-04	1,17E-03
IW [A]	7,47E-06	1,49E-05	7,23E-05	8,55E-05
β [RADIANES]	0,165	1,298	1,307	0,14

ERROR	
Is (calculado) [A]	0,833
γ [radianes]	0,719
error de relacion [%]	16,70%
error de fase [minutos]	379,87

Anexo 7. Corriente de magnetización

PRUEBA DE MEDICION DE CORRIENTE DE MAGNETIZACION			
	NANO ESTRUCTURADO	GRANO ORIENTADO	GRANO NO ORIENTADO
VOLTAJE APLICADO (V)	CORRIENTE DE MAGNETIZACION (mA)	CORRIENTE DE MAGNETIZACION (mA)	CORRIENTE DE MAGNETIZACION (mA)
2	0,38	0,64	22,96
3	0,61	1,02	36,86
4	0,78	1,31	47,13
5	0,98	1,65	59,21
6	1,15	1,93	69,48
7	1,37	2,30	82,78
8	1,6	2,69	96,67
9	1,82	3,06	109,96
10	1,98	3,28	117,82
11	2,18	3,66	131,72
12	2,43	4,08	146,82
13	2,6	4,37	157,09
14	2,76	4,64	166,76
15	3,09	5,19	186,70
16	3,22	5,41	194,55
17	3,48	5,85	210,26

Anexo 8. Medición de corriente circulante para 20 A

Numero de mediciones	TC Clase 0,5 de contratación (A)	TC grano no orientado (A)	TC grano orientado (A)	TC nano estructurado (A)
1	0,1982	0,1490	0,1721	0,1996
2	0,1987	0,1492	0,1721	0,1996
3	0,1990	0,1494	0,1721	0,1996
4	0,1990	0,1494	0,1722	0,1996
5	0,1991	0,1494	0,1720	0,1996
6	0,1989	0,1494	0,1720	0,1996
7	0,1989	0,1493	0,1721	0,1995
8	0,1990	0,1491	0,1721	0,1995

9	0,1990	0,1494	0,1720	0,1997
10	0,1990	0,1495	0,1721	0,1996

Anexo 9. Medición de corriente circulante para 40 A

Numero de mediciones	TC Clase 0,5 de contratación (A)	TC grano no orientado (A)	TC grano orientado (A)	TC nano estructurado (A)
1	0,3982	0,2988	0,3443	0,3992
2	0,3980	0,2988	0,3443	0,3992
3	0,3981	0,2989	0,3441	0,3993
4	0,3980	0,2989	0,3441	0,3993
5	0,3981	0,2987	0,3441	0,3993
6	0,3980	0,2987	0,3440	0,3993
7	0,3980	0,2988	0,3442	0,3991
8	0,3982	0,2988	0,3442	0,3992
9	0,3982	0,2988	0,3441	0,3992
10	0,3980	0,2988	0,3441	0,3992

Anexo 10. Medición de corriente circulante para 60 A

Numero de mediciones	TC Clase 0,5 de contratación (A)	TC grano no orientado (A)	TC grano orientado (A)	TC nano estructurado (A)
1	0,5970	0,4484	0,5164	0,5988
2	0,5972	0,4484	0,5164	0,5987
3	0,5972	0,4483	0,5162	0,5988
4	0,5970	0,4483	0,5163	0,5988
5	0,5970	0,4483	0,5163	0,5988
6	0,5971	0,4483	0,5163	0,5986
7	0,5974	0,4483	0,5163	0,5988
8	0,5972	0,4481	0,5160	0,5986
9	0,5970	0,4484	0,5163	0,5987
10	0,5970	0,4484	0,5163	0,5989

Anexo 11. Medición de corriente circulante para 80 A.

Numero de mediciones	TC Clase 0,5 de contratación (A)	TC grano no orientado (A)	TC grano orientado (A)	TC nano estructurado (A)
1	0,7961	0,5977	0,6882	0,7985
2	0,7960	0,5978	0,6882	0,7985
3	0,7960	0,5978	0,6884	0,7984
4	0,7960	0,5978	0,6883	0,7984
5	0,7960	0,5978	0,6883	0,7984
6	0,7962	0,5976	0,6883	0,7985
7	0,7962	0,5975	0,6884	0,7985
8	0,7960	0,5975	0,6884	0,7984
9	0,7961	0,5975	0,6884	0,7984
10	0,7960	0,5978	0,6884	0,7984

Anexo 12. Medición de corriente circulante para 100 A

Numero de mediciones	TC Clase 0,5 de contratación (A)	TC grano no orientado (A)	TC grano orientado (A)	TC nano estructurado (A)
1	0,9950	0,7473	0,8605	0,9980
2	0,9956	0,7472	0,8606	0,9980
3	0,9950	0,7472	0,8604	0,9982
4	0,9952	0,7473	0,8605	0,9986
5	0,9960	0,7471	0,8603	0,9980
6	0,9958	0,7471	0,8603	0,9984
7	0,9950	0,7472	0,8603	0,9982
8	0,9950	0,7472	0,8603	0,9980
9	0,9948	0,7475	0,8602	0,9980
10	0,9950	0,7472	0,8603	0,9981