 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DEVANADO EN ALUMINIO**

Estiben Montoya Taborda

Ingeniería Electromecánica

Santiago Gómez Arango

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**2018**

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

Partiendo del núcleo de un transformador con devanado de cobre se realiza el diseño de un transformador devanado en aluminio y se compara los resultados obtenidos en la simulación de Simulink de Matlab.

Empresas como Rymel y ABB han implementado la construcción de grandes transformadores de potencia con láminas de aluminio, por tal motivo, es importante proponer una discusión acerca del tema para investigaciones futuras.

Este trabajo presenta el diseño de un transformador con devanado de aluminio, mostrando las ventajas y desventajas de este material. El transformador con devanado de aluminio es un 40% más liviano y un 30% más grande comparado con el devanado del transformador en cobre. No obstante, la disipación del calor presentada en el devanado de aluminio es superior que la de un devanado de cobre gracias a la sección transversal del conductor de aluminio y al coeficiente de conductividad térmica.

*Palabras clave:* Transformador, Bobina, Devanado, Tensión, Potencia, Bauxita, Resistividad, Formaleta, Inductancia, Reactancia, Histéresis.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RECONOCIMIENTOS

---

Este trabajo fue posible gracias a la orientación y apoyo del docente Santiago Gómez Arango y al semillero de redes de distribución de energía eléctrica y alta tensión.

También agradezco al ITM como institución de formación por su calidad en educación y la calidad en sus laboratorios, que permitieron llevar a cabo la investigación y desarrollo de este trabajo.

Agradezco a mi madre María de los Ángeles Taborda Arboleda y a mi novia Leidy Carolina Zapata Posso por el apoyo incondicional en este proceso y los ingresos económicos suministrados para la aplicación del proyecto.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## ACRÓNIMOS

---

NTC: Norma técnica colombiana.

RETIE: Reglamento técnico de instalaciones eléctricas.

TIG: Traducido en español gas de tungsteno inerte

ABB: Asea Brown Boveri

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	6
2. MARCO TEÓRICO .....	9
3. METODOLOGÍA.....	14
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	35
REFERENCIAS .....	37
APÉNDICE.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# 1. INTRODUCCIÓN

---

Los sistemas de transformación de energía eléctrica son diseñados y construidos con cobre, pero la demanda de este material es elevada y aunque la producción actual puede satisfacer el mercado, en el futuro podría incrementar su costo ya que disminuiría las reservas por la explotación del material. Por esta razón se piensa en el aluminio como material opcional para el diseño y construcción de sistemas eléctricos (Larkan 2017).

Empresas como ABB, Rymel, GEAFOL y Legrand han implementado sistemas eléctricos construidos con aluminio, debido a su costo y a la versatilidad del material. Por esto la importancia de analizar el comportamiento de sistemas de transformación de energía basados en aluminio (Rymel 2015),(GEAFOL 2013),(Legrand 2013),(Zimmermann 2015).

Como características principales en la construcción del transformador de aluminio, su devanado es aproximadamente un 40% más liviano que un devanado de cobre gracias al peso específico de los materiales. En el aluminio el calor se disipa más rápido que el cobre gracias a que la sección transversal del conductor de aluminio es mayor y el coeficiente de conductividad térmica es más bajo (Yunes and Michael 2012). Sin embargo, el devanado de aluminio incrementa un 30% en volumen e hizo necesario reducir el número de espiras por voltio en las bobinas de alta y baja, ya que las chapas del núcleo no proporcionan la dimensión necesaria y el conductor de aluminio debe ser de un calibre mayor.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

#### Objetivo general

- Diseño y construcción de un transformador monofásico devanado en aluminio.

#### Objetivos específicos

- Diseñar y construir un transformador con devanado en aluminio, a partir de un transformador con devanado en cobre.
- Analizar el comportamiento de los transformadores mediante simulación.
- Comparar el comportamiento y características técnicas de un transformador con devanado de aluminio y uno con devanado de cobre.

#### Descripción del trabajo:

En el numeral 1, se presenta la introducción donde se hace énfasis en el planteamiento del problema y los objetivos que se desarrollaran a lo largo del trabajo.

En el numeral 2, se presenta el marco teórico, compuesto por el estado del arte el cual describe el desarrollo de la discusión a lo largo de la historia y las definiciones que presentan palabras desconocidas para algunos lectores.

En el numeral 3, se explica la metodología empleada para dar solución al problema planteado.

El numeral 4, está dedicado al análisis y discusión de los resultados obtenidos, este numeral se apoya en la recolección de datos obtenidos en pruebas de laboratorio.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el numeral 5, finalmente se presenta las conclusiones y se deja en evidencia oportunidades de mejora para futuros trabajos.



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2. MARCO TEÓRICO

---

### Estado del arte.

Los materiales eléctricos usados hoy en día como conductores eléctricos son la plata, el cobre, el oro, el aluminio y sus aleaciones. El cobre, es el material usado tradicionalmente en los devanados de los transformadores, porque tiene un valor en mercado rentable para la construcción sistemas eléctricos. Sin embargo, este no es el único que puede realizar esta función con eficiencia. Hoy en día se habla del Aluminio como material alternativo para la construcción de estos devanados siendo el cuarto mejor conductor de electricidad con una resistividad de  $0,028 \Omega * mm^2/m$ , detrás de la plata el material con mejor conductividad con una resistividad de  $0,0163 \Omega * mm^2/m$  y siguiéndola el cobre con  $0,017 \Omega * mm^2/m$ . (Sánchez 2015).

En la actualidad se promueve el utilizar aluminio como conductor debido a que las reservas de cobre se pronostican para 31 años más, considerando la extracción y demanda actual del mercado. Mientras si se extrae esa misma cantidad de aluminio de las minas de bauxita para la fabricación del aluminio, se tendría 141 años de material antes de agotarse (Olivares-Galván et al. 2010). En 1951 debido a la segunda guerra mundial se construyeron algunos transformadores de aluminio ya que el cobre estaba destinado para la construcción de armas y proyectiles (Soucy P. 1987).

En (Mokkapaty et al. 2016) argumentan que no solo las reservas de cobre son el problema, también el costo que tiene en el mercado y que tiende a incrementarse al pasar el tiempo, tenemos aproximadamente 6 USD / kg para el cobre y 2 USD / kg para el aluminio.

Siendo el cobre y el aluminio los materiales más asequibles para la construcción de transformadores de potencia debido a sus características por disipación de calor,

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

resistividad eléctrica y conductividad (Zimmermann 2015). De lo anterior tenemos propiedades eléctricas que influyen en la selección del material según las condiciones y necesidades. por ejemplo, Teniendo dos transformadores con las mismas características eléctricas es necesario utilizar conductores de aluminio de una sección transversal aproximadamente 1,6 a 1,8 veces que el valor normalizado en cobre, debido a que la conductividad del aluminio es más baja; esto aumentaría significativamente el volumen del transformador y a su vez las dimensiones del núcleo, carcasa y aislamiento (ICONTEC 1998).

En (Larkan 2017), muestra que el volumen del transformador puede aumentar entre un 10 y 30% dependiendo del tipo de aislamiento que se utilice, esto daría lugar a un aumento del circuito magnético entre un 10 y 20%. Sin embargo, sabiendo que la relación del peso específico de los dos materiales es 0.3, la masa de un devanado de aluminio sería 0,55 veces la de un devanado de cobre, teniendo un transformador con más volumen, pero mucho más ligero. La masa de los devanados también influye en su calentamiento, en condiciones de sobrecarga se tiene que la temperatura del aluminio se limita a un 75% con respecto a la del cobre, el calor específico del aluminio y la superficie que es alrededor de 1,3 veces la del cobre, juega un papel importante en la disipación de calor. En condiciones normales la temperatura de punto caliente de los devanados de un transformador es aproximadamente 105 a 120 °C estos valores se encuentran dentro de la temperatura de fusión del aluminio que es de 657°C (Minas 2013)

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## Definiciones.

### Transformador

Los transformadores son máquinas eléctricas estáticas de corriente alterna que funcionan por el fenómeno de inducción electromagnética (Chapman 2012). Los transformadores son utilizados para reducir, aumentar o igualar la tensión y corriente de entrada con respecto a una o varias a la salida. Para esto necesitan principalmente dos bobinas de alambre conductor y un núcleo ferromagnético, en el cual, al suministrar una tensión alterna en una de las bobinas, aparece una corriente en el alambre conductor generando un campo eléctrico, este campo induce un flujo magnético variable que recorre el núcleo. Este último al cortar las espiras de la otra bobina, induce una corriente, esta da lugar una tensión de salida (Ángel and Pozueta 2012).

### Bobina

Enrollamiento de conductor eléctrico aislado que es utilizado para la transformación de energía eléctrica.

### Devanado

El devanado está compuesto por la composición de todas las bobinas del circuito.

### Resistividad

La resistividad eléctrica es la oposición al paso de la corriente eléctrica, esto genera un calentamiento producido por el choque de los electrones con los átomos del material a este fenómeno se le llama efecto Joule ( $I^2 * R$ ). Esta propiedad es la que determina si un material es conductor o es aislante (González 2013).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### Núcleo

Es la unión compacta de las chapas mencionadas anteriormente.

### Chapas

Láminas en forma de I y E construidas actualmente de acero al silicio el cual tiene bajo contenido de carbono y con 2 a 4,5% de silicio. La función del silicio en las chapas de los transformadores es reducir las pérdidas por histéresis (Mago et al. 2009).

### Formaleta

Molde utilizado para la fabricación del devanado de un transformador, permite que los devanados se puedan alojar dentro del núcleo.

### Bauxita

Mineral compuesto por una mezcla de minerales de aluminio y entre los más importante se encuentra la Gibbsite ( $Al(OH)_3$ ), Diásporo ( $AlO(OH)$ ) y Boehmita ( $AlO(OH)$ ). De este mineral es extraído el aluminio puro (Fernando Silva, Francisco Garrido, Marta Medeiros, Joao Sampaio 2008).

### Inductancia

Es el un elemento eléctrico enrollado de dos terminales que almacena energía en forma de campo magnético. Según la ley de Faraday este fenómeno aparece cuando se suministra una corriente variable (Boylestad 2009).

### Histéresis

Cuando un material ferromagnético se le induce un campo y este cesa repentinamente, queda un magnetismo residual en el material que no desaparece amenos de que se suministre un campo contrario al inducido (Laboratorio materiales magneticos 2016).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## Soldadura TIG

Es un tipo de soldadura en la que se utiliza un electrodo fijo de tungsteno y se enciende un gas para realizar la fundición de las piezas y el aporte de soldadura (SENA 1970).

### 3. METODOLOGÍA

#### Cálculo del devanado

A continuación, se muestra la metodología utilizada para calcular el calibre de conductor utilizado en la construcción de los devanados de aluminio (Martínez 2015).

Las chapas utilizadas que componen el núcleo para el transformador tienen las medidas que se observa en la Figura 1.

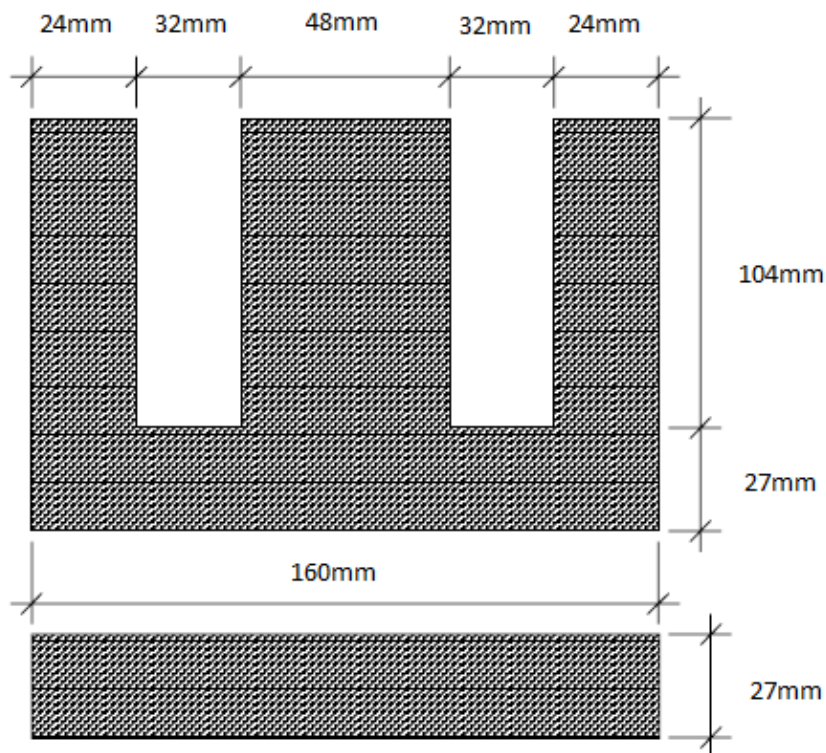


Figura 1. Medida de las chapas del transformador (Navarra 2010).

Para calcular la potencia del transformador es necesaria la sección transversal del centro del núcleo. Este es calculado con el número de chapas del transformador y la distancia de

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

la parte central del núcleo. Así, la sección transversal  $S_N$  sería de  $42,72\text{cm}^2$  y la potencia se calcula con la Ecuación (1).

$$S = \left(\frac{S_N}{a}\right)^2 \quad (1)$$

$a$ : Estado en el que se encuentran las chapas, los valores a seleccionar están entre 0,7 y 1.

El valor seleccionado es de  $0,8 \frac{\text{cm}^2}{\text{VA}}$ .

$S_N$  : Sección transversal del centro del núcleo.

La potencia calculada del transformador es de  $2851,56 \text{ VA}$ .

Para el cálculo inicial se utiliza una relación transformación 2:1, por lo tanto, las tensiones que se le suministraran a las bobinas de alta y baja son de  $220\text{V}$  y  $110\text{V}$  respectivamente. Estos valores son necesario para calcular la corriente que circula por ambos devanados, aplicando la ley de Watt (Allan h. Robins 2013), como se muestra la Ecuación (2).

$$S = V_P * I_P = V_S * I_S \quad (2)$$

De lo anterior la corriente en las bobinas de alta y baja serán de  $12,96\text{A}$  y  $25,923\text{A}$  respectivamente. Así, el calibre de conductor en aluminio seleccionado para las bobinas de alta y baja son calibre 12 AWG y 10 AWG respectivamente. (ICONTEC 1998)

El número de espiras necesario en los devanados de alta y baja, se calcula mediante la Ecuación (3).

$$V = \frac{4,44 * \Phi * f * S_N * N_S}{10^8} \quad (3)$$

$\Phi$  : Nivel de inducción de las chapas (normalmente se utilizan  $10.000 \text{ Gauss}$ ).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$V$  : Fuerza electro motriz que es medida en voltios,

$f$  : Frecuencia de funcionamiento (en Colombia 60Hz)

$S_N$  : Sección transversal del transformador medida en  $cm^2$

$N_S$  : Número de espiras.

Según lo anterior la relación es  $0,8786 \frac{\text{espiras}}{V}$ . Utilizando la relación espira - voltio y las tenciones de alta y baja tenemos que es necesario 194 espiras para alta y 97 espiras para baja.

El perímetro de la sección transversal que recubrirá el conductor se calcula por medio de la Ecuación (4) y para la sección lateral a recubrir se utiliza la Ecuación (5).

$$p = L + L + L + L \quad (4)$$

$p$ : Perímetro

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

$$S_L = \#N * D \quad (5)$$

$S_L$  : Sección lateral que se recubrirá,

$\#N$ : Número de espiras en los devanados y

$D$  : Diámetro del conductor.

El perímetro de la sección transversal del núcleo es de  $27,4 \text{ cm}$ .

La sección lateral a recorrer con las bobinas en una capa es de  $502,46mm$  para alta y  $251.23mm$  para baja.



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El número de capas necesarias para realizar los devanados esta dado por la Ecuación (6).

$$\#C = \frac{S_L}{h} \quad (6)$$

$S_L$  : Sección lateral que se recubrirá.

$h$  : Altura de la parte central del núcleo

$\#C$  : Número de capas necesaria en cada devanado.

De lo anterior, se estima cinco capas de conductor para la bobina de alta y tres capas para bobina de baja.

La longitud del conductor en ambos devanados se obtiene mediante el perímetro de la sección transversal del núcleo (ver Ecuación 4) y el número de capas de conductor que recubrirá esta sección transversal (ver Ecuación 6). La cantidad calculada de conductor en aluminio para realizar el devanado de alta y baja es de 111m teniendo en cuenta que una capa puede ubicar 40 conductores calibre 10 AWG y 48 conductores para calibre 12 AWG.

Según los cálculos realizados anteriormente, tenemos que la sección transversal del conductor de aluminio (3mm comercialmente) no permite construir el transformador con la relación seleccionada, debido a que no es posible acomodar el número de capas necesaria en las dimensiones del núcleo.

Con el diámetro del conductor y distancia de la parte central del núcleo tenemos que solo es posible acomodar 33 conductores por capa del calibre 10 AWG, debido a la sección lateral a recubrir. Con la Ecuación (5), Se obtiene que la sección lateral a recorrer con las bobinas en una capa es de 582mm para alta y 291mm para baja.

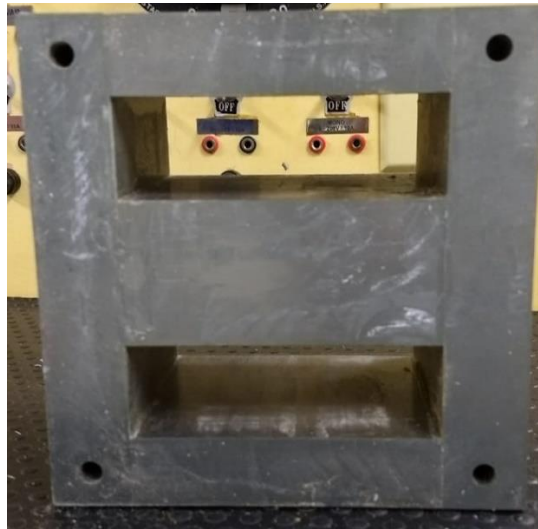
Con la Ecuación (6) se calcula el número de capas necesarias para las bobinas de alta y baja, que son 6 y 3 capas respectivamente.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Despejando la tensión de la relación espira – voltio obtenida en la Ecuación (3) y con el número de espiras de alta y baja, se calcula la tensión final en ambas bobinas que son 220 V en alta y 75 V en el lado de baja. Las tenciones de alta y baja corresponden a una relación de transformación 3:1.

### Construcción del transformador.

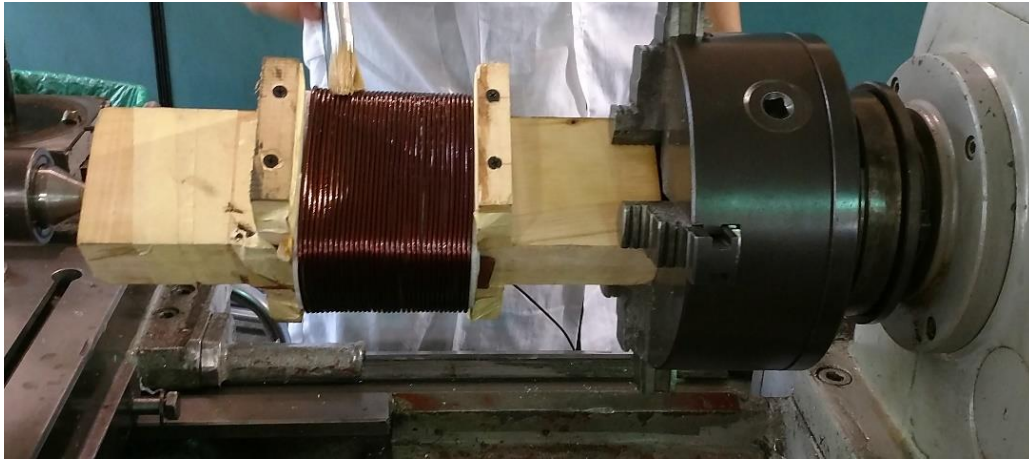
Para la construcción del transformador se parte inicialmente del núcleo de un transformador con devanado de cobre (ver Figura 2) y de los cálculos realizados se procede a la construcción del devanado de aluminio para el nuevo transformador.



*Figura 2.* Núcleo del transformador. Elaboración propia.

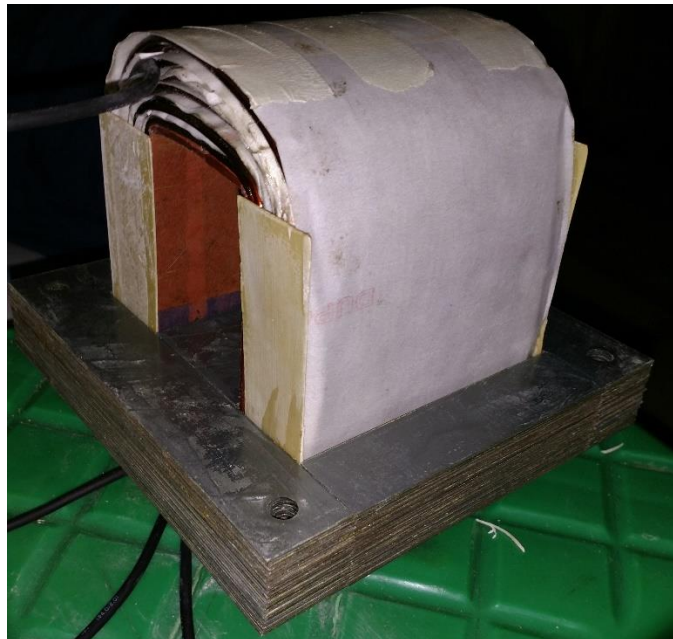
Como se presentó en los cálculos anteriores los calibres seleccionados para las bobinas de alta y baja son 12 y 10 AWG. Finalmente, para garantizar la capacidad de corriente en la bobina de alta se utiliza el mismo conductor que en la bobina de baja (10 AWG).

Para la construcción del devanado del transformador es utilizada una formaleta construida a partir de las dimensiones del núcleo y por medio de un torno, se realiza el enrollamiento del conductor que componen el devanado del transformador (ver Figura3).



*Figura 3.* Construcción del devanado en aluminio. Elaboración propia.

Después de tener el devanado se procede a montar las chapas que componen el núcleo del transformador donde para prevenir la vibración entre las chapas y evitar el calentamiento del dispositivo el núcleo debe quedar ajustado (Carlos et al. 2015). Para esto es necesario introducir una a una (ver Figura 4).



*Figura 4.* Ensamble de las placas del transformador con devanado en aluminio. Elaboración propia.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

No es posible realizar el empalme del conductor de aluminio con soldadura de estaño, debido que al entrar en contacto con la alta temperatura genera una capa de oxido en la superficie del material contaminando la soldadura de los conductores haciendo imposible su unión. Por esta razón las conexiones del transformador son realizadas externamente en una bornera (Lincon K-D 2013).

Simulación de los transformadores con devanados de aluminio y cobre.

Con el fin de realizar una simulación acorde a la teoría se realiza la de vacío. Estos valores se observan en la Tabla 2.

*Tabla 1.*

Medición de tensión en prueba de vacío para el transformador en cobre.

Tensión de entrada (V)	Tensión en subida (V)	Tensión en bajada (V)
0	0	0
0,87	0,91	0,9
10,61	10	11,1
20,7	20,1	21,4
30,5	30,4	31,7
40	40,43	41,7
50,4	49,7	52,5
60,2	60,8	62,8
70,3	70,1	73,1
79,9	80,1	83,4
90,1	90,8	94
99,9	100,8	104,2
109,4	109,6	114
120,3	119,7	125,4
130,4	130,6	136
139,8	140,1	145,9
150,1	150,1	156,5
160,6	160,4	167,2
170,5	170,8	178

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

180,5	179,9	188,4
190,4	190,1	198,8
200,7	200,4	209,2
209,7	209,7	218,9

En la Figura 5 se puede evidenciar la histéresis del núcleo.

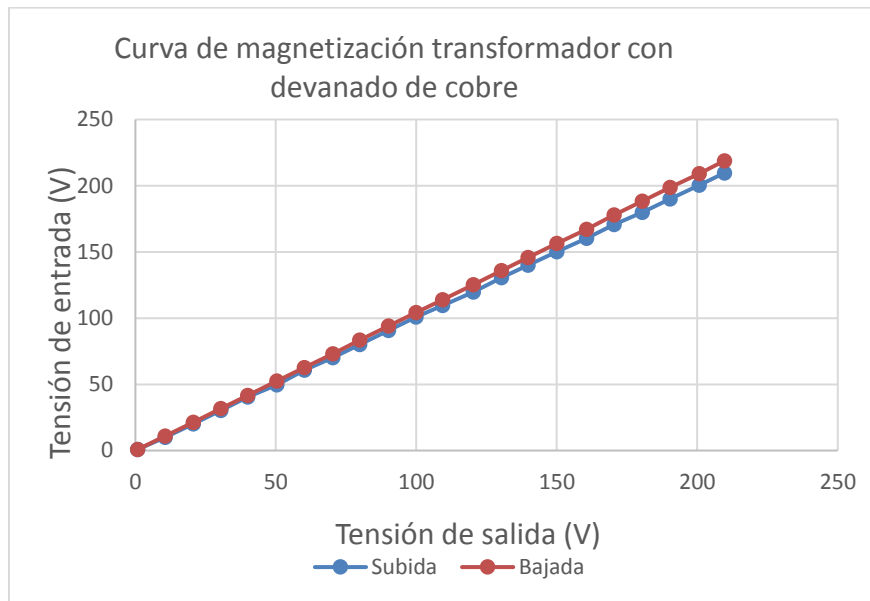


Figura 5. Curva de magnetización del transformador con devanado de cobre.

Para calcular los parámetros de la simulación se utilizan los valores presentados en la Tabla 1. (Herranz and Germán 2009)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 2.

Pruebas de vacío y cortocircuito del transformador con devanado en cobre.

<b>Características del transformador</b>			
Valor	Unidad	Referencia	Símbolo
2000	VA	Potencia nominal	S
220	V	Voltaje en vacío alta	$V_1$
218,9	V	Voltaje en vacío baja	$V_2$
60	Hz	Frecuencia	f
<b>Prueba en vacío</b>			
0,2	A	Corriente en vacío	$I_v$
22,1	W	Potencia en vacío	$P_v$
<b>Prueba en cortocircuito</b>			
33,5	V	Voltaje cortocircuito	$V_{cc}$
9	A	Corriente en el primario cc	$I_{cc}$
155	W	Potencia de cortocircuito	$P_{cc}$

Para realizar la simulación de cada transformador es necesario realizar las pruebas de vacío y cortocircuito con el fin de encontrar las pérdidas por magnetización y las pérdidas en el conductor.

Con estos datos se procede a calcular el valor de los componentes para realizar la simulación de los transformadores.

El factor de potencia se calcula con la tensión, corriente y potencia medida en la prueba de vacío como en la Ecuación (7).

$$\cos(\phi) = \frac{P_a}{I_v * V_1} \quad (7)$$

$\cos(\phi)$ : Factor de potencia.

$P_a$ : Potencia medida en prueba de vacío.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$I_v$  : Corriente medida en prueba de vacío.

$V_1$ : Tensión suministrada en prueba de vacío.

Para a calcular las corrientes  $I_a$  e  $I_m$  que pasan por la resistencia y reactancia de vacío. Se utilizan las Ecuaciones (8) Y (9).

$$I_a = I_v * \cos(\phi) \quad (8)$$

$$I_m = I_v * \sin(\phi) \quad (9)$$

$I_a$ : Componente activa o de pérdidas

$I_m$ : Componente reactiva o magnetizaste.

La resistencia y reactancia de vacío son calculadas por medio de la tensión en vacío y las corrientes halladas anteriormente. Esto puede observarse en las Ecuaciones (10) y (11).

$$R_a = \frac{V_1}{I_a} \quad (10)$$

$$X_a = \frac{V_1}{I_m} \quad (11)$$

$R_a$ : Resistencia de vacío.

$X_a$ : Reactancia de vacío.

Calculando la impedancia de cortocircuito con la tensión y corriente obtenidos en esta prueba. Como se muestra en la Ecuación (13).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (13)$$

$Z_{cc}$ : Impedancia de cortocircuito.

$V_{cc}$ : Tensión suministrada en prueba de cortocircuito.

$I_{cc}$ : Corriente medida en prueba de cortocircuito.

Para calcular la resistencia y reactancia de cortocircuito se utiliza la Ecuación (14) y (15).

$$R_{cc} = Z_{cc} * \cos(\phi) \quad (14)$$

$$X_{cc} = Z_{cc} * \sin(\phi) \quad (15)$$

$R_{cc}$ : Resistencia de cortocircuito.

$X_{cc}$ : Reactancia de cortocircuito.

Para calcular la inductancia de las reactancias de vacío y corto se utiliza la Ecuación (12) presentada a continuación:

$$L = \frac{X}{2\pi f} \quad (12)$$

$X$ : Reactancia.

$L$ : Inductancia.

$f$ : Frecuencia.



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Este procedimiento es realizado nuevamente para transformador con devanado de aluminio con las pruebas registradas en la Tabla 3.

*Tabla 3.*

Pruebas de vacío y cortocircuito del transformador con devanado en aluminio.

<b>Características del transformador</b>			
<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Referencia</b>	<b>Símbolo</b>
2000	VA	potencia nominal	$S$
220	V	voltaje en vacío alta	$V_1$
75	V	voltaje en vacío baja	$V_2$
60	Hz	frecuencia	$f$
<b>Prueba en vacío</b>			
0,2	A	corriente en vacío	$I_v$
22,4	W	potencia en vacío	$P_v$
<b>Prueba en cortocircuito</b>			
21,4	V	voltaje cortocircuito	$V_{cc}$
9	A	corriente en el primario cc	$I_{cc}$
100,3	W	Potencia de cortocircuito	$P_{cc}$

Para la simulación de los dos modelos se utiliza el Simulink de Matlab como herramienta y se presentan los circuitos presentador en la Figura 6.

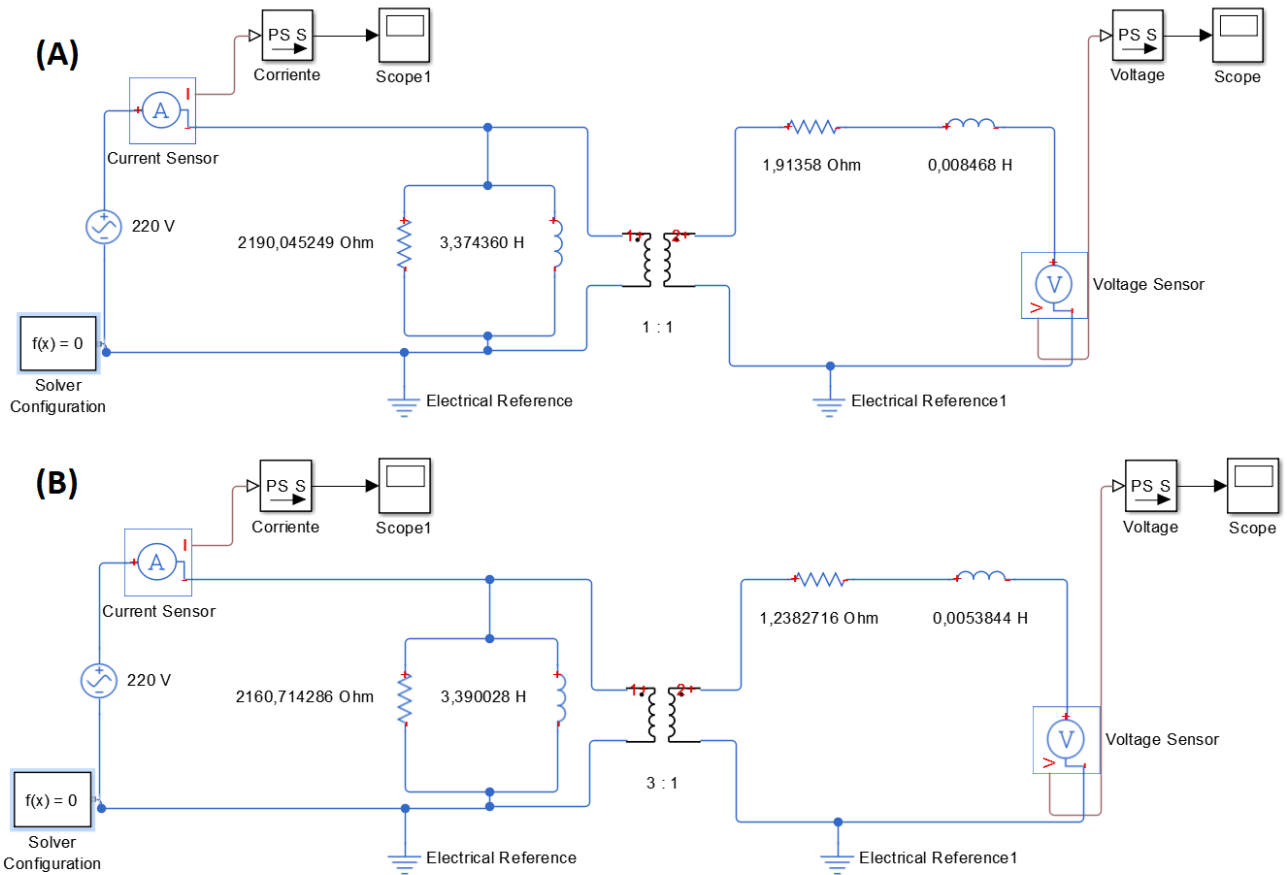


Figura 6. Modelo del transformador (A) devanado en cobre y (B) devanado en aluminio. Realizado en Simulink de Matlab. Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 6 la resistencia e inductancia de vacío no varían ya que las pérdidas en el núcleo son las mismas, pero la resistencia e inductancia calculadas en la prueba de cortocircuito si es diferente, debido a que el devanado de aluminio tiene menor longitud de conductor que el devanado de cobre.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Finalmente, en el diseño final se obtuvo un transformador con una relación de transformación 3:1, variando el diseño inicial debido a las dimensiones del conductor y a que las dimensiones en las chapas no permiten acomodar el devanado 2:1 del diseño inicial.

El transformador con devanado en aluminio se presenta en la Figura 7.



*Figura 7.* Transformador con devanado en aluminio.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Las Pruebas de corto y vacío se realizan nuevamente al transformador con devanado en aluminio obteniendo los resultados presentados en la Tabla 4.

*Tabla 4.*

Comparación de las pruebas de vacío y cortocircuito para ambos transformadores.

<b>Comparación resultados prueba de corto y vacío</b>				
<b>Tipo</b>	<b>Referencia</b>	<b>Transformador en cobre</b>	<b>Transformador en aluminio</b>	<b>Unidades</b>
<b>Prueba en vacío</b>	<i>Tensión en vacío alta</i>	220	220	V
	<i>corriente en vacío</i>	0,2	0,2	A
	<i>potencia en vacío</i>	22,1	22,4	W
<b>Prueba en corto</b>	<i>Tensión cortocircuito</i>	33,5	21,4	V
	<i>corriente de cortocircuito</i>	9	9	A
	<i>Potencia de cortocircuito</i>	155	100,3	W

Para el transformador con devanado de aluminio se hace la medición en vacío por el lado de alta y baja como se puede observar en las Tablas 5 y 6.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

*Tabla 5.*

*Medición de tensión en prueba de vacío para el transformador en aluminio medida desde el lado de baja.*

Tensión de entrada (V)	Tensión en subida (V)	Tensión en bajada (V)
0	0	0
5,019	1,67	1,66
10	3,35	3,318
20	6,88	6,64
30,19	8,39	9,99
39,65	11,57	13,17
50	15	16,6
60,33	18,4	20
70,2	21,8	23,4
80	25,01	26,61
90	28,4	30
100	31,66	33,26
110,1	35,06	36,66
120	38,4	40
130	41,64	43,24
140,9	45,2	46,8
149,8	48,2	49,8
160,3	51,6	53,2
170,8	54,92	56,52
180	58,4	60
190,8	61,8	63,4
200,8	64,9	66,5
210,7	68,4	70
212,7	70,5	70,5

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

*Tabla 6.*

Medición de tención en prueba de vacío para el transformador en aluminio medida desde el lado de alta.

Tensión de entrada (V)	Tensión en subida (V)	Tensión en bajada (V)
0	0	0
4,97	14,44	14,91
10	31,37	30,06
15,23	43,66	45,78
20,45	59,9	61,43
25,23	72,5	75,5
30,43	89,3	91
35,54	102,5	106,7
40,19	115	120,3
45,61	129,7	137
50,46	146,4	151,4
55	163,1	164,9
60,43	178,4	181,4
65,41	191,2	194,4
69	203,8	207,5
74,8	220,7	224,9
80	236,4	240
84,9	250,1	255,5
89,9	265,3	270,1
94,9	282,1	284,7
100	300	300

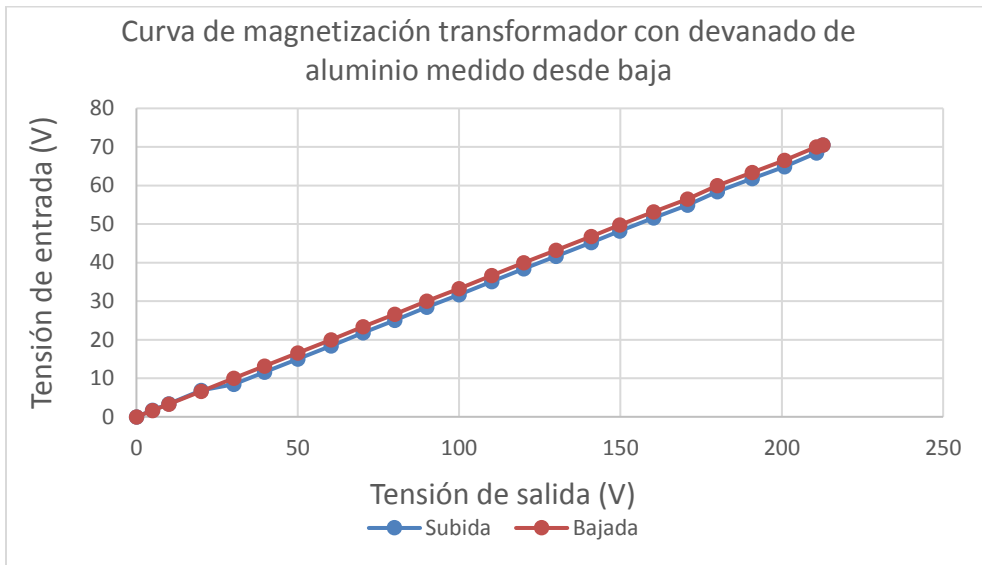


Figura 8. Curva de magnetización del transformador con devanado de aluminio medido desde el lado de baja.

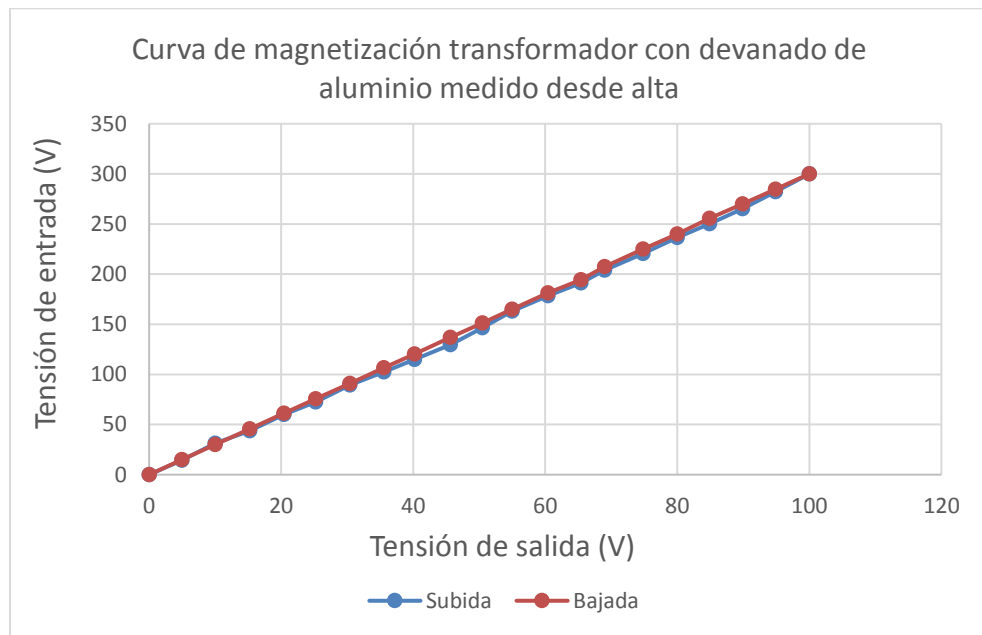


Figura 9. Curva de magnetización del transformador con devanado de aluminio medido desde el lado de alta.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con las mediciones obtenidas en la prueba de cortocircuito y la metodología implementada anteriormente se calcularon los valores del modelo de ambos transformadores presentados:

*Tabla 7.*

Comparación de las pruebas de vacío y cortocircuito para ambos transformadores.

<b>Componentes para la simulación</b>			
<b>Referencia</b>	<b>Transformador en cobre</b>	<b>Transformador en aluminio</b>	<b>Unidades</b>
<i>Resistencia de vacío</i>	2190,045	2160,71429	$\Omega$
<i>Resistencia de cortocircuito</i>	1,91358025	1,23827161	$\Omega$
<i>Reactancia de vacío</i>	1272,104	1278,01057	$\Omega$
<i>Reactancia de cortocircuito</i>	3,19267113	2,02990409	$\Omega$
<i>Inductancia de vacío</i>	3,37436032	3,39002833	H
<i>Inductancia de cortocircuito</i>	0,00846882	0,00538449	H

Con valores mostrados anteriormente y los modelos presentados en la Figura 6 tenemos que la onda obtenida en el resultado de la simulación para el transformador con devanado en aluminio es la presentada en la Figura 10.



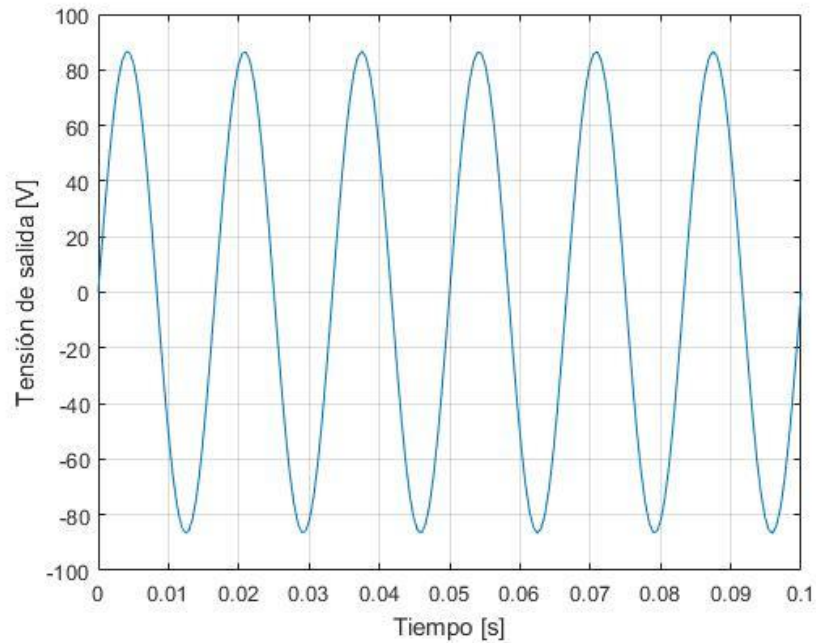


Figura 10. Simulación del transformador con devanado de aluminio, tensión de salida en vacío.

La curva obtenida en la prueba de vacío para el transformador con devanado en aluminio es la que se presenta en la Figura 11.

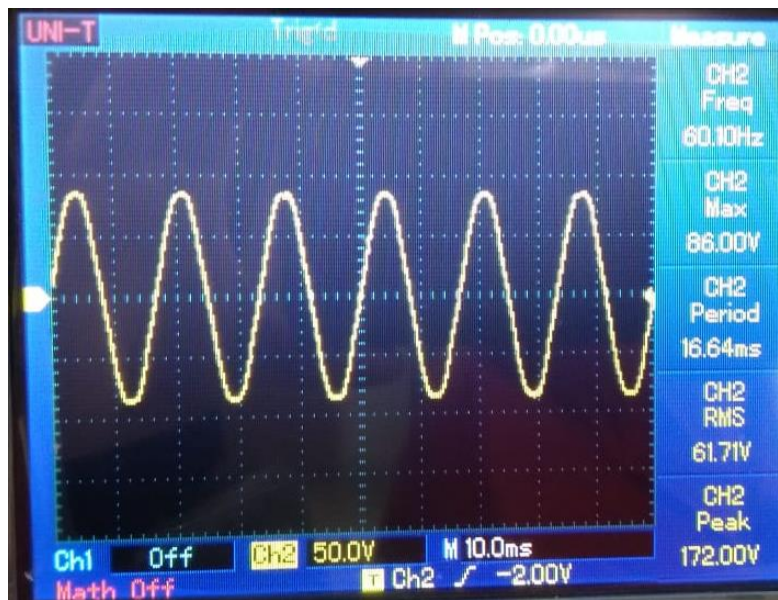


Figura 11. Medición de tensión con devanado de aluminio en prueba de vacío.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La simulación es realizada con la tensión pico de la prueba en vacío la cual fue de  $258 V_p$ . Como podemos observar en la Figura 10 la tensión de salida pico es alrededor de  $87 V_p$ . Podemos observar que se cumpla la relación de transformación 3:1 obtenida en el diseño final.

Como se esperaba la frecuencia de la onda sinusoidal obtenida en la simulación y la prueba de vacío es de 60 Hz como se puede observar en la Figura 10 y 11.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

Se construye un transformador con una relación 3:1 debido a que las dimensiones del conductor no permiten acomodar la cantidad de capas en el núcleo necesaria para una relación 2:1, debido a que una capa de conductor se calcula en aproximadamente de 40 espiras. Sin embargo, en el diseño final se cuentan 33 espiras por capa.

Las características físicas de transformador de aluminio son comparadas con el transformador con devanado en cobre y tenemos que el devanado de aluminio es 0,4 veces más liviano, pero 1,3 veces más grande que el devanado del transformador en cobre.

Al comparar las pérdidas en ambos transformadores se observa que las pérdidas en el núcleo son similares, pero las pérdidas en el conductor de cobre son mayores con respecto a las pérdidas del conductor de aluminio. Lo anterior puede ser causado por que el devanado de cobre es de menor longitud de conductor y también por el cambio en el material.

Al comparar el coeficiente de conductividad térmica y la capacidad calorífica en una misma sección transversal de conductor de cobre y aluminio, el cobre es mejor disipador y tiene mejor comportamiento al liberar el calor. Sin embargo, como el conductor de aluminio debe ser de mayor calibre que el cobre por efectos de corriente eléctrica y la disipación de calor depende directamente del área, la disipación de calor es mejor en el devanado con conductor de aluminio.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El aluminio cuando se somete a un calentamiento genera una capa de óxido en la superficie de la piel que contamina la unión por soldadura. Para la unión de aluminio es necesario implementar la soldadura por TIG.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## REFERENCIAS

- Allan h. Robins, Wilhelm c. Miller. 2013. *1 Analisis De Circuitos*.
- Ángel, Miguel, and Rodríguez Pozueta. 2012. "TRANSFORMADORES."  
<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>.
- Boylestad, Robert. 2009. *Electrónica : Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*.
- Carlos, Juan, Castro Galeano, Luis Enrique, and Echavarría Cuartas. 2015. "Experiencia Colombiana En Reparación de Núcleos de Transformadores de Potencia Colombian Experience in Power Transformers Core Repair." *14(27)*: 235–56.
- Chapman, Stephen. 2012. "Maquinas Eléctricas." *Igarss 2014 (1)*: 521.
- Fernando Silva, Francisco Garrido, Marta Medeiros, Joao Sampaio, Rachel Santos. 2008. "Estudio de Caracterización Tecnológica de La Bauxita Del Norte Del Brasil." *2*: 2–8.
- GEAFOL. 2013. "Aplicaciones y Características." : 8. [file:///D:/Articulos de trabajo de grado/Manuales/GEAFOL\\_Espanhol.pdf](file:///D:/Articulos de trabajo de grado/Manuales/GEAFOL_Espanhol.pdf).
- González, Adolfo F. 2013. "MATERIALES ELECTRICOS." Volumen 1: 446.  
[http://www.bitacoradealfon.es/pulso/capacitores\\_partel.pdf](http://www.bitacoradealfon.es/pulso/capacitores_partel.pdf).
- Herranz, Santamaría, and Oliva Germán. 2009. "Efecto Joule." *Electrotecnia*: 31.
- ICONTEC. 1998. "Código Eléctrico Colombiano: NTC 2050." *Código Eléctrico Colombiano*: 847.
- Laboratorio materiales magneticos. 2016. "Ciclo de Histéresis de Materiales Ferromagnéticos." : 1–34. <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-17833//Materiales magnéticos 2015-16.pdf>.
- Larkan, Kirsten. 2017. "Aluminium vs. Copper Conductors in Transformer Manufacture." *Technology and business developmen ee publishers*: 1–9.  
<http://www.ee.co.za/article/aluminium-vs-copper-conductors-transformer-manufacture.html>.
- Legrand. 2013. "Distribución Zucchini Transformadores Secos ZUCCHINI : Potencia Ecológica." : 67. <file:///D:/Articulos de trabajo de grado/Manuales/Nacional-de-electricos-catalogo-Legrand-Trasformadores-en-resina-Zucchini.pdf>.
- Lincon K-D, S.A. 2013. "Soldeo de Aluminio y Sus Aleaciones."
- Mago, G, Lin Hurtado, Yamile Ra, and Irvin Leal. 2009. "Nota t ´ Ecnica : Estudio de La Chapa de Acero Al Silicio Para El n ´ Ucleo Del Transformador Monof ´ Asico Study of the Silicon Sheet

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Steel for the Core of the Single – Phase Transformer.” : 65–69.

- Martínez, Carmen Torrijos. 2015. *CALCULO ANALÍTICO DE TRANSFORMADORES DE PEQUEÑA POTENCIA*. <http://iesparearques.net/tecno/Bloques de Contenidos agost 2011/Electronica/Documents/3- bobines/transformadors/Construccion transformador/calculo.htm>.
- Minas, Ministerio de. 2013. “RETIE Resolución 9 0708 de Agosto 30 de 2013 Con Sus Ajustes.” *Resolucion 90708*: 127.
- Mokkapaty, Sudheer Phani Kumar et al. 2016. “3D Finite Element Analysis of Magnetic Shunts and Aluminum Shields in Clamping Frames of Distribution Transformers.” *2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC 2015*.
- Navarra, Universidad D E. 2010. “Diseño y Fabricación de Un Transformador Monofásico.”
- Olivares-Galván, J.C., F. de León, P.S. Georgilakis, and R. Escarela-Pérez. 2010. “Selection of Copper against Aluminium Windings for Distribution Transformers.” *IET Electric Power Applications* 4(6): 474. <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-epa.2009.0297>.
- Rymel. 2015. “Catalogo de Transformadores.” : 12.  
<http://www.rymel.com.co/CatalogoProductos.pdf>.
- Sánchez, Oscar Enrique Linares;Richard Mijael Fonseca Briceño. 2015. “ELECTRONICA.” *Pontificia Universidad Católica Del Perú*: 1–105.
- SENA. 1970. *Soldaduras No Ferrosas*.
- Soucy P. 1987. “Experiences with the Use of the Port-a-Cath.” *Journal of Pediatric Surgery* 22(8): 767–69.
- Yunes, Cengel, and Boles Michael. 2012. *Termodinamica*.
- Zimmermann, Celio. 2015. “Jornadas Técnicas 2015 ©.” : 24.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES	
FIRMA ASESOR	
	FECHA ENTREGA: <u>11/julio/2018</u>

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: _____