

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-29

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE MEDIA TENSIÓN

Humberto Alonso Rico

Ingeniería Electromecánica

Asesor:

Santiago Gómez Arango

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2019

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

RESUMEN

Este trabajo describe el diseño y construcción de transformador-elevador de tensión AC, con un valor máximo esperado de salida según diseño de 16 kV (MT). Para la fabricación del equipo se utiliza un núcleo de chapas con forma de E-I con una capacidad máxima de 600 W, conductor de cobre esmaltado (cable magneto), papel presspan y espuma de poliuretano rígido como material de aislamiento eléctrico. Adicionalmente, se presentan los cálculos requeridos para la selección del conductor, el número de espiras, las curvas de tensión en vacío y las características finales de construcción.

Finalmente, El prototipo sirve como fuente de tensión AC para la realización de pruebas de impulso y para la realización de ensayos no destructivos a máquinas eléctricas y componentes de redes de media tensión.

Palabras clave: Media tensión, Transformador, Fuente, Impulso de tensión, Devanado, Potencia, Curvas de magnetización.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

RECONOCIMIENTOS

Al profesor Santiago Gómez Arango por el apoyo brindado durante mi proceso formativo y aún más por su dedicación y orientación durante el desarrollo del presente trabajo, muchas gracias por todas sus enseñanzas personales y profesionales.

Al ITM como institución por la calidad en la educación brindada, a sus profesores por sus valiosas enseñanzas que de una u otra manera fueron útiles para la culminación del proyecto.

A los encargados de los laboratorios de la institución, especialmente el de máquinas eléctricas por todo el apoyo brindado con los equipos requeridos para la realización de las pruebas al prototipo.

A mi familia por la paciencia, su apoyo incondicional durante el proceso de finalización del proyecto

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

ACRÓNIMOS

kV: Kilovoltio

MT: Media Tensión

AT: Alta tensión

RDEEyAT: Semillero en Redes de distribución de Energía eléctrica y Alta Tensión

ESP: espiras

E-I: forma geométrica en la cual viene dispuestas las láminas que conforman el núcleo ferromagnético.

RETIE: Reglamento Técnico Instalaciones Eléctricas

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	9
3. METODOLOGÍA	13
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	30
REFERENCIAS	31

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

1. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de media tensión son equipos importantes para el desarrollo de prototipos e investigaciones relacionados con generadores de impulsos, convertidores AC/DC y pruebas de aislamiento de equipos eléctricos de BT y MT (RETIE 2013). Ante las ventajas que ofrece tener uno de estos equipos en un laboratorio se motivó la construcción de una, específicamente, Él de un transformador elevador hasta 16 kV en diseño y 12kV por construcción, con el fin de obtener valores de tensión superiores a los 7,8 kV AC que se tenían disponibles (Higuita and Naranjo 2017).

El transformador está construido con materiales asequibles con fin de ofrecer una solución los costos de fabricación y facilitar las posibles reparaciones y/o mantenimiento requeridos durante su funcionamiento futuro, lo cual brinda una excelente relación pesos/voltio comparado con equipos existentes en el mercado debido al costo comercial que tienen estos (Rymel 2019). Igualmente, el prototipo permite obtener niveles de tensión no comerciales y variables, característica fundamental para la integración de otros prototipos desarrollados en la institución con anterioridad como lo fueron la sonda de medida para media tensión AC (Zapata Martínez, E., & Gutiérrez Duque 2017), el Sphere Gap (Cardona 2019), transformador devanado en aluminio (Montoya 2018). Brindando oportunidades para futuras investigaciones y aprendizajes en el campo de MT.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

Objetivos

Objetivo principal.

Diseño y construcción de transformador monofásico de media tensión (MT) devanado en cobre.

Objetivos específicos.

- Identificar una metodología para el diseño de transformadores monofásicos.
- Construir un transformador monofásico de media tensión.
- Validar resultados mediante pruebas de laboratorio.

Para el caso particular del presente trabajo, se encuentra desarrollado en 5 numerales.

En el numeral 1, se desarrolla la introducción, en ella se expone el problema a resolver, se definen los objetivos que se esperan cumplir durante el proceso y se enuncian los antecedentes que generaron la necesidad del presente proyecto.

En el numeral 2 se especifican los principios teóricos del funcionamiento de un transformador monofásico en particular de MT, se identifican las partes que lo componen, clasificación y se realiza una reseña de los conceptos básicos requeridos para la comprensión del mismo; adicional a ello se anexa la definición de algunos términos desconocidos necesarios para el entendimiento del presente trabajo.

En el numeral 3 se desarrolla la metodología seleccionada para el diseño y fabricación del transformador requerido, se especifican las fórmulas utilizadas, se observa los cálculos obtenidos y se describe el proceso de fabricación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

En el numeral 4 se presentan el transformador obtenido, las curvas obtenidas de las pruebas y los resultados obtenidos durante el desarrollo de este.

En el numeral 5 se exponen las conclusiones obtenidas durante el proyecto, se realiza las recomendaciones pertinentes para el desarrollo de nuevos trabajos que tengan un alcance distinto o puedan tener relación con el ya mencionado.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

2. MARCO TEÓRICO

ESTADO DEL ARTE

Un transformador es un dispositivo eléctrico estático, que transfiere energía eléctrica de un circuito a otro con características distintas, bien sea de tensión, intensidad, etc.

Mediante el principio de inducción electromagnética (Salazar 2010). Según (Camejo F. 2017) este es uno de los aparatos eléctricos más eficientes. Está compuesto esencialmente por dos devanados, aislados el uno del otro, con un núcleo en común usualmente hecho de acero con excelentes propiedades magnéticas.

Los transformadores de MT forman parte importante de las fuentes de MT ya que la salida máxima de voltaje depende principalmente de la capacidad del transformador de generarla, en (Amalfa 2007) se presentan diferentes tipologías que puede tener estos equipos para alcanzar los valores requeridos.

Las fuentes más usadas tradicionalmente para descargas eléctricas de alta tensión, están constituidas comúnmente por transformadores elevadores de gran tamaño y peso, debido a esto la mayoría de fuentes tienden a no ser portátiles y además demandan un especial cuidado y una máxima precaución al momento de la manipulación (Alvarez, Molina, and Sarmiento 2006).

En (Aristondo, Carnelli, and Varela 2017) se diseñó y construyó una fuente de media tensión con una salida de voltaje máxima de 50 kV, la cual posee su circuito de medida mediante un divisor de tensión resistivo y presenta que la fuente en mención es útil para la realización de ensayos de tensión aplicada, sin embargo, por el tamaño del transformador esta no es portátil.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

En (Pinto-Salamanca and Castro-Galeano 2017) se presenta el diseño y montaje de un sistema de pruebas a voltaje sostenido a equipo utilizados en trabajos de línea viva hasta 15kV, sistema que tiene como fuente de alimentación un transformador elevador de media tensión.

Según (Pérez 2001) los transformadores diseñados para aplicaciones como reguladores de tensión, para pruebas eléctricas, fuentes de corriente directa están en una clasificación que se denominan especiales. Así mismo (Aristondo, Carnelli, and Varela 2017) presenta una descripción particular de las características generales que poseen los transformadores utilizados en las fuentes de media tensión, los cuales tienen potencia considerablemente inferior y con relaciones de transformación especiales en comparación de los transformadores de potencia, cuando se habla de especiales, se consideran relaciones no normalizadas.

La construcción de estos transformadores denominados especiales, no están generalizados ya que la mayoría de los casos se utilizan equipos utilizados en los sistemas de distribución eléctrica. En (Camejo F. 2017) se describe la metodología para el diseño de transformadores de media tensión de distribución, el cual presenta una potencia de 13 kVA y una tensión máxima de 5 kV, dicho equipo podría ser utilizado como una fuente de alimentación de media tensión.

En (Rojas 1976) se desarrolla el cálculo y diseño de un transformador de distribución de 25 kVA, 13,2 kV de tensión de línea de funcionamiento, se especifican todos los parámetros que se deben calcular y las variables críticas que deben respetarse durante el proceso de construcción de un transformador monofásico.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

Los transformadores especiales son mostrados en (Amalfa 2007) donde hace un adaptación del diseño de transformadores de distribución y lo generaliza para transformadores denominados especiales.

En (Gómez 2013) se presentó el diseño y construcción de un generador de impulsos portátil de alta tensión hasta 12kV (20kVmax) donde se analizan varios métodos para la obtención de MT en DC, en el cual se observa las ventajas que posee un transformador de MT como fuente (por ser DC se adiciono un rectificador de tensión).

En (Higuita and Naranjo 2017) se desarrolla la construcción de una fuente de media tensión AC/DC con salida máxima de 7,5 y 9,3 kV respectivamente. La etapa de elevación se realiza mediante un transformador de MT, motivo por el cual no se pudo obtener mayores tensiones de salida dada las restricciones del equipo disponible.

Finalmente en (Montoya 2018) se realiza un estudio comparativo de las características eléctricas de un transformador devanado en cobre y otro en aluminio donde se corrobora que si se realiza los bobinados con este material aumenta el volumen del transformador, dimensiones del núcleo , carcasa; por lo cual para un equipo más compacto lo ideal es utilizar cobre.

Definiciones.

Espuma de poliuretano rígido.

Material sintético y duroplástico, altamente reticulado y no fusible, que se obtiene de la mezcla de dos componentes generados mediante procesos químicos a partir del petróleo y el azúcar: el Isocianato y el Polioliol, la mezcla de los dos componentes que son líquidos a temperatura ambiente produce una reacción química exotérmica con la cual se obtiene la estructura sólida, uniforme y muy resistente (Delio Hector Antognoli 2019).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

Sphere Gap.

Es un arreglo entre dos electrodos esféricos de conductor eléctrico (comúnmente Aluminio) ubicados a una determinada distancia de aislante eléctrico (generalmente aire), donde los electrodos al ser sometidos a una tensión umbral generan el conocido esfuerzo dieléctrico(Cardona 2019).

Divisor de tensión.

Es una configuración de circuito que reparte la tensión de una fuente entre dos o más impedancias conectadas en serie (Velasco, Soler, and Botina 2018).

Generadores de Impulso.

Se definen como equipos necesarios para realizar ensayos a los sistemas de aislamiento eléctrico (Gómez 2013), evaluando su comportamiento frente a la recepción de transitorios con frente brusco, tanto de origen atmosférico, como de maniobra (Inducor Ingeniería 2019).

Relación de transformación.

Es la relación que se obtiene de dividir el número de espiras del devanado primario por el número de espiras del devanado secundario; esta relación proporciona el funcionamiento esperado del transformador y la tensión correspondiente en el secundario(SMC 2018).

Papel presspan.

Es un aislante que se fabrica con sulfato de celulosa 100% de alta pureza. La mezcla húmeda se presiona y se seca al mismo tiempo para obtener un resultado con una buena estabilidad dimensional y resistencia mecánica (Vimelec 2018).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

3. METODOLOGÍA

En la fabricación de un transformador monofásico de MT se deben obtener el número de espiras, el calibre del conductor, la potencia requerida para el diseño y posterior construcción de este que son similares para todos los transformadores en seco, teniendo en cuenta las normas técnicas para cada nivel de tensión (ICONTEC 2018). Aunque, los pasos requeridos tienen similitudes en su desarrollo matemático, la diversidad en las características específicas de cada equipo conlleva a que el diseñador se deba avocar a realizar un análisis preliminar del equipo requerido, con el fin de determinar cuál es el parámetro más determinante en el diseño del transformador.

La metodología generalizada parte de la potencia requerida para el transformador, con base a esta, se realiza el cálculo del calibre del conductor, números de espiras, corriente del bobinado. En el presente caso como la potencia no es factor determinante no se utiliza este criterio, al igual, la corriente del conductor tampoco representaba un dato crítico en el diseño porque no había que alcanzar un valor preestablecido, por este análisis se descartan esas formas de iniciar los cálculos (Wilder sullca bolivar 2014).

Para el caso particular de nuestro transformador se parte de las medidas del núcleo, a este parámetro se correlacionan los dos factores que después del análisis de las características técnicas se consideran relevantes para el diseño, las cuales son el nivel de tensión de salida y por consiguiente el calibre del conductor de los bobinados.

Con base a la metodología anterior se define como potencia preliminar de diseño 300 VA con base en las chapas a utilizar ref. E70_S (ver Figura 1), una tensión de entrada de 220 VAC, tensión de salida 16000 VAC, por consiguiente una relación de transformación 1:72,7. Esta relación se mantendrá si los devanados no superan la medida del ancho de ventana.

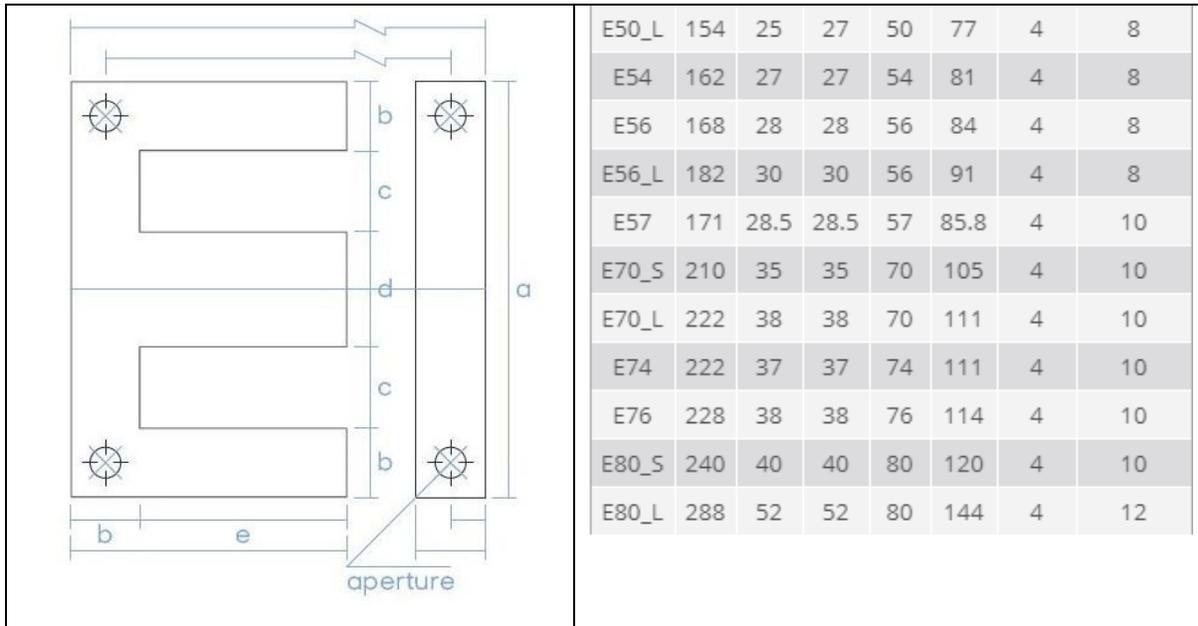


Figura 1. Dimensiones de las chapas magnéticas.(CENTERSKY 2019)

Cálculo del transformador.

Con las características técnicas preliminares definidos se inicia con la realización de los cálculos matemáticos para concluir el diseño del transformador monofásico de MT (Amalfa 2007).

A continuación, se procede a realizar el cálculo del número de espiras requerido para obtener las tensiones propuestas en el secundario, este valor se obtiene mediante la Ecuación (1).

$$V = \frac{4,44 * \Phi * f * S_N * N}{10^8} \quad (1)$$

V : Fuerza electro motriz que es medida en voltios

Φ : Nivel de inducción de las chapas

f : Frecuencia de la red.

N : Número de espiras.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

S: Sección del núcleo del transformador medida en cm^2

4,44: es una constante

10^8 : es una constante para que todas las variables estén en el sistema M.K.S.

Para el caso particular del transformador monofásico de MT la frecuencia a utilizar es de 60 Hz, la sección del núcleo a utilizar es de $37,5 cm^2$, el nivel de inducción de las chapas ferromagnéticas varía dependiendo de la calidad del material, esta viene dada en la ficha técnica del fabricante, en este caso al no tener este dato es aconsejable utilizar un valor de 10000 Gauss (slide share 2008).

Realizando los cálculos con la Ecuación (1) se obtiene la relación de $0,9883 ESP / V$, Con este valor se obtiene el número de espiras requeridas para los valores de tensión propuestos en el diseño, en este caso el resultados son 223 espiras en el primario y 16182 espiras en el secundario.

A continuación, se calcula el calibre del conductor, para este fin se utiliza la ley watt Ecuación 2,

$$S = V \times I \quad (2)$$

S: Potencia (VA)

V: Tensión (V)

I: Corriente (A)

Partiendo de los datos de diseño propuestos se realiza el cálculo de la corriente que circulara por el lado de baja y media tensión; en este particular son 1,36 A y 0,019 A respectivamente. Con los valores de corriente hallados; utilizamos la Ecuación (3) para determinar la sección de los alambres de cobre con los cuales se fabricará el transformador.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

$$S = I/D \quad (3)$$

S: sección transversal del conductor en mm²

I: corriente

D: densidad de corriente en A/mm²

Reemplazando en Ecuación (3) se obtienen que la sección requerida son 0.544 mm² en el primario y 0.0076 mm² para el secundario, con este dato se realiza la búsqueda del calibre del conductor en la tabla de la cual se extrae las características relevantes necesarios para la determinar la viabilidad del diseño propuesto (centelsa 2019).

Utilizando los datos de la tabla se hallan la cantidad de material requerido y se verifica que el tamaño de las bobinas no supere el espacio disponible en el núcleo, primero se determina la sección lateral del núcleo que deberá recubrir el conductor para lo cual se utiliza la Ecuación (4)

$$S_L = \#N \times D \quad (4)$$

S_L : Sección lateral que se recubrirá.

$\#N$: Número de espiras que conforman cada bobina

D : Diámetro del conductor en mm.

Aplicando la Ecuación (4) se obtiene que la sección lateral del primario es 17,3 cm y 229,78 cm para el lado del secundario, a continuación, se calcula el número de capas requeridas para la cantidad de lograr la cantidad de espiras de cada bobinado; Para ello utilizamos la Ecuación (5).

$$\#C = \frac{S_L}{h} \quad (5)$$

S_L : Sección lateral que se recubrirá.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

h : Altura de la ventana del núcleo.

$\#C$: Número de capas.

De lo anterior se obtiene que para el bobinado primario se requieren 2 capas y para el secundario 23. Para finalizar el diseño se debe garantizar que los bobinados puedan acomodarse en el ancho de ventana disponible en el núcleo, lo cual se verifica con la Ecuación (6) y se calcula el perímetro de la sección transversal del mismo para hallar la longitud del cable requerido para la construcción del núcleo (7).

$$A = \# \text{ capas} \times D \quad (6)$$

A: Ancho de bobina

Capas: Cantidad requerida para cada bobinado

D: Diámetro del conductor en mm.

El ancho de la bobina primario es de 1.7 mm y el secundario 3.3 mm.

$$P = L + L + L + L \quad (7)$$

P: Perímetro

L: Longitud de cada uno de los lados de la sección transversal del núcleo.

El perímetro del núcleo es de 24.6 cm y la longitud aproximada del conductor que se utilizara en cada bobinado es de 54.9 mt y 3980. 8 mt respectivamente.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

Con los cálculos de los incisos anteriores se realiza la consecución de los materiales requeridos para la fabricación tanto de los devanados como de la formaleta y se registra en la Tabla 1.

Tabla 1
Materiales del transformador.

Material	Cantidad
Alambre magneto 35 AWG	3980 m
Alambre magneto 22 AWG	55 m
Papel presspan	1 pliego
Espuma de poliuretano rígido	500 cm ³
Recipiente plástico #18	1
Cinta de vinilo	1 rollo
Soldadura de estaño	50 cm
Cartón paja	1 pliego
Chapas ferromagnéticas EI 70	176 chapas

Resumen materiales utilizados para fabricación de transformador. Elaboración propia.

Para la construcción del transformador se parte del núcleo reciclado, del cual se realiza la extracción de las chapas de material ferromagnético (ver Figura 2), partiendo de las medidas de este núcleo se procede a realizar la formaleta.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27



Figura 2. Formaleta para las bobinas. Elaboración propia.

Una vez fabricada la formaleta se adiciona una capa de papel presspan para realizar el aislamiento eléctrico entre los devanados y el núcleo. Se realizan ensayos sobre las formas para realizar el embobinado del alambre en la formaleta, debido a que el diámetro del conductor del lado de media tensión es pequeño y su resistencia a la tensión mecánica es baja, allí se evidencia que la opciones seleccionadas para realizar este proceso son embobinando el devanado BT de forma manual y el devanado de MT utilizando una máquina embobinadora Coil Winder-Meteor ME301 debido a que esta controla la tensión mecánica de halado de manera precisa evitando que se presente quiebres o cizalladuras. (Tomada de Ebay 2019).

Durante el proceso de embobinado, al terminar cada capa de la bobina se inserta una de papel presspan para darle al equipo un espacio adicional de aislamiento eléctrico entre cada una de estas, lo cual incide directamente en una disminución de la probabilidad de falla eléctrica por esta causa. En nuestro caso como es un transformador tipo acorazado la

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

bobina de baja tensión, queda en la parte interior y el de media tensión en el exterior del bobinado.

Con los bobinados terminados se aplica cinta de vinilo en las secciones laterales, frontal y posterior para darle una mayor consistencia y firmeza al embobinado; se adiciona mediante soldadura de estaño cable de cobre a los extremos de cada bobinado el cual será utilizado para la instalación de las terminales de conexión del equipo.



Figura 3. Bobinas del transformador finalizadas. Elaboración propia.

Finalizado el proceso de fabricación de las bobinas se procede a realizar el montaje de chapas del núcleo del transformador, estas se ubicaron individualmente de manera intercalada (una en forma de E sobre una en forma de I) con el fin de disminuir las pérdidas en el circuito magnético (Martín 2012), una vez finalizado esto se aseguran los extremos del núcleo con tornillos y se aplica una capas de barniz dieléctrico en las partes exteriores de las chapas para sellar posibles aberturas entre las chapas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27



Figura 4. Transformador finalizado (núcleo y bobinados). Elaboración propia

Validación.

Para la validación del transformador una vez finalizada la construcción del prototipo, y al no contar con el equipo requerido según los niveles de tensión de diseño para la realización de la prueba de aislamiento (Chauvin arnoux 2010), se procede a realizar las pruebas de tensión en vacío a tensión reducida para verificar que el equipo no presente falla en su circuito eléctrico y posteriormente verificar su funcionamiento con niveles de tensión más elevados.

Finalizada esta prueba preliminar, se realiza la prueba de funcionamiento en el laboratorio de máquinas eléctricas del ITM, para esto se requiere la utilización del banco de pruebas, equipos de medida y la sonda de medida de media tensión (Zapata Martínez, E., & Gutiérrez Duque 2017), y se debe realizar la conexión del transformador como se muestra en el esquema (ver Figura 5).

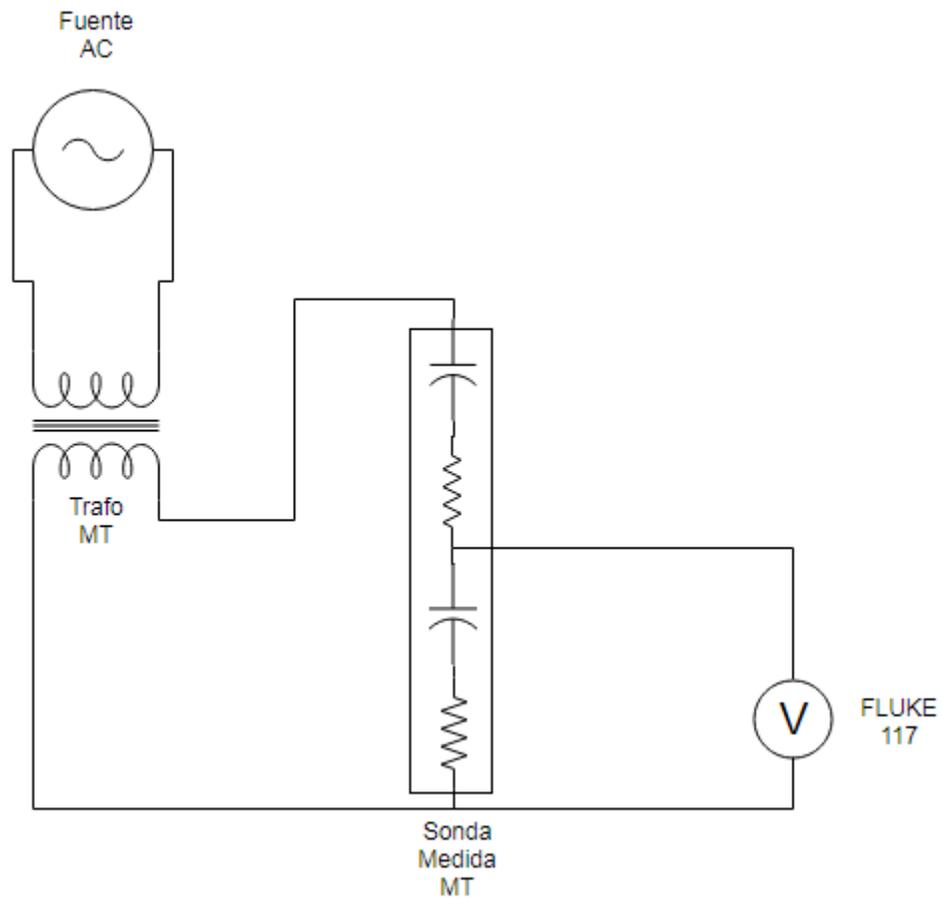


Figura 5. Esquema de conexión para realización de prueba. Elaboración propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El transformador obtenido después del proceso de construcción cumple con la relación de transformación teóricas propuestas inicialmente y el diseño tipo acorazado esperado, en la Figura 6 se observa el prototipo final.

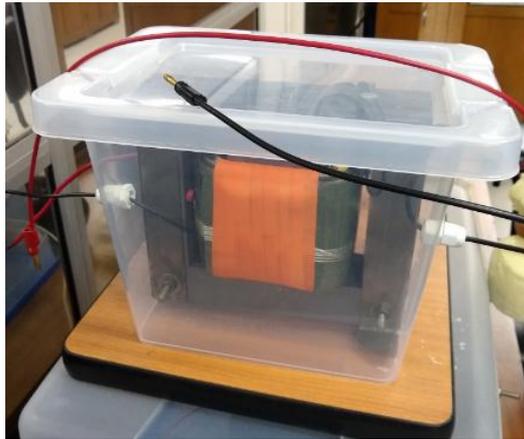


Figura 6. Prototipo final terminado. Elaboración propia

En la Tabla 2 se puede observar un resumen que presenta los resultados obtenidos durante los cálculos realizados en el numeral anterior.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

Tabla 2
Características técnicas

Parámetro	Valor
Potencia	300 VA
Voltaje primario	220 Vac
Voltaje secundario	16000 Vac
Relación de transformación	02:12,7
Sección del núcleo	37,5 cm ²
# Espiras primario	223
# Espiras del secundario	16182
Corriente primario	1,36 A
Corriente secundario	0,019 A
Calibre conductor primario	22 AWG
Calibre conductor secundario	35 AWG

Resumen parámetros obtenidos después de los cálculos del transformador. Elaboración propia

A continuación, se procede a verificar las características eléctricas finales de nuestro transformador con la realización de la prueba en vacío y la generación de la curva de magnetización del mismo, para esto se realizaron pruebas de funcionamiento las cuales se hacen en varias etapas.

En la primera etapa se energiza el transformador y se toman las medidas obtenidas con el fluke 117 tanto por el lado de BT como por el lado de MT y se registran los datos en la Tabla 3. Esta prueba está limitada por el valor máximo del equipo de medida, el cual no puede superar los 600 Vac.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

Tabla 3

Relación de transformación

Tensión lado BT (V)	Tensión lado MT (V)	Relación de transformación
1,018	74	72,495
2,158	156	72,289
3,022	226	74,785
4,100	300	73,049
5,100	374	73,333
5,950	433	72,773
7,040	512	72,727

Medición de tensión de salida y verificación de relación de transformación. Elaboración propia

La segunda se repite el procedimiento anterior, a la cual se le adiciona la Sonda de medida de media tensión (Zapata Martínez, E., & Gutiérrez Duque 2017) en paralelo con el Fluke 117 para obtener la relación de medida entre el lado de MT y la sonda, dato relevante ya que se requiere para obtener el valor de tensión en la salida cuando se supere el rango del multímetro digital (ver Tabla 4).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

Tabla 4

Relación de medida Sonda MT

BT	MT	Sonda	Relación MT-Sonda	Relación MT-BT
1,087	78,8	1,01	78,02	72,49
2,11	153	1,95	78,46	72,51
2,99	217	2,62	82,82	72,58
4,16	302,7	3,69	82,03	72,76
5,18	377,9	4,45	84,92	72,95
6,15	448	5,33	84,05	72,85
7,16	521	6,17	84,44	72,77
8	583	6,83	85,36	72,88

Calculo de la relación de medida de la sonda para hallar el valor de salida del transformador- elaboración propia.

La tercera prueba consiste en retirar el medidor digital Fluke 117 ya que se alcanzó su límite operacional y energizar el transformador solo con la sonda de medida de MT con el fin de verificar la salida máxima que se puede alcanzar con este (ver Tabla 5).

Tabla 5

Tensión de salida

Tensión lado de BT	Tensión lado MT (esperada)	Tensión lado de MT (medida)	Medida en Sonda
9,27	674,11	658,97	7,72
10,3	749,02	728,11	8,53
11,18	813,01	789,57	9,25
12,9	938,09	907,36	10,63
14,1	1025,35	986,75	11,56
16,98	1234,79	1165,15	13,65
18,08	1314,78	1246,24	14,6
21	1527,12	1455,37	17,05
28,87	2099,43	1992,27	23,34
35,92	2612,10	2469,43	28,93
48,83	3550,92	2940,61	34,45
50,18	3649,09	3445,08	40,36
59,12	4299,21	4040,88	47,34
66,3	4821,34	4547,06	53,27
74,2	5395,82	5084,82	59,57

Prueba tensión en vacío sin recubrimiento. Elaboración propia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

Durante las pruebas de tensión de salida se evidencia que se presentaba ionización del aire alrededor del transformador al alcanzar los 5 kV, por tal motivo era posible que se presentaran arcos por lo cual se decide fabricar un aislamiento con espuma de poliuretano rígido para eliminar esta anomalía y garantizar un mejor aislamiento eléctrico (ver Figura 7).



Figura 7. Transformador aislado espuma de poliuretano Rígido. Elaboración propia

Después de la aplicación de la espuma de poliuretano rígido, se deja en reposo para que termine el proceso de secado; se realiza nuevamente la prueba de vacío del transformador donde se registran las tensiones medidas con la sonda y la tensión que debe entregar el prototipo según la relación de transformación de diseño (ver Tabla 6).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

Tabla 6
Características finales de funcionamiento

Tensión lado de BT	Tensión lado MT (esperada)	Tensión lado de MT (medida)	Medida en Sonda
16,33	1187,5	1118,20	13,10
30,06	2186,0	658,97	24,07
40,2	2923,3	2722,94	31,90
50,2	3650,5	3396,42	39,79
60,05	4366,8	4059,66	47,56
70,4	5119,5	4801,43	56,25
80,1	5824,9	5424,55	63,55
90,1	6552,1	6077,54	71,20
100	7272,0	6743,34	79,00
110,5	8035,6	7460,35	87,40
120,8	8784,6	8151,76	95,50
130,6	9497,2	8834,63	103,50
140,8	10239,0	9500,42	111,30
150,4	10937,1	10149,15	118,90
160,3	11657,0	10825,19	126,82
170,5	12398,8	11484,16	134,54

Tensión máxima de salida del transformador con recubrimiento-elaboración propia

A continuación, se presenta con una gráfica de tendencia donde se observa el comportamiento lineal de la relación de transformación del equipo finalizado (ver Figura 8), la cual es de 72,7 por diseño. Así mismo, se puede observar la tensión máxima que arroja el equipo conectado con la sonda de medida de media tensión (11,4 kV); valor que no alcanza la tensión de diseño propuesta (16 kV).

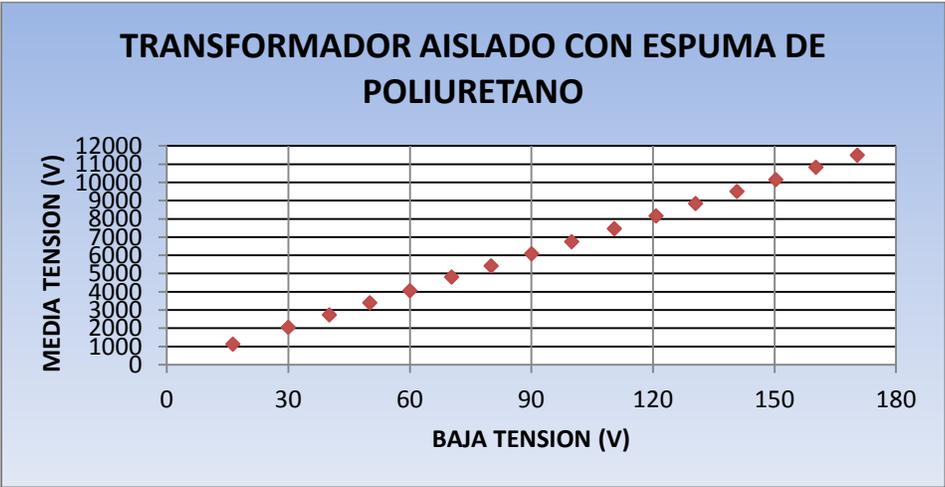


Figura 8. Curva de funcionamiento en vacío

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

El transformador obtenido cumple con la relación de transformación establecida en la etapa de diseño. Sin embargo, el nivel máximo de tensión de salida que se obtuvo fue del 75% del valor teórico propuesto.

Las características eléctricas propuestas de (potencia, relación de transformación, tensión y corriente), no se vieron afectadas por las limitaciones espaciales que se tenían por el ancho de ventana del núcleo utilizado para la fabricación del transformador.

Las medidas de tensión tomadas con la sonda de medición, muestran que la tensión promedio del transformador es del 93,09 % comparado con la tensión esperada de acuerdo al cálculo realizado en el diseño del prototipo, en este dato se debe tener en cuenta el porcentaje de error que tiene la sonda de medida.

Durante la realización de las pruebas se pudo observar que debido a los niveles de tensión que maneja el equipo puede presentar efecto corona relacionados con el diámetro del conductor del bobinado de MT por lo tanto es recomendable ampliar la discusión sobre técnicas para mejorar las propiedades dieléctricas de los materiales de construcción.

Para trabajos futuros se puede implementar un sistema de medida propio para el transformador por medio de un divisor de tensión y un acondicionador de señal para medida directa, así mismo se puede utilizar el equipo ya construido como fuente para el desarrollo de metodologías para la realización de pruebas estáticas a maquinas eléctricas, de voltaje sostenido a equipos y elementos empleados en operaciones de línea viva (pértigas, guantes).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

REFERENCIAS

- Alvarez, J.C., J.E. Molina, and R. Sarmiento. 2006. "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE DE DESCARGAS PULSADAS DE ALTO VOLTAJE PARA ESTUDIO ESPECTRAL DE GASES NOBLES IONIZADOS." *revista colombiana de fisica* 38: 834–38.
- Amalfa, Salvador. 2007. "Calculo Practico Simplificado de Transformadores." In *Transformadores: Fundamentos y Construccion*, , 191.
- Aristondo, Joseluis, Luis Carnelli, and Juan Andrés Varela. 2017. "Diseño y Construcción de Una Fuente de Media Tensión." universidad de la republica Uruguay.
<https://iie.fing.edu.uy/publicaciones/2017/ACV17/ACV17.pdf>.
- Camejo F., Hector A. 2017. "Metodo de Diseño Para Transformadores Monofásicos de Distribucion." Universidad Central de Caracas.
<http://190.169.30.62/bitstream/10872/19906/1/MÉTODO DE DISEÑO PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE DISTRIBUCIÓN.pdf>.
- Cardona, Alejandro Perez. 2019. *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN "SPHERE GAP" DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN*. <https://repositorio.itm.edu.co/jspui/handle/ITM/420>.
- centelsa. 2019. "Alambres Magneto." : 16. <http://www.centelsa.com.co/archivos/c3956452.pdf>.
- CENTERSKY. 2019. "El Core Lamination." *products*: 1. <https://www.ei-lamination.com/ei-core-lamination-2/>.
- Chauvin arnoux. 2010. "Guia de La Medicion de Aislamiento." : 28. https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/documents/cat_guia_de_medicion_de_aislamiento.pdf.
- Delio Hector Antognoli. 2019. "Espuma Rígida de Poliuretano." *manual de informacion tecnica*: 32. <https://dfpoliuretano.com.ar/wp-content/uploads/2018/10/Carpeta-de-presentación.pdf>.
- Gómez, Santiago Arango. 2013. "Diseño y Construcción de Un Generador de Impulsos de Alta Tensión, Portátil y Didáctico." <http://bdigital.unal.edu.co/50618/1/1053776042.2013.pdf>.
- Higuita, Carlos Alfonso Benítez, and Sebastián Charry Naranjo. 2017. *Diseño y Construccion de Fuente de Media Tension*. Medellin.
<https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/ITM/102/2/BenitezHiguitaCarlosAlfonso2017.pdf>.
- ICONTEC. 2018. *Norma Tecnica Colombiana NTC 380*. <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC380.pdf>.
- Inducor Ingeniería. 2019. "Generadores de Impulso de Tensión, Su Aplicacion En Ensayos de

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

- Transformadores.” *Aspectos fundamentales*: 4.
http://www.inducor.com.ar/articulos tecnicos/fundamentos_tecnicos_de_los_generadores_de_impulso_parte_1_de_4.pdf.
- Martín, Juan Carlos. 2012. “Transformadores.” In *Maquinas Electricas*, ed. editex. , 252.
- Montoya, Estiben Taborda. 2018. *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DEVANADO EN ALUMINIO*.
- Pérez, Pedro Avelino. 2001. “Generalidades de Los Transformadores.” In *Transformadores de Distribución*, , 254.
- Pinto-Salamanca, Carlos Eduardo, and Juan Carlos Castro-Galeano. 2017. “PRUEBA DE RIGIDEZ DIELECTRICA A ELEMENTOS DE PROTECCION PARA TRABAJOS CON TENSION TCT.” *revista ingeniería, Investigación y Desarrollo* 17(2422–4324): 83–92.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6096084.pdf>.
- RETIE. 2013. “Capitulo 2, Requisitos Tecnicos Esenciales.” In *Articulo 12, Clasificacion de Los Niveles de Tension*, , 56–57. <https://www.asei-ingenieria.com/documents/retie.pdf>.
- Rojas, Roque R. Rodriguez. 1976. “Calculo y Diseño de Un Transformador Monofasico de Distribucion.” <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6192/1/T1222.pdf>.
- Rymel. 2019. “Transformadores Monofasicos.” *transformadores de tipo convencional*: 1.
<http://www.rymel.com.co/index.php/tranformadores-de-tipo-convencional/transformadores-monofasicos>.
- Salazar, Victor Hugo Yanez. 2010. “Elaborar Un Manual de Procedimientos Para El Diseño y Construcción de Transformadores.”
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2030/1/CD-2850.pdf>.
- Slide Share. 2008. “Calculo de Transformadores.” : 6. <https://es.slideshare.net/Volta/calculo-de-transformadores-presentation>.
- SMC. 2018. “Relacion de Transformacion.” : 1.
- Velasco, A.M., J.P. Soler, and O.A. Botina. 2018. *Divisor de Tension y Corriente*.
http://www.fisica.ru/dfmg/teacher/archivos/Divisor_de_Tension_y_Corriente.pdf.
- Vimelec. 2018. “Papel Presspan.” : 1. <http://vimelec.com/productos/prespan/>.
- Wilder Sullca Bolívar. 2014. “Proyecto de Transformador.” *slide share*: 23.
- Zapata Martínez, E., & Gutiérrez Duque, J. C. 2017. “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA SONDA DE MEDIDA PARA MEDIA TENSION EN AC.” In *Sicel*, , 1–6.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/SICEL/article/download/67678/66203>.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2019-05-27

FIRMA ESTUDIANTE: Humberto Alonso Rico


 FIRMA ASESOR
Entrega Informe Final 29/oct/2019

FECHA ENTREGA: 29 octubre 2019

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____