

INFORME PRIMER PROYECTO

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO”

DAVID URBAEZ LEÓN

ANGEL RICARDO MARIN RESTREPO

LAURA QUINCHIA DOMINGUEZ

BRANDON BASTIDAS MACÍAS

ANDRÉS MATEO ALZATE VELASQUEZ

MÁQUINAS ELÉCTRICAS I.

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y AUTOMÁTICA.
FACULTAD DE MINAS.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN
MEDELLÍN 2020

1. TABLA DE CONTENIDO

1. Resumen	3
2. Abstract	4
3. Introducción	5
4. Diseño	7
4.1 Características del carrete	7
4.2 Características del núcleo	7
4.3 Prueba para caracterización del núcleo	11
4.4 Diseño devanados	16
4.4.1 Diseño del Variac.	16
4.4.2 Diseño Ventilación.	17
4.4.3 Diseño Devanado Primario y Fijo	17
5. Construcción	25
6. Pruebas del transformador:	30
6.1 Prueba de Aislamiento	30
6.2. Curva de Magnetización	30
6.3. Regulación de voltaje	Error! Bookmark not defined.
6.4. Prueba de vacío	32
6.5 Prueba en DC:	33
6.6. Prueba corto circuito:	34
7. Circuito equivalente	37
8. Corrección de resistencias a 85°	37
9. Eficiencia del transformador	38
10. Comparación del transformador con y sin ventilación forzada	39
11. Placa característica del transformador	40
12. Análisis de costos	Error! Bookmark not defined.
13. Conclusiones	42
14. Bibliografía	43

1. Resumen

Este proyecto tiene como objetivo el diseño, construcción e implementación de un transformador monofásico multidevanado bajo unos requisitos de diseños solicitados, en este caso se diseñará un transformador reductor, pues su tensión en la bobina primaria está planteada para 190V, mientras que la tensión de salida en el bobinado fijo es de 100V. Además de las 2 bobinas principales también se desea alimentar una carga de ventilación para mejorar el rendimiento del transformador, y un variac para lograr obtener una salida con tensión variable.

En general el proyecto consta de 3 etapas, en la primera etapa se caracteriza el núcleo, se selecciona el punto de operación fijando el flujo magnético en el núcleo, es decir, se establece una relación preliminar entre el voltaje y el número de vueltas [Vueltas/Espira], la segunda etapa consta del diseño y cálculo del transformador dada la caracterización del núcleo, y la tercera etapa consta de la construcción del equipo y las pruebas para caracterizarlo, es decir, se realizarán pruebas para determinar cada uno de los parámetros que componen el modelo equivalente del transformador mediante pruebas de cortocircuito, de circuito abierto, y de voltaje en DC.

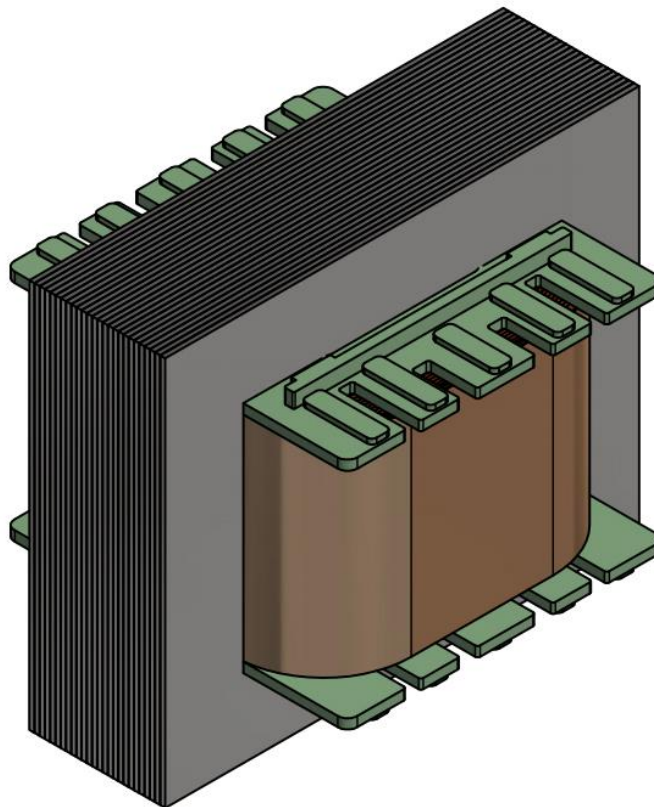


Figura 1. Transformador a diseñar y construir.

2. Abstract

The main aim in this project is to design, build and implement a single-phase- transformer with some design requirements, it is needed to have a 190V input and a 100V output for the main windings. Furthermore, it is required to build the transformer with two more windings, the first one for a fan which is going to be used for forced ventilation to improve the transformer performance, and a second extra winding to manage a variable output voltage (VARIAC).

The project is divided in 3 main stages, the first one is to characterize the core and to select the operating point, in this case there is going to be a fixed magnetic flux and a certain voltage per turn. Therefore, the next stage is about designing and calculating the transformer with the given information, and finally the final stage would be building the transformer and getting the equivalent model parameters, through some general test that are going to be done, for instance, the open circuit test, the short circuit test and some DC tests.

3. Introducción

Los transformadores son máquinas eléctricas con múltiples aplicaciones en el campo de la ingeniería eléctrica. Estos equipos están conformados por dos o más devanados de material conductor, que para este caso es cobre, un núcleo de material ferromagnético y su base de construcción. Su principal función es transformar diferentes niveles de tensión para disminuir pérdidas en el transporte de la energía, basándose en el principio de inducción electromagnética. Estos se pueden clasificar entre ideales y reales, su diferencia se basa en que los transformadores ideales no tienen pérdidas y, por lo tanto, su potencia de entrada será igual a la de salida. En éste proyecto se trabaja el modelo de transformador real, por consecuencia, se tiene en cuenta las pérdidas, las cuales pueden ser por corriente Foucault o pérdidas por histéresis. Estas pérdidas son importantes a la hora de caracterizar el equipo, ya que van a influir en la toma de datos como potencia, tensión y corriente.

Existen diferentes tipos de transformadores, entre los cuales están los de potencia, transmisión, distribución, electrónicos o algunos transformadores especiales como los cambiadores de tomas (taps), pueden ser clasificados entre monofasicos y trifasicos. Entre sus aplicaciones generales está el transporte de energía eléctrica a grandes distancias, elevar y reducir los niveles de tensión y corriente en sistemas de distribución.

En este proyecto, se realiza la construcción de un transformador monofásico reductor con la finalidad de evaluar la eficiencia y realizar una semejanza con los de uso industrial. Consta de dos devanados, el primero con una bobina y el segundo se compone de tres bobinas, el modelo circuital es mostrado en la figura 2.

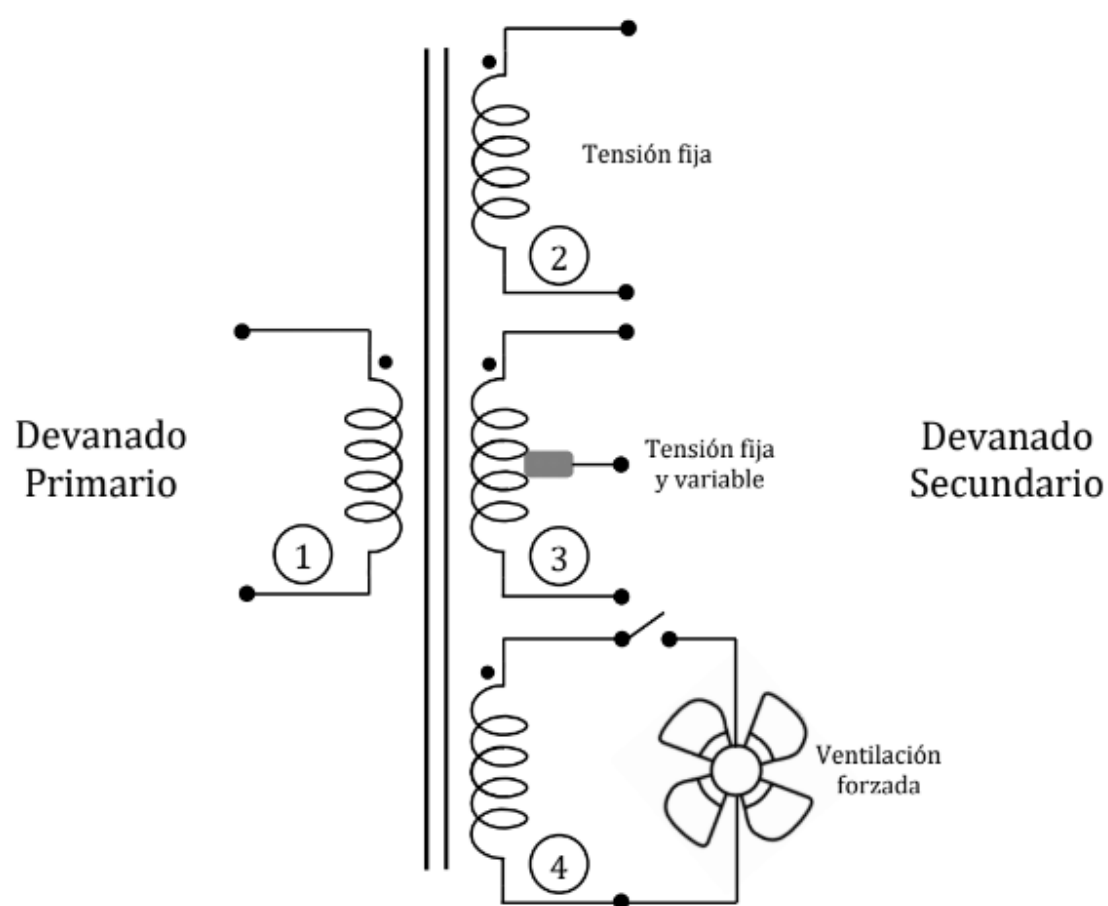


Figura 2. Modelo circuital del transformador a construir.

4. Diseño

4.1 Características del carrete

El carrete sobre el cual se realizaron los devanados tiene dimensiones 48 mm x 36 mm x 32 mm, como se muestra a continuación:

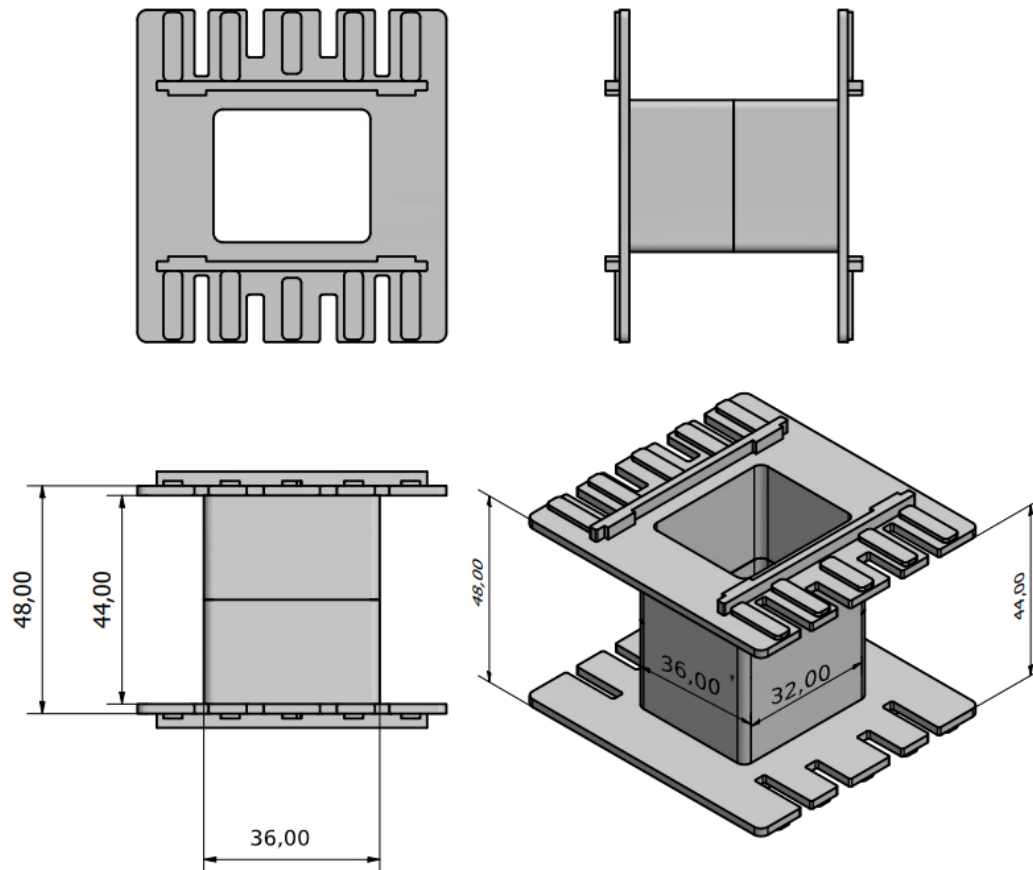


Figura 3. Dimensiones del carrete (Dimensiones en [mm]).

4.2 Características del núcleo

Posteriormente para la construcción del núcleo se utilizaron láminas de acero eléctrico de grano no orientado (LAE M43), con las geometrías “E” e “I”, con las dimensiones que presentan a continuación:

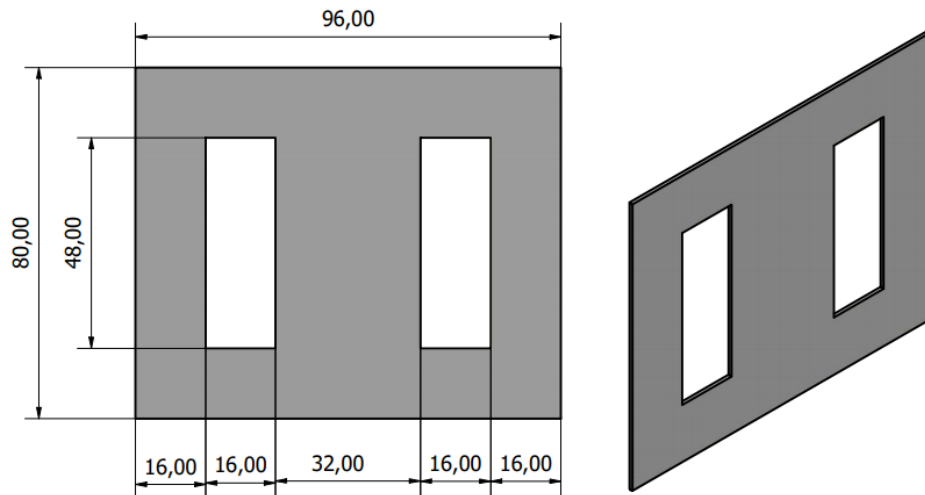


Figura 4. Dimensiones de las láminas LAE M43 usadas en el núcleo (Dimensiones en [mm]).

También se muestra la curva de magnetización del núcleo utilizado (láminas de acero de grano no orientado) y la curva de pérdidas

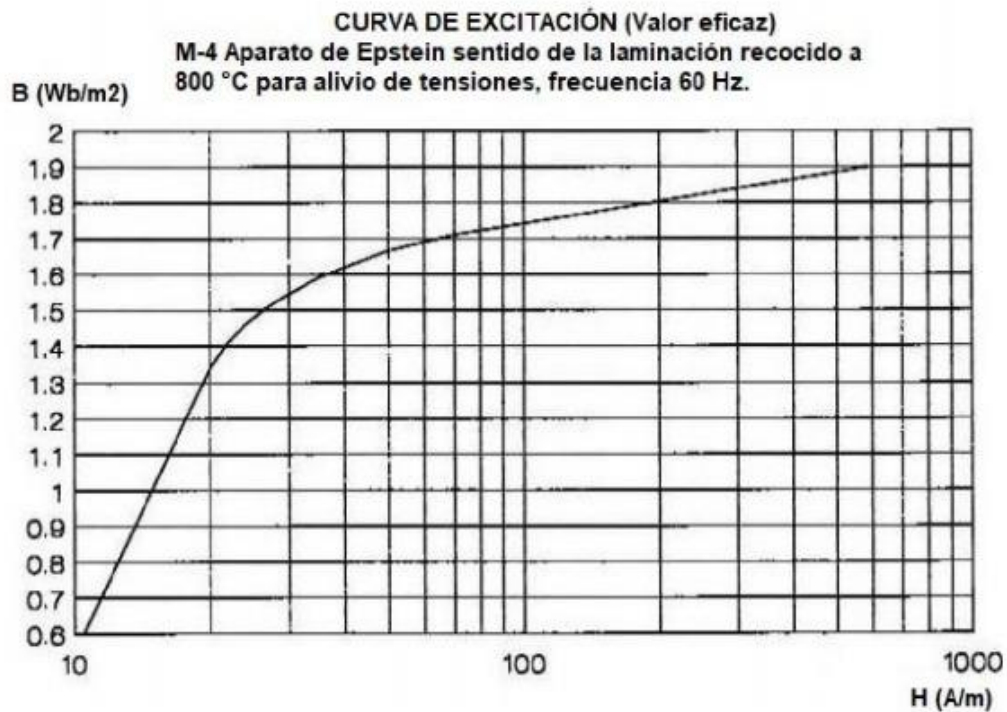


Figura 5. Curva de magnetización teórica para las láminas LAE M43 usadas en el núcleo.

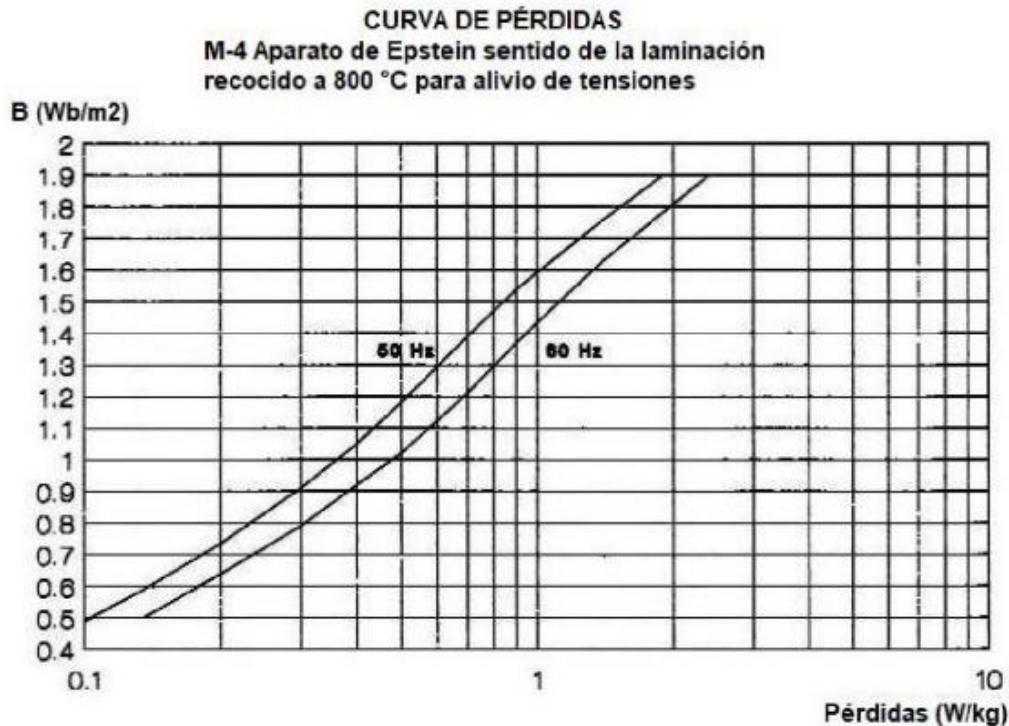


Figura 6. Curva de pérdidas teóricas para las láminas LAE M43 usadas en el núcleo.

Se desea calcular el peso del núcleo, para ello se procede a calcular el volumen total del mismo, para dicho fin inicialmente se calcula el área transversal:

$$A_T = A_1 - A_2 - A_3$$

- $A_1 = \text{Area Rectangulo Total} = 96 * 80$
- $A_2 = \text{Área Ventana 1} = 16 * 48$
- $A_3 = \text{Área Ventana 2} = 16 * 48$

Reemplazando,

$$A_T = (96 * 80 - 16 * 48 - 16 * 48) \text{ mm}^2 = 6144 \text{ mm}^2$$

$$V_T = A_T * P|_{P=32\text{mm}} = 6144 \text{ mm}^2 * 32 \text{ mm} = 196608 \text{ mm}^3 = 0.000196608 \text{ m}^3$$

Posteriormente para encontrar el peso del núcleo se considera el dato de la densidad del acero eléctrico de grano no orientado, $\rho = 7650 \text{ Kg/m}^3$.

$$W = \rho * V_T$$

$$W = (7650 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}) * (0.000196608 \text{ m}^3)$$

$$W = 1.504 \text{ Kg}$$

Para la construcción del núcleo se utilizaron 70 láminas de acero no orientado (LAE M43), compuestas cada una por una "E" y una "I", es decir, en total se apilaron 70 "E" y 70 "I", de forma intercalada para disminuir las pérdidas magnéticas en el entrehierro.

Finalmente se presenta la construcción preliminar del núcleo con el carrete del transformador.

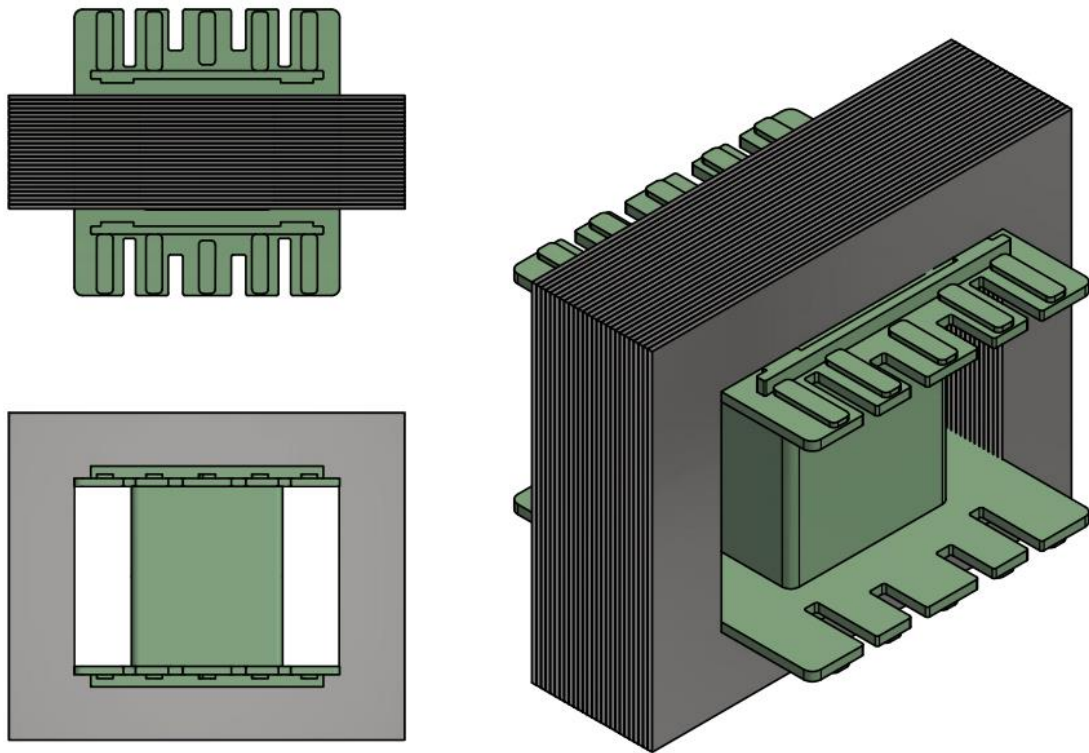


Figura 7. Modelado del núcleo con el carrete

4.3 Prueba para caracterización del núcleo

Para la realización de las pruebas de caracterización del núcleo, se desea realizar la curva de magnetización, para establecer el punto de operación, y así determinar el número de vueltas para una tensión determinada.

Con el objetivo de cumplir el fin propuesto se calcula las características del devanado de prueba, se espera llegar a una intensidad de campo magnético igual a 2000 [A/m]. De la ley de Ampere,

$$\oint \underline{H} \cdot d\underline{L} = N * I \simeq H * L \quad (1)$$

$$\text{Con } L = (48 + 8 * 2) * 2 + (16 + 8 * 2) * 2 = 192 \text{ mm} * \frac{1\text{m}}{1000\text{mm}} = 0.192 \text{ m}$$

Además se espera alcanzar por lo menos 4A , para dicho fin se selecciona el conductor de cobre calibre 19 AWG, según la tabla de conductores de dicha característica (conductor de cobre), se tiene que la corriente máxima que soporta dicho calibre es de 2.57A, sin embargo dada la corta duración de la prueba se espera que no se ocasionen daños en el equipo.

De la ecuación 1 se procede a calcular el número de vueltas necesario para obtener los resultados esperados,

$$N = H * L * I^{-1} = (2000) * 0.192 * 4^{-1} = 96 \simeq 100 \text{ Vueltas}$$

Para el montaje en el laboratorio se usa el analizador de redes Janitza 508, que permite realizar la toma de datos en tiempo real y de forma simultánea tanto de voltaje como de corriente, también se usa un Variac para variar la tensión de entrada y así tener los datos requeridos para la curva de magnetización, el montaje para la prueba de caracterización del núcleo se presenta a continuación,

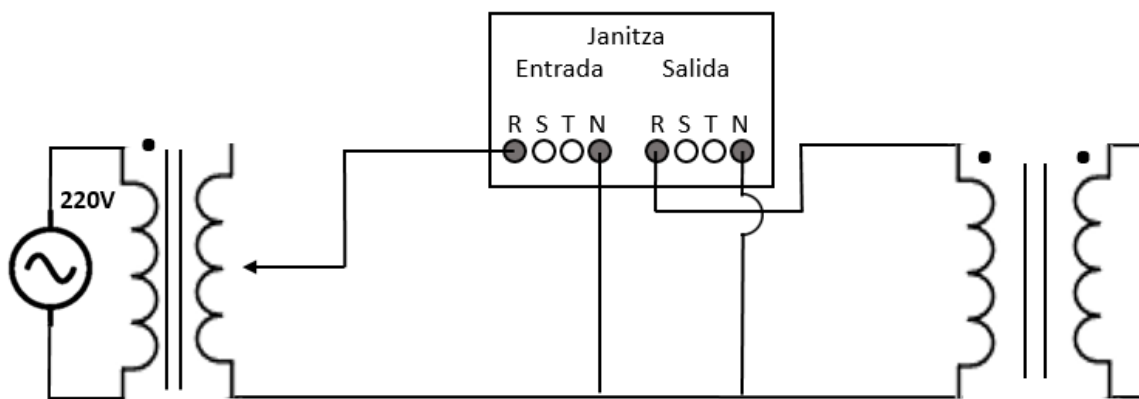


Figura 8. Circuito para prueba de curva de magnetización.

Una vez se obtienen los valores de $V(t)$ y de $I(t)$, se procede a realizar una curva paramétrica dada por $(I[t], V[t])$, para dicha curva se tomaron 160 valores, y se obtuvo la

siguiente gráfica,

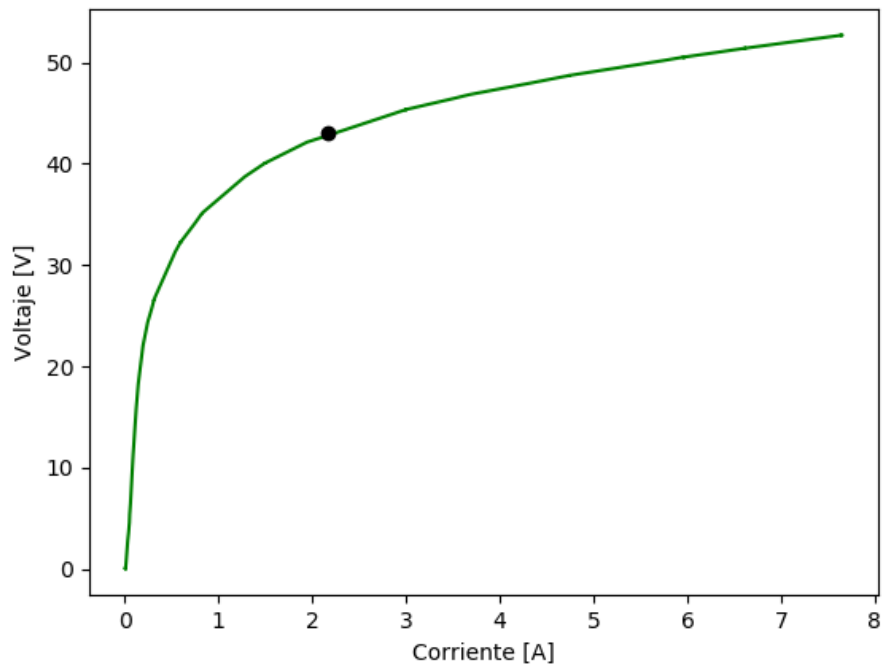


Figura 9. Curva obtenida de V vs I.

de la ecuación (1) se tiene que

$$H = N * I * L^{-1} \quad (2)$$

con

- $L = 0.192 \text{ m}$
- $N = 100 \text{ Vueltas}$

Además de la ley de Faraday se sabe que,

$$V = -\frac{d}{dt}(\oint B \cdot dA), \text{ pasando al dominio de la frecuencia,}$$

$$V = -\omega \left(\oint B \cdot dA \right)$$

Además asumiendo que B es un campo vectorial uniforme a lo largo del área transversal A y tomando la magnitud del voltaje

$$|V| = \omega B A$$

Finalmente para encontrar la densidad de flujo magnético,

$$B = (|V|)(\omega A)^{-1} \quad (3)$$

con

- $\omega = 2 * \pi * 60$
- $A = 32 \text{ mm} * 33 \text{ mm} = 1056 \text{ mm}^2 = 0.001056 \text{ m}^2$

Aplicando las ecuaciones (2) y (3) se puede obtener la curva de magnetización del núcleo, curva que se presenta a continuación,

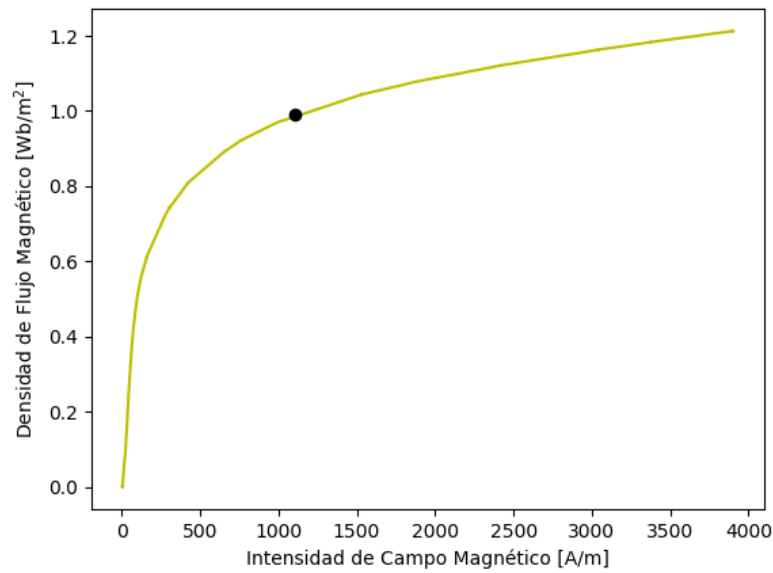


Figura 10. Curva obtenida de B vs H.

Además se muestra una gráfica entre la curva de magnetización mostrada anteriormente, y las muestras tomadas en el laboratorio.

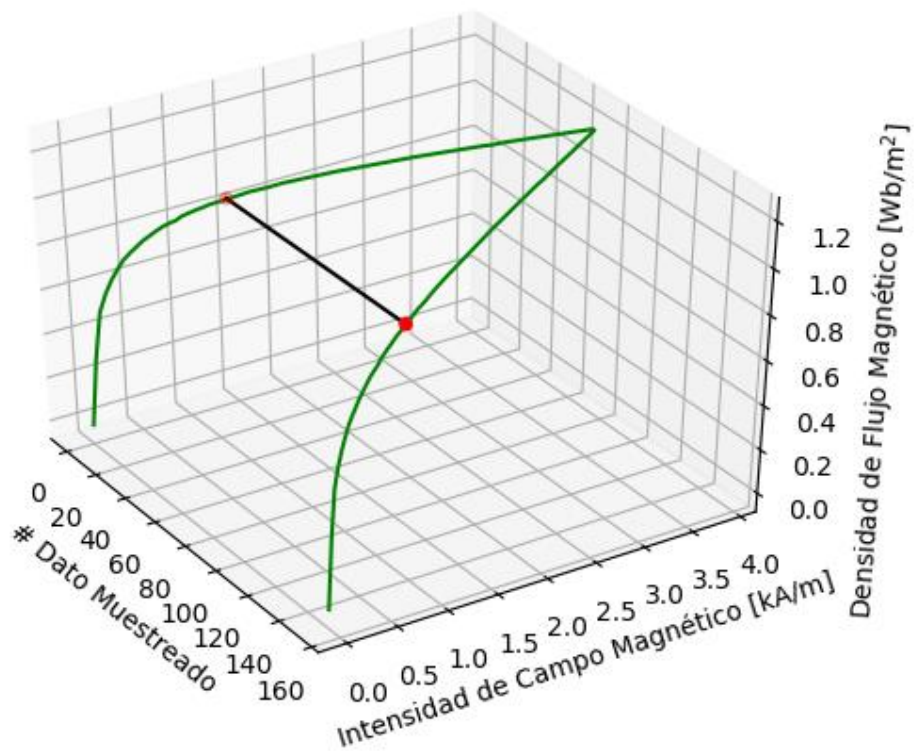


Figura 11. Curva obtenida de B vs H con la relación de los datos tomados. Notar que en las gráficas anteriores se muestra la ubicación del punto de operación seleccionado (43 Voltios), este punto se seleccionó dado que se encuentra en el punto medio

entre el codo de la curva de magnetización y la zona de saturación, se espera que con este punto de operación se pueda obtener una potencia en el transformador superior con una afectación mínima al THD (inferior al 3% para voltaje y del 12% para corriente).

Dado que el número de vueltas para esta prueba fue de 100, y el punto de operación se seleccionó a los 43 V, se tiene que la relación es:

$$OP = 43 \text{ V} / 1000 \text{ Vueltas} = 0.43 \frac{\text{V}}{\text{Vuelta}}$$

Finalmente se presenta la construcción del transformador para las pruebas de caracterización del núcleo.

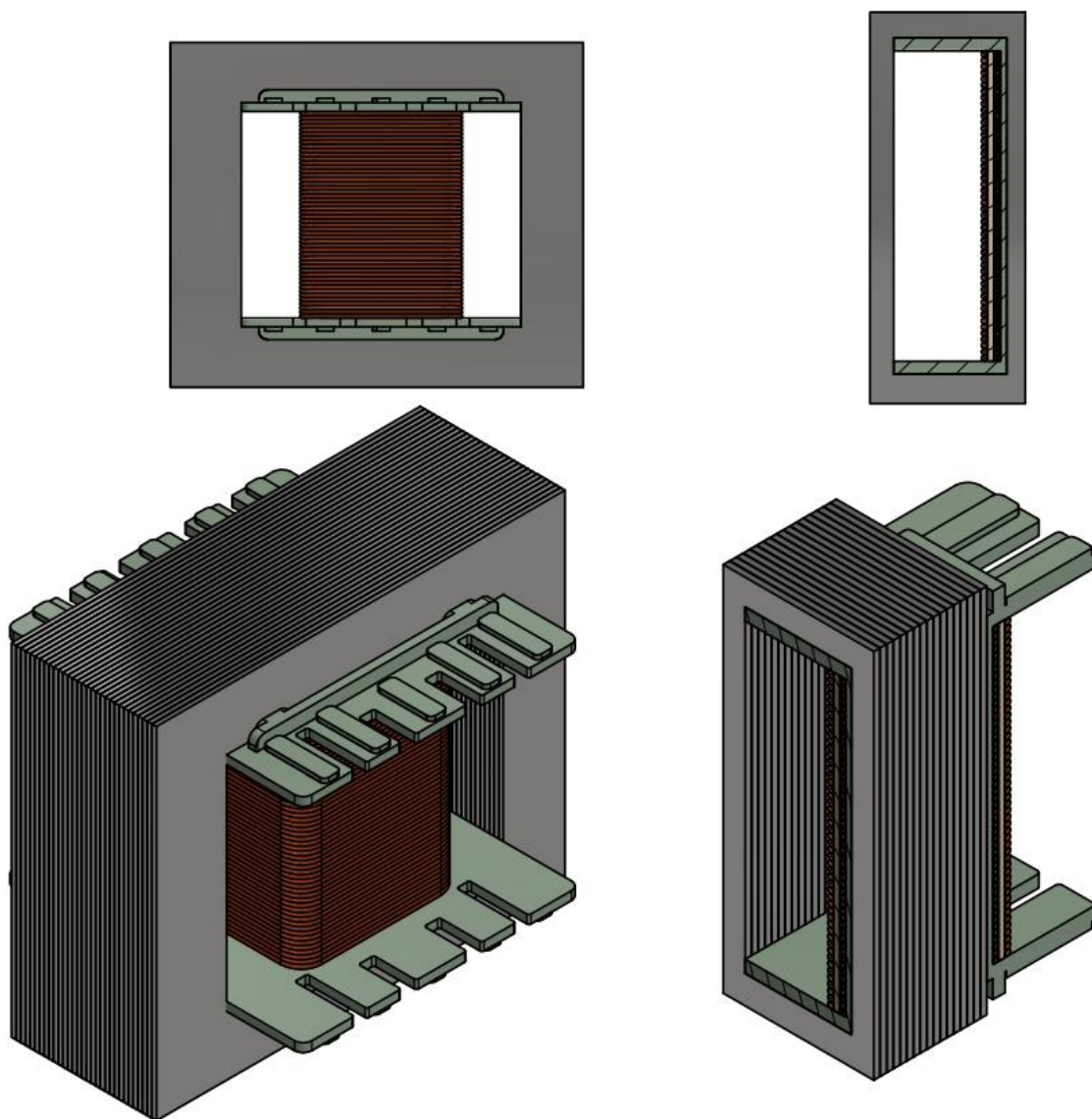


Figura 12. Modelo del transformador con 100 vueltas de cable calibre 19 AWG para curva de magnetización.

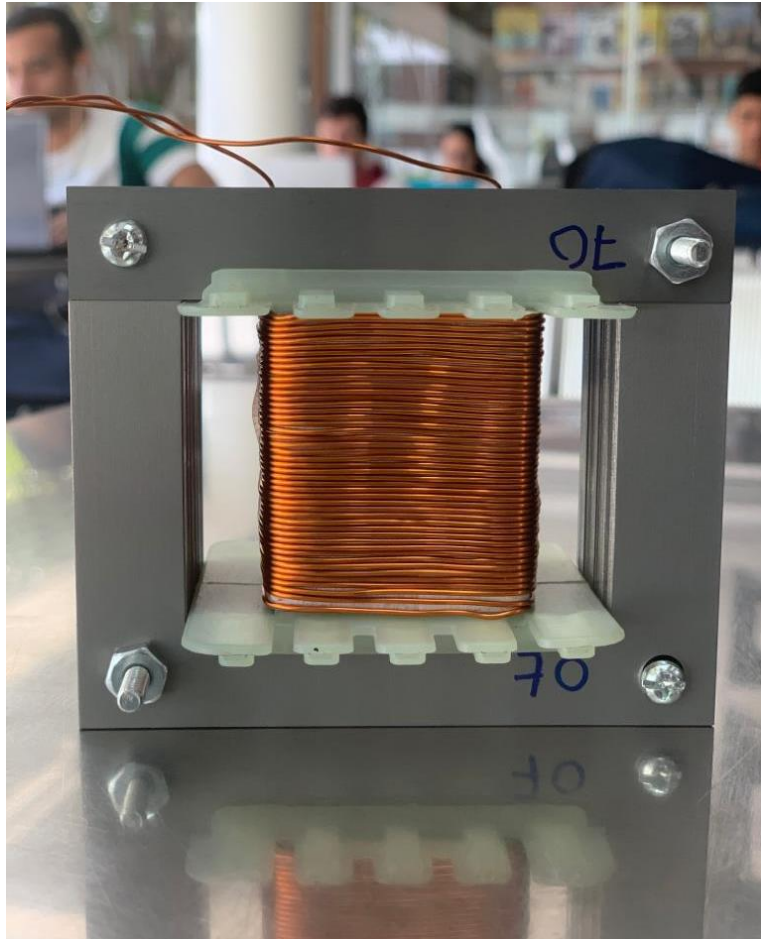


Figura 13. Transformador con 100 vueltas de cable calibre 19 AWG para curva de magnetización.

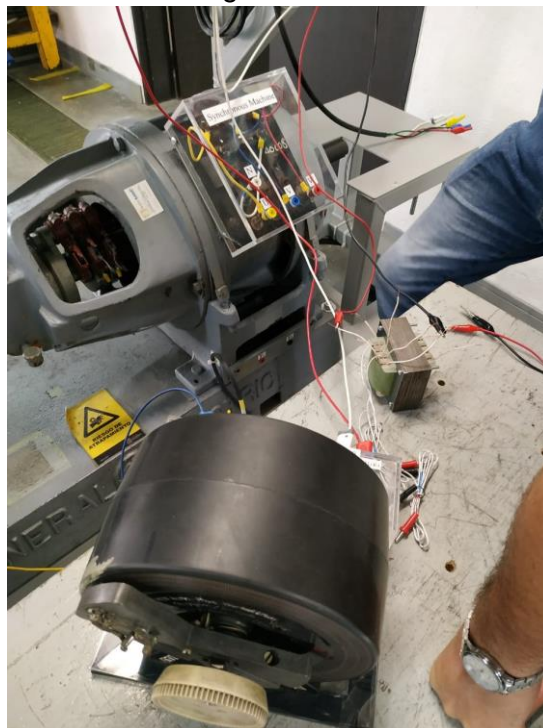


Figura 14. Montaje para obtener la curva de magnetización con el transformador.

4.4 Diseño devanados

4.4.1 Diseño del Variac.

Para realizar los cálculos de los devanados se definen las siguientes funciones:

- $Zinf(x) = \{m \in \mathbb{Z} | m \leq x\} = \lfloor x \rfloor$

Como la función que entrega el máximo valor entero inferior a x.

- $Zsup(x) = \{m \in \mathbb{Z} | m \geq x\} = \lceil x \rceil$

Como la función que entrega el mínimo entero superior a x.

Inicialmente se definen los parámetros del variac, cuya única restricción es que debe ser la capa externa del transformador. Dada esta restricción se procede a calcular la potencia que entregaría cada calibre si se selecciona para este devanado.

Se sabe que la altura de la ventana por la que deben entrar todas las espiras es de 44 mm, por tanto, se tiene que el número de espiras en la última capa está dada por la ecuación

$$\#Vuelas = Zinf\left(\frac{44}{D_v}\right)$$

Donde D_v es el diámetro del calibre para el variac. Luego se tiene que la relación para el voltaje es 0.43 Voltios por vuelta, por tanto, la tensión en el variac queda descrita por la ecuación:

$$V = \#Vuelas * 0.43 \frac{\text{Voltio}}{\text{Vuelta}} = Zinf\left(\frac{44}{D_v}\right) * 0.43 [V]$$

Finalmente, la potencia en el variac está dada por:

$$S = V * I = Zinf\left(\frac{44}{D_v}\right) * 0.43 * I_v \quad (4)$$

Con la ecuación (4) se tiene una potencia para un conjunto de datos $[I_{Variac}, D_{Variac}]$, por lo cual se procede a realizar el respectivo análisis para cada calibre.

	Dia (mm)	Current (A)	#vuelas	Voltaje	Potencia
13	1,8278				
14	1,6277	8,2136	24,0726557	10,3512419	85,0209607
15	1,4495	6,5134	27,0320084	11,6237636	75,7102218
16	1,2908	5,1654	30,3552949	13,0527768	67,4228134
17	1,1495	4,0963	34,0873877	14,6575767	60,0418314
18	1,0237	3,2485	38,277512	16,4593301	53,468134
19	0,9116	2,5762	42,9813422	18,4819771	47,6132695
20	0,8118	2,043	48,2667837	20,754717	42,4018868
21	0,7229	1,6202	54,200542	23,3062331	37,7607588
22	0,6438	1,2849	60,8659566	26,1723613	33,6288671
23	0,5733	1,019	68,3442063	29,3880087	29,9463809
24	0,5106	0,8081	76,7486482	33,0019187	26,6688505
25	0,4547	0,6408	86,1731297	37,0544458	23,7444888
26	0,4049	0,5082	96,7670992	41,6098527	21,1461271
27	0,3606	0,403	108,668807	46,7275871	18,8312176

Tabla 1. Posibles opciones para selección del variac.

Se selecciona el calibre 20 para la bobina del Variac, dado que entrega 42.4 [VA] y permite variar el voltaje en un rango de [0V,20V].

Es importante resaltar que en los cálculos se tuvo en cuenta el tamaño del barniz tomando el diámetro del calibre anterior es decir,

$$D_n[x] = D_o[x - 1], \text{ con } x \text{ el \# del calibre AWG.}$$

Por ejemplo, para el calibre 19 se considera el diámetro del conductor calibre 18.

4.4.2 Diseño Ventilación.

El siguiente cálculo a realizar es el de la bobina de ventilación, para esta se considera un ventilador de 11[W] a 110[V] en AC y por consiguiente con una corriente de 0.1[A]; para esta corriente se tiene que el calibre adecuado es un calibre 33 AWG (Valor tomado de tablas), y dado que se deben obtener 110V se procede a calcular el número de espiras:

$$\#Espiras = \mathbb{Z}^{sup}\left(\frac{Voltaje}{0.43 \frac{Voltio}{vuelta}}\right) = \mathbb{Z}^{sup}\left(\frac{110}{0.43}\right) = 256 \text{ Vueltas}$$

4.4.3 Diseño Devanado Primario y Fijo

Solo hace falta realizar el cálculo para las bobinas primaria y fija, cuyas restricciones son:

- **Primera restricción:** Esta restricción hace referencia al balance de potencia, el objetivo es que la potencia que entra al transformador ($V_p \cdot I_p$) sea igual a la suma de las potencias en cada una de las bobinas de salida.

$$\sum_{i=1}^n S_{entrada\ i} = \sum_{j=1}^m S_{salida\ j}$$

$$V_{primario} \cdot I_{primario} = V_{fijo} \cdot I_{fijo} + S_{ventilador} + S_{Variac}$$

$$V_{primario} \cdot I_{primario} = V_{fijo} \cdot I_{fijo} + 42.4 + 11 = V_{fijo} \cdot I_{fija} + 53.4$$

- **Segunda restricción:** Esta restricción hace referencia a la dependencia del diseño con el espacio disponible, dado que la longitud de la ventana es 14 mm la suma de todas las distancias ocupadas por cada bobina debe ser inferior a este valor.

$$disVariac + disVentilador + disPrimario + disFijo \leq 14mm$$

$$disPrimario + disFijo \leq 14mm - disVariac - disVentilador$$

$$disPrimario + disFijo \leq 12.5725mm$$

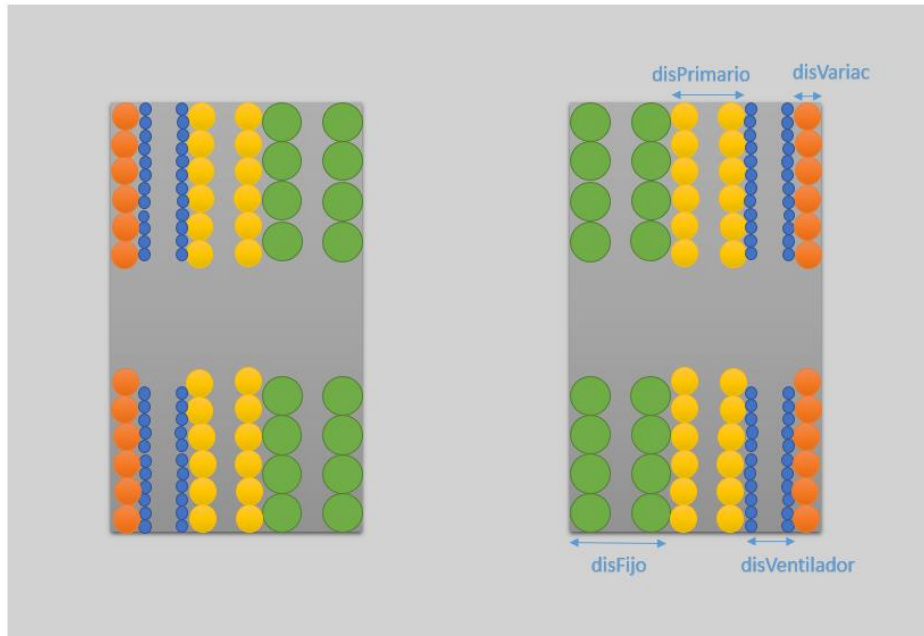


Figura 15. Diseño interno de los bobinados del transformador.

- **Tercera restricción:** el número de vueltas del primario queda impuesto dado que ya se tiene seleccionado el punto de operación del transformador. Dado que el voltaje primario es $V_p = 190V$, el número de vueltas en el primario es,

$$\#VueltasPrimario = \text{Zsup}\left(\frac{190V}{0.43 \frac{\text{Voltio}}{\text{Vuelta}}}\right) = 441$$

- **Cuarta restricción:** Al igual que en el primario del transformador dado que ya se tiene impuesto el punto de operación de los devanados y dado que el voltaje fijo es $V_F = 100V$, el número de vueltas en el bobinado fijo es:

$$\#VueltasFijo = \text{Zsup}\left(\frac{100V}{0.43 \frac{\text{Voltio}}{\text{Vuelta}}}\right) = 233$$

Se procede a realizar los cálculos bajo las restricciones dadas, para la primera restricción se calcula la corriente del devanado fijo en función de la corriente de devanado primario.

$$I_{fijo} = \frac{1}{V_{Fijo}} * (V_{primario} * I_{primario} - 53.4)$$

*

$$I_{fijo} = \frac{1}{100} * (190 * I_{primario} - 53.4)$$

Por el momento se obviara el cumplimiento de la segunda restricci3n, por lo cual se procede a realizar los c3lculos para asegurar que se cumplan las restricciones 3 y 4. Inicialmente se calcula el n3mero de espiras por capa tanto para el primario como para el fijo

$$\frac{\#EspirasPrimario}{Capa} = \text{Zinf} \left(\frac{44}{D_{primario}} \right)$$

$$\frac{\#EspirasFijo}{Capa} = \text{Zinf} \left(\frac{44}{DFijo} \right)$$

Posteriormente se calculan el n3mero de capas requeridas dadas las restricciones 3 y 4,

$$\#CapasPrimario * \frac{\#EspirasPrimario}{Capa} = \#VueltasPrimario$$

$$\#CapasPrimario = \text{Zsup} \left(\frac{\#VueltasPrimario}{\left(\frac{\#EspirasPrimario}{Capa} \right)} \right)$$

$$\#CapasSecundario = \text{Zsup} \left(\frac{\#VueltasSecundario}{\left(\frac{\#EspirasSecundario}{Capa} \right)} \right)$$

Notar que el n3mero de capas tanto para el primario como para el secundario debe ser un n3mero entero, en este caso debe ser el entero superior al resultado de la divisi3n, para as3 asegurar que las capas entren en la ventana del n3cleo.

Una vez calculados los n3meros de capa por bobina se procede a calcular las distancias ocupadas por cada bobinado.

$$disPrimario = \#CapasPrimario * DPrimario$$

$$disFijo = \#CapasPrimario * DFijo$$

Reemplazando las ecuaciones obtenidas en la distancia del primario y del fijo.

$$disPrimario = \text{Zsup} \left(\frac{\#VueltasPrimario}{\text{Zinf} \left(\frac{44}{D_{primario}} \right)} \right) * DPrimario$$

$$disFijo = \text{Zsup} \left(\frac{\#VueltasSecundario}{\text{Zinf} \left(\frac{44}{DFijo} \right)} \right) * DFijo$$

y reemplazando los valores de dise1o requeridos,

$$disPrimario = Z_{sup} \left(\frac{\frac{190}{0.43}}{44} \right) * DPrimario$$

$$Z_{inf} \left(\frac{Dprimario}{44} \right)$$

$$disFijo = Z_{sup} \left(\frac{\frac{100}{0.43}}{44} \right) * DFijo$$

$$Z_{inf} \left(\frac{DFijo}{44} \right)$$

* *

Hasta el momento se tienen las ecuaciones * y **, con la ecuación * se demostró que se cumple la restricción 1, y con la ecuación ** se cumplen las restricciones 3 y 4 pero además la ecuación ** entrega una función para las distancias de la bobina primaria y secundaria que solo depende de los diámetros utilizados.

Se procede a imponer diferentes corrientes en el primario de forma arbitraria, luego con la ecuación * se saca la corriente correspondiente en el fijo para asegurar la restricción 1, luego mediante las ecuaciones * * se obtienen las distancias tanto para el primario como para el secundario en función de los diámetros correspondientes a cada una de las corrientes seleccionadas, y finalmente se selecciona la configuración que entrega mayor potencia pero que cumple la restricción número 2 ($disFijo + disPrimario \leq 12.5725 \text{ mm}$)

	Ifijo [A]	Iprimario[A]	Dfijo [mm]	Dprimario [mm]	#Espiras/capa Fijo	#Capas Fijo	#Espiras/capa Primario	#Capas Primario	disFijo [mm]	disPrimario [mm]
Opción 1	1,6320	1,140	0,9116	0,7229	48	5	60	8	4,43	5,33
Opción 2	1,7840	1,220	0,9116	0,7229	48	5	60	8	4,43	5,33
Opción 3	1,9360	1,300	0,9116	0,8118	48	5	54	9	4,43	6,64
Opción 4	2,0880	1,380	1,0237	0,8118	42	6	54	9	5,68	6,64
Opción 5	2,2400	1,460	1,0237	0,8118	42	6	54	9	5,68	6,64
Opción 6	2,3920	1,540	1,0237	0,8118	42	6	54	9	5,68	6,64
Opción 7	2,544	1,620	1,0237	0,8118	42	6	54	9	5,68	6,64
Opción 8	2,6960	1,700	1,1495	0,9116	38	7	48	10	7,05	8,39
Opción 9	2,8480	1,780	1,1495	0,9116	38	7	48	10	7,05	8,39
Opción 10	3,0000	1,860	1,1495	0,9116	38	7	48	10	7,05	8,39
Opción 11	3,1520	1,940	1,1495	0,9116	38	7	48	10	7,05	8,39
Opción 12	3,3040	2,020	1,2908	0,9116	34	7	48	10	8,85	8,39
Opción 13	3,4560	2,100	1,2908	1,0237	34	7	42	11	8,85	10,77
Opción 14	3,6080	2,180	1,2908	1,0237	34	7	42	11	8,85	10,77

Tabla 2. Distancias para el devanado fijo y primario de todas las posibles opciones.

	disPrimario	[VA]	Fijo [VA]	Secundario [VA]
Opción 1	9,75	216,60	163,20	216,60
Opción 2	9,75	231,80	178,40	231,80
Opción 3	11,07	247,00	193,60	247,00
Opción 4	12,32	262,20	208,80	262,20
Opción 5	12,32	277,40	224,00	277,40
Opción 6	12,32	292,60	239,20	292,60
Opción 7	12,32	307,80	254,40	307,80
Opción 8	15,44	323,00	269,60	323,00
Opción 9	15,44	338,20	284,80	338,20
Opción 10	15,44	353,40	300,00	353,40
Opción 11	15,44	368,60	315,20	368,60
Opción 12	17,24	383,80	330,40	383,80
Opción 13	19,62	399,00	345,60	399,00
Opción 14	19,62	414,20	360,80	414,20

Tabla 3. Distancias para el devanado fijo y correspondientes a las posibles opciones con las potencias

Nota: Tan solo se muestran las 14 opciones con mayor probabilidad a ser elegidas, sin embargo el análisis se hizo con todas las posibles opciones dadas las condiciones de diseño.

Finalmente al analizar todos los posibles calibres para las bobinas Primaria y fija, se determina que la opción que entrega más potencia es la de calibre 19 para fijo, y calibre 21 para primario, pues así se obtiene una potencia teórica de 308[VA].

4.4.4 Diseño de construcción

El orden de ubicación de las bobinas dentro de la ventana del núcleo obedece a los niveles de tensión utilizados (menor tensión más cerca al centro), sin embargo se dejaron los bobinados de ventilación y de voltaje variable al final, por si se llegaba a dar el caso de tener que cambiar los calibres, el cambio fuese más sencillo.

El orden para el devanado por capa se presenta a continuación, es importante notar que la capa 1 corresponde al centro del carrete, y la capa 18 (capa final) a la capa del exterior del transformador.

Cantidad Max. de espiras por capa		42,98	54,20	217,93	48,27
Capa	Perimetro [m]	Fijo	Primario	Ventilador	Variac
1	0,148	42	-	-	-
2	0,156	42	-	-	-
3	0,164	42	-	-	-
4	0,173	42	-	-	-
5	0,181	42	-	-	-
6	0,189	23	-	-	-
7	0,195	-	54	-	-
8	0,202	-	54	-	-
9	0,208	-	54	-	-
10	0,215	-	54	-	-
11	0,221	-	54	-	-
12	0,228	-	54	-	-
13	0,234	-	54	-	-
14	0,241	-	54	-	-
15	0,247	-	12	-	-
16	0,249	-	-	217	-
17	0,251	-	-	39	-
18	0,259	-	-	-	47
Total Vueltas		233	444	256	47
Total Voltaje		100,19	190,92	110,08	20,21

Tabla 4. Distribución de la cantidad de vueltas por capa para todos los devanados en el

Se calcula un perímetro por cada capa teniendo en cuenta los cambios por cada diámetro, mediante un algoritmo iterativo donde,

$$P[n] = 2 * a[n] + 2 * b[n]$$

Donde a y b los lados del rectángulo de la vista aérea carrete, además

- $a[n] = 2 * d[n] + a[n - 1]$, $a[0] = 32 \text{ mm}$
- $b[n] = 2 * d[n] + b[n - 1]$, $b[0] = 36 \text{ mm}$

Finalmente se calculan las distancias para cada calibre, y con la densidad de cada uno de ellos se obtienen los pesos respectivos de cada cable, dado que con este parámetro se compran los conductores, se decide asumir un costo adicional correspondiente al 5% del peso, para asegurar que los cables sean más largos de lo necesario.

	Distancia [m]	Calibre	Diametro[mm]	densidad [Ft/lb]	densidad [m/kg]	densidad[kg/m]	peso [Kg]	Peso + 5%
fijo	38,87	19	1,0237	256,47	172,34	0,00580249	0,2255	0,2368
primario	97,22	21	0,8118	407,81	274,04	0,00364916	0,3548	0,3725
ventilador	63,81	33	0,2019	6590,8	4428,81	0,00022579	0,0144	0,0151
variac	12,12	20	0,9116	256,47	172,34	0,00580249	0,0703	0,0739

Tabla 5. Longitud total de los cables a utilizar y peso correspondiente para la compra del mismo..

A continuación se presentan las características finales del diseño realizado:

	Voltajes	Calibre	Corriente	Vuelta por bobina	Potencia
fijo	100,19	19	2,5762	233,00	258,109478
primario	190,92	21	1,6202	444,00	309,328584
ventilador	110,08	33	0,1	256,00	11,008
variac	20,21	20	2,043	47,00	41,28903

Tabla 6. Características Finales del diseño del transformador.

Finalmente se muestran los modelos para el transformador diseñado

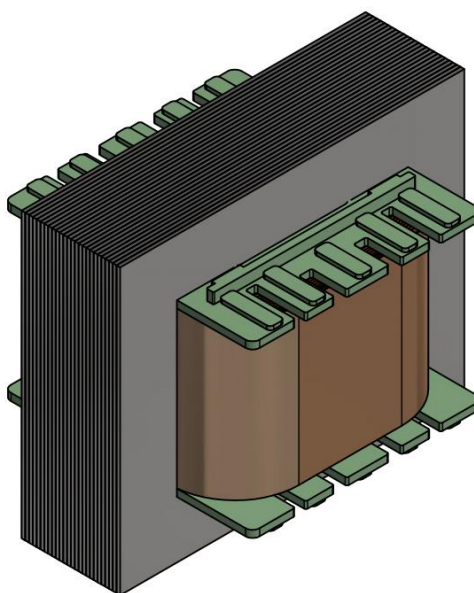


Figura 16. Diseño Final del transformador.

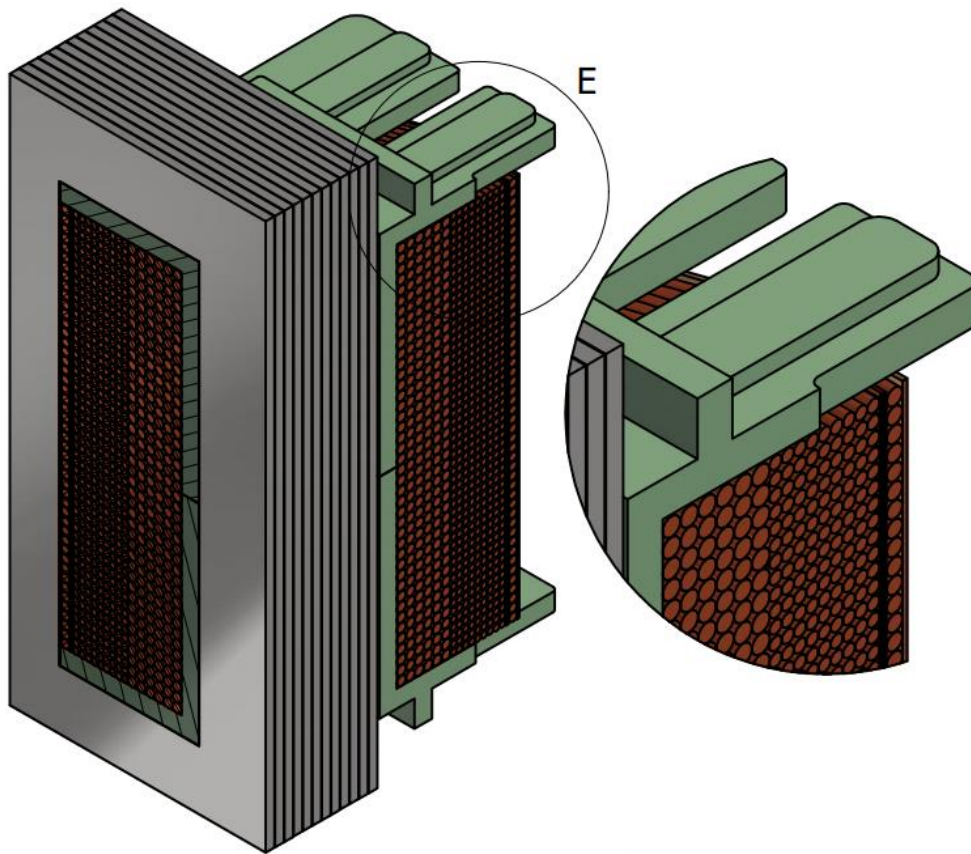


Figura 17. Modelado interno de los bobinados del transformador.

En la figura 17 se puede observar el diseño final con los diámetros seleccionados del diseño realizado, es un esquema similar al de la figura 15 pero en este caso se tiene a escala.

4.5 Sensor de temperatura.

Para la parte de medición de temperatura inicialmente se buscó un sensor LM35 para cumplir dicha función, sin embargo al revisar el datasheet se observó que la temperatura máxima alcanzada por dicho sensor es de 150°C , temperatura que en algún momento de la medición esperamos superar, razón por la cual se consideraron otras opciones, donde al final por disponibilidad en el mercado se compraron 2 termocuplas UT-T10K que nos permiten medir temperatura desde -40°C hasta 269°C , además otro beneficio del uso de este tipo de sensor de temperatura es que no se debe hacer uso de un arduino para leer los datos, ni de una corrección de temperatura por comportamientos no lineales, en este caso basta tan solo con conectar las terminales a un multímetro adaptado para realizar dicha medición.

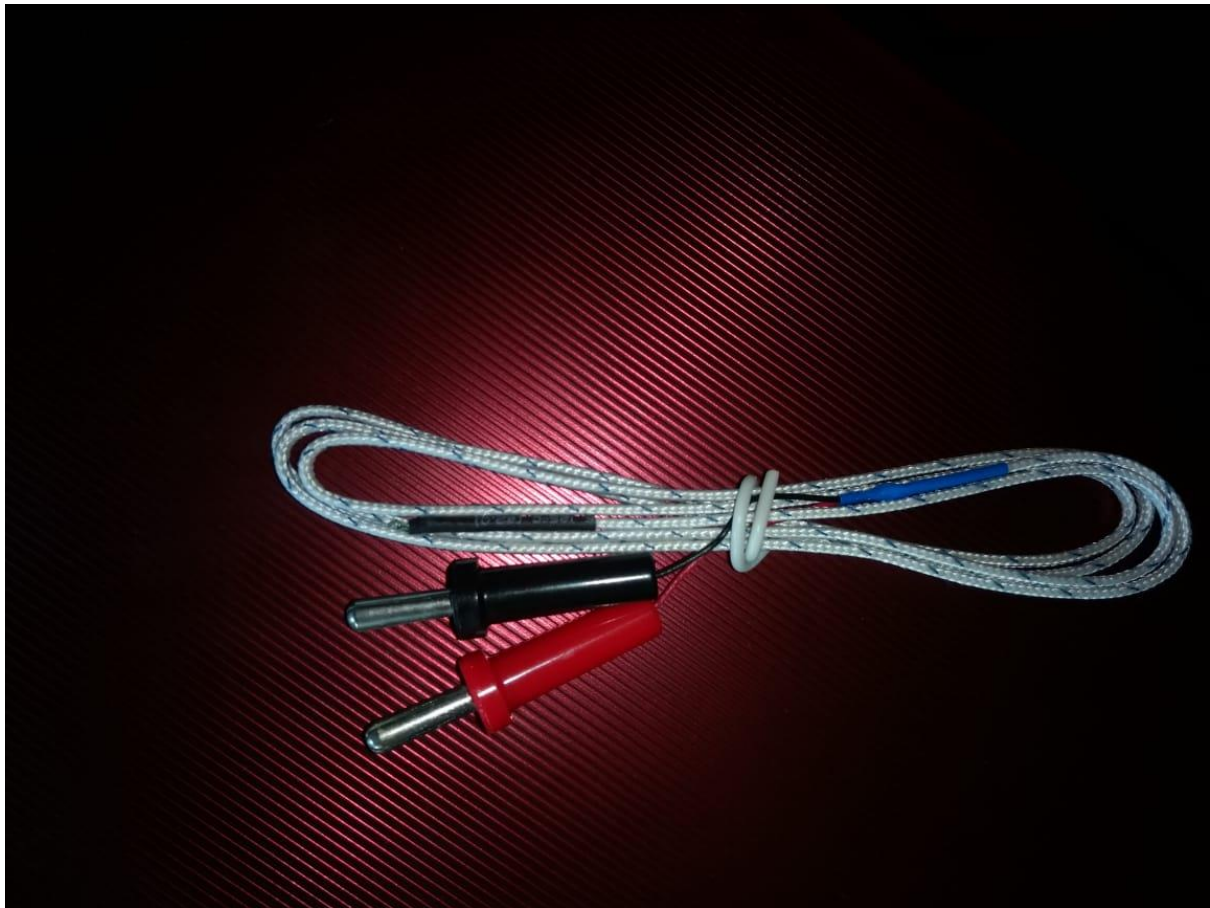


Figura 18. Termocupla utilizadas en el transformador.

5. Construcción

El transformador diseñado se mandó a bobinar por 2 razones, la primera es la precisión que se debe manejar para obtener el diseño requerido, es decir, tan solo se tienen unas pocas décimas de milímetro de error sin contar el aislamiento, y la segunda razón fue el tiempo de entrega del proyecto.

El punto de inicio para la construcción del montaje fue el transformador ya bobinado como se presenta en la figura 19.

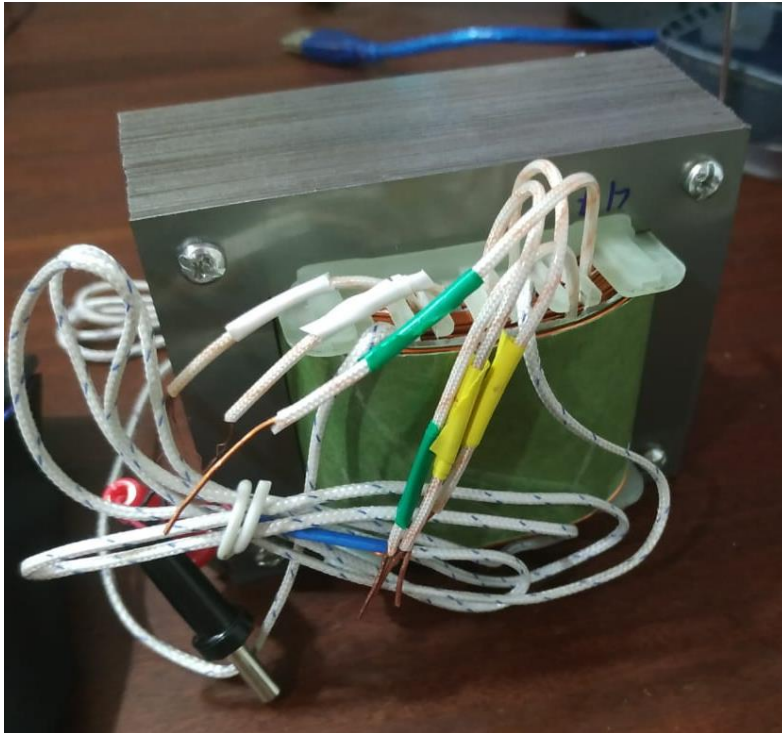


Figura 19. Transformador Bobinado.

Luego se realizó un primer diseño y se montó en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Nacional sede Medellín, la justificación del montaje realizado es un concepto termodinámico, el cual consiste en que un gas (en este caso el aire) a mayor temperatura disminuye su densidad, y por ende tiende a subir, con el objetivo de aumentar este flujo de calor se instala el ventilador en la parte inferior, para que aumente el flujo de aire caliente desde abajo hacia arriba, por lo tanto, es necesario elevar el transformador como se muestra a continuación.



Figura 20. Montaje inicial para el transformador

Para la construcción del variac es necesario diseñar un sistema por medio del cual se va a variar la potencia, para ello, es necesario lijar el lado donde se construyó el variac, esto con el objetivo de retirar el barniz y lograr contacto entre las espiras del devanado y la escobilla, el funcionamiento consiste en usar un destornillador para generar un torque en el tornillo, y así subir o bajar la escobilla. Durante la construcción, se observó que había un problema en el diseño, y fué que la escobilla giraba con todo el tornillo, problema que se solucionó mediante un sistema de arandelas que permite que la escobilla se pueda deslizar sobre su propio eje, para así cumplir el objetivo final.

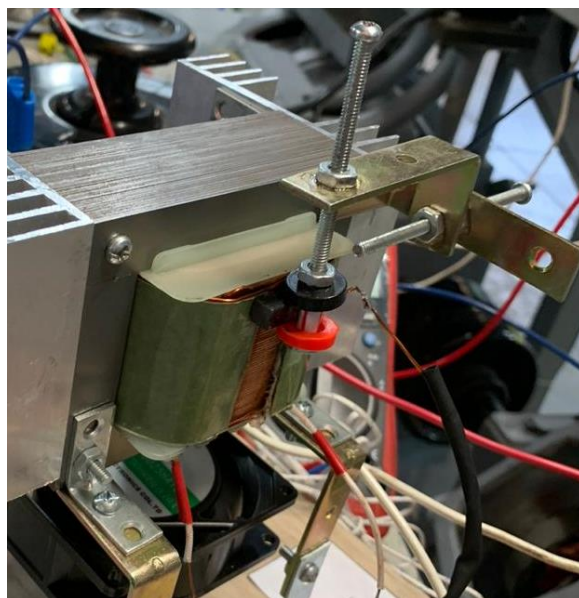


Figura 21. Montaje de Variac en el transformador.

Este procedimiento se realizó en el área de mantenimiento de la universidad, y se rediseñó el montaje para los disipadores de calor.



Figura 22. Proceso de construcción del transformador.

Finalmente se muestra el montaje para las pruebas que se realizaron en el laboratorio, para comprobar el funcionamiento y valores nominales de construcción del transformador:

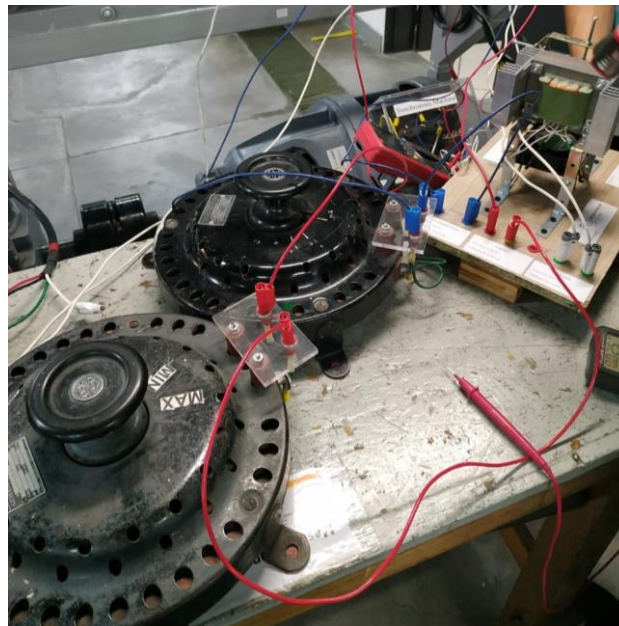


Figura 23. Montaje para pruebas del transformador en el laboratorio.

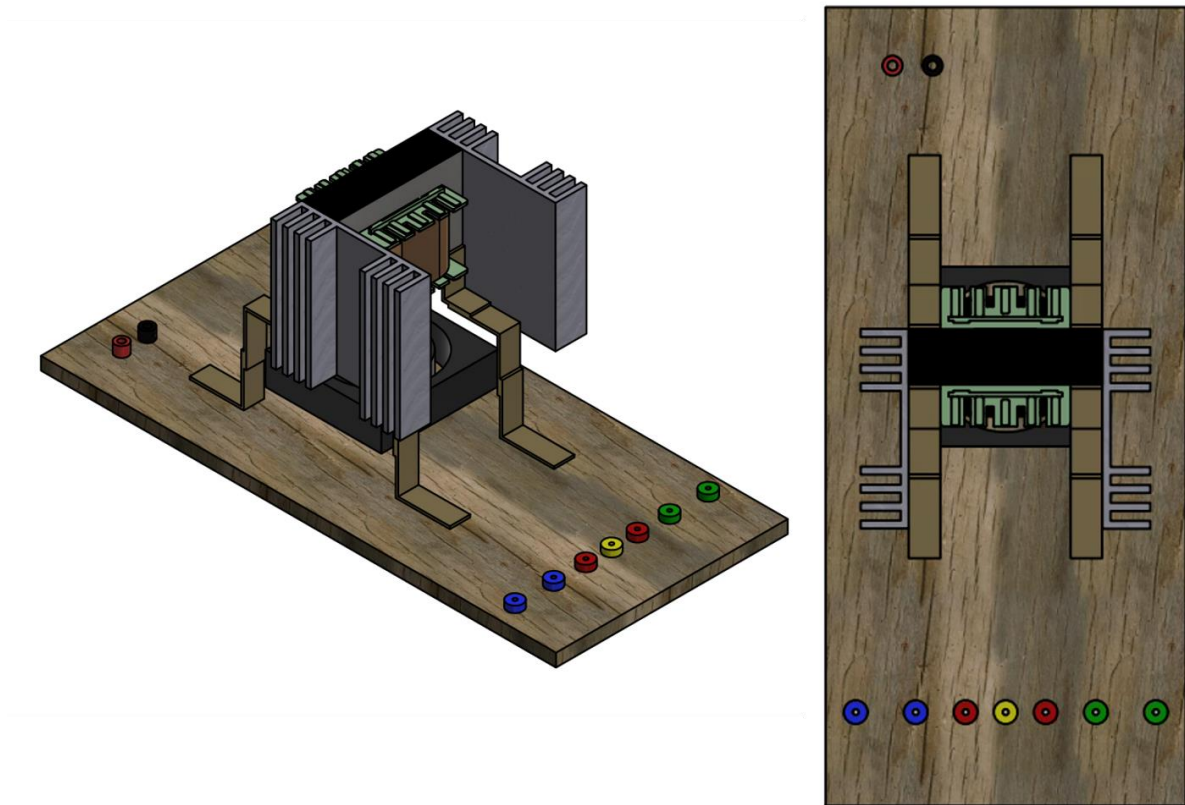


Figura 24. Modelo Final para la construcción del transformador Vista A.

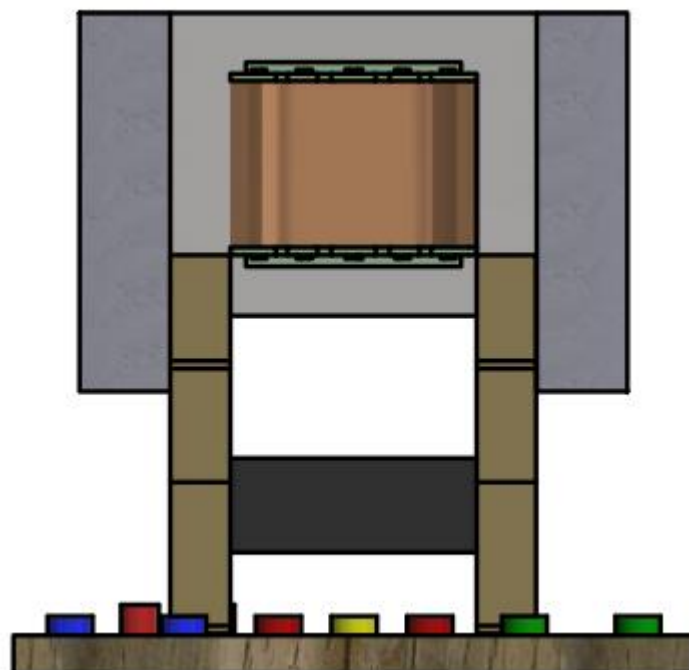


Figura 25. Modelo Final para la construcción del transformador Vista B.

6. Pruebas del transformador:

6.1 Prueba de Aislamiento

Es una prueba de rutina que consiste en conectar un medidor de resistencia de aislamiento (Megger) entre cada una de las bobinas y el núcleo. También se suele realizar la prueba entre las bobinas para garantizar que el uso del transformador sea seguro, pues se detectaría un posible cortocircuito en cualquiera de las pruebas realizadas.

A continuación se presenta las resistencias de aislamiento que se obtuvieron de esta prueba, con un tiempo de medición igual a 10 segundos:

Resistencia Aislamiento	
Núcleo-Primario	10GΩ
Núcleo-Fijo	11,5GΩ
Núcleo-Variac	6,9GΩ
Núcleo-Ventilador	9,6GΩ
Primario-Fijo	15,5GΩ
Primario-Ventilador	14,5GΩ
Primario-Variac	17GΩ
Fijo-Ventilador	8,2GΩ
Fijo-Variac	13GΩ
Ventilador-Variac	6,6GΩ

Tabla 7. Resistencias de aislamiento.

6.2. Curva de Magnetización

Las siguientes gráficas muestran la relación entre el voltaje de entrada V1 y la corriente entrada I1 después de la construcción del transformador final, donde se va poder apreciar que el punto de operación antes propuesto se mantuvo

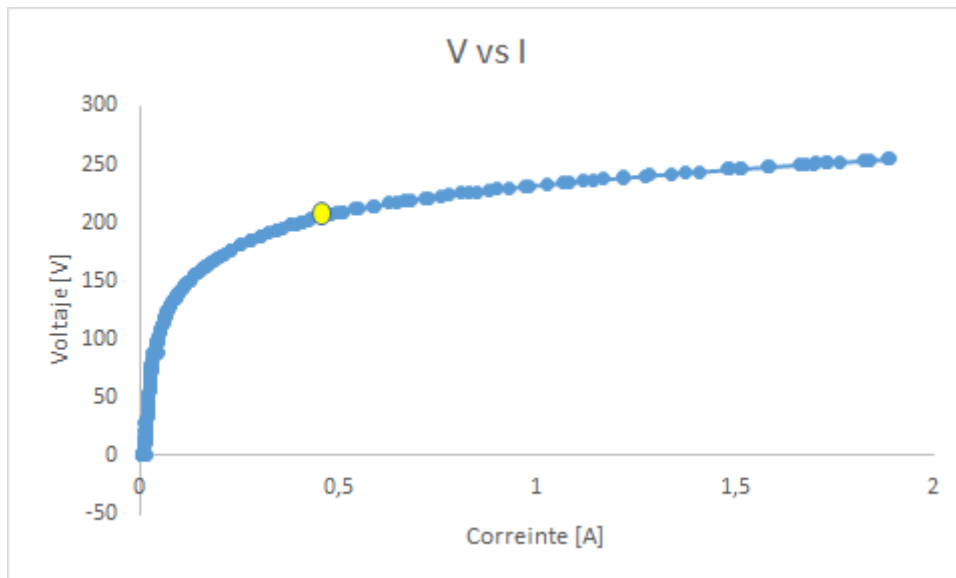


Figura 26. Curva obtenida V vs I final.

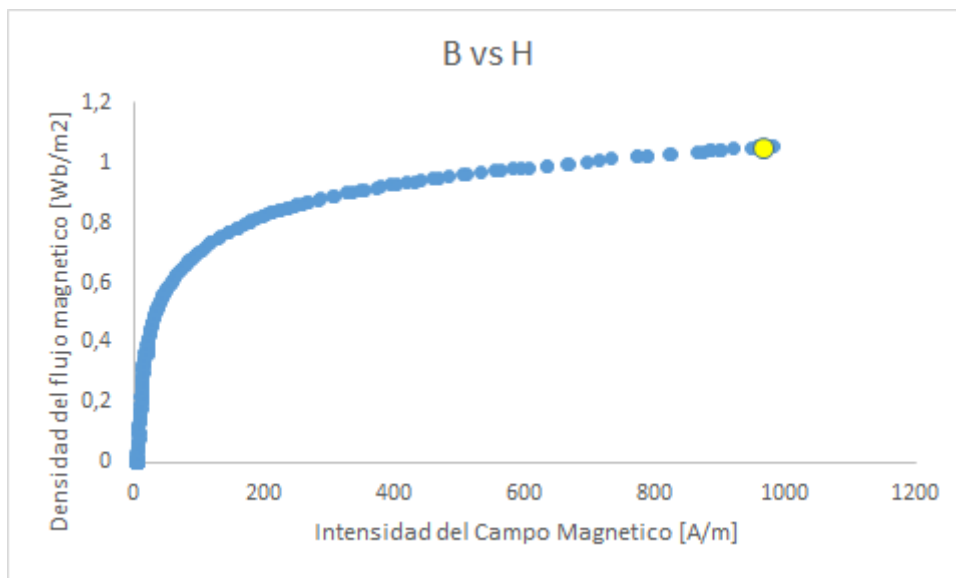


Figura 27. Curva obtenida B vs H final.

Comparando las gráficas de V vs I y B vs H mostradas anteriormente con las figuras 9 y 10 respectivamente, se puede observar que se conserva el punto de operación de 0.43 V/vuelta, lo cual corresponde a 1 T, obteniendo un comportamiento similar en las pruebas antes y después de terminado el bobinado.

No es posible comparar la gráfica de magnetización hallada en el laboratorio (ver figura 27) con la data por el fabricante (figura 5) ya que los valores de temperatura no son compatibles para ambas gráficas, esto se debe al hecho de que la temperatura medida cuando se realizó la prueba no superó los 50°C y la tabla que nos da el fabricante considera una temperatura de 80°C .

6.4. Prueba de vacío

La prueba de vacío se hace con el objetivo de determinar los parámetros de la rama de magnetización R_m y X_m , las cuales modelan las pérdidas magnéticas ocasionadas por las corrientes parásitas y pérdidas por histéresis. En esta prueba se alimenta el transformador al voltaje nominal de construcción, luego se debe medir voltaje, corriente y potencia de vacío con estos datos utilizando el circuito equivalente mostrado a continuación.

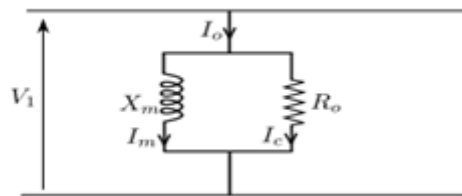


Figura 28. Modelo

prueba de vacío.

circuito equivalente

Para medir estos parámetros se conecta un variac y el janitza de tal manera que se puedan medir los datos necesarios para la obtención de dichos parámetros.

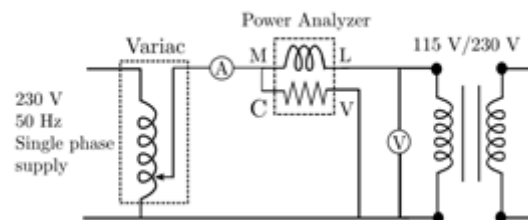


Figura 29. Esquema de conexión para prueba en el laboratorio.

Los datos medidos en el laboratorio son los siguientes:

Prueba de vacío	
Medidas	Valor
Voltaje vacío [V]	191,6
Corriente de vacío [A]	0,33
Potencia de vacío [W]	13,5

Tabla 8. Datos prueba de vacío

A continuación se muestran los cálculos para obtener las impedancias de la rama de magnetización.

$$fp = \frac{P}{V \cdot I_o} = \frac{13,5}{191,6 \cdot 0,33} = 0,214$$

$$\theta = \cos^{-1}(0,214) = 77,67^\circ$$

luego,

$$R_m = \frac{V}{I_o * \cos(\theta)} = \frac{191,6}{0,33 * 0,214} = 2719,3 \, \Omega$$

$$X_m = \frac{V}{I_o * \sin(\theta)} = \frac{191,6}{0,33 * 0,9768} = 594,31 \, \Omega$$

De los datos obtenidos se puede observar que la potencia necesaria para magnetizar el núcleo es aproximadamente 13,5W y el valor eficaz de la corriente es de 0.33A, de esta última se muestra a continuación su forma de onda para el punto de operación:

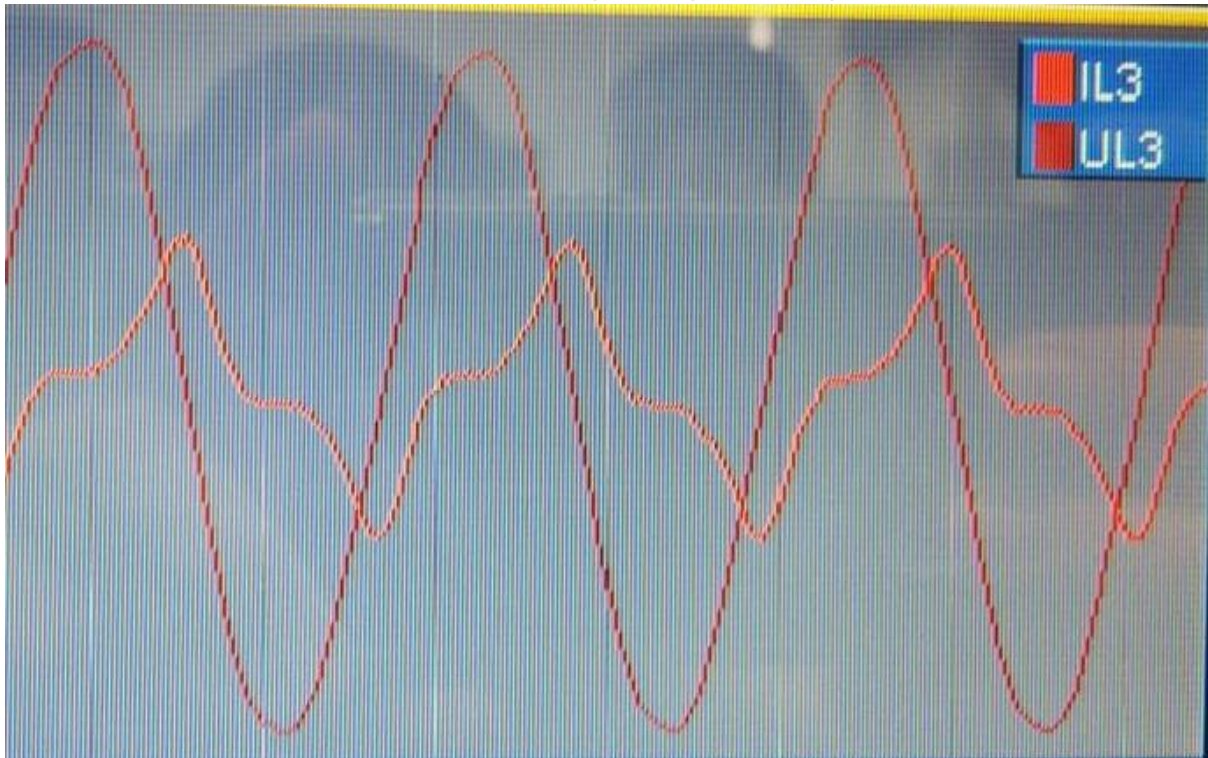


Figura 30. Forma de onda de voltaje y la corriente de vacío para el punto de operación.

De la imagen anterior, se observa que la forma de la corriente de vacío no es sinusoidal, esto se debe a la saturación del núcleo, y a su vez, confirmando que la inductancia de magnetización X_m no es un elemento lineal.

6.5 Prueba en DC:

En esta prueba se mide la resistencia de cada uno de los devanados, utilizando la ley de ohm $R = \frac{V}{I}$, para esto se conecta cada uno de los devanados a una fuente DC donde se sube el voltaje levemente hasta alcanzar casi la corriente nominal del devanado, se toman los datos de voltaje y corriente y se procede a encontrar la resistencia.

$$R1 = \frac{V_{DC1}}{I_{DC1}} = \frac{3,9V}{0,998A} = 3,947 \, \Omega$$

$$R2 = \frac{VDC2}{IDC2} = \frac{1.65.V}{1.583A} = 1.042 \Omega$$

$$R3 = \frac{VDC3}{IDC3} = \frac{0.63.V}{1.460A} = 0.432 \Omega$$

$$R4 = \frac{VDC4}{IDC4} = \frac{1.05.V}{0.031A} = 33.87 \Omega$$

Donde $R1, R2, R3, R4$ son las resistencias del primario, fijo, variac y ventilador respectivamente.

6.6. Prueba corto circuito:

Esta prueba tiene como propósito determinar las impedancias presentes en los devanados del transformador, las cuales hacen referencia a las pérdidas generadas por el cobre, estas impedancias deben variar de devanado a devanado, es por esto que se debe realizar para cada una de las bobinas, es decir, se hace la prueba de corto circuito para fijo-variador, primario-variador, primario - fijo, primario-ventilador.

Para este procedimiento se utiliza el circuito aproximado número dos como se muestra en la figura 30, se debe considerar que para esta prueba la corriente a la cual está sometido el transformador debe de ser aproximadamente la nominal.

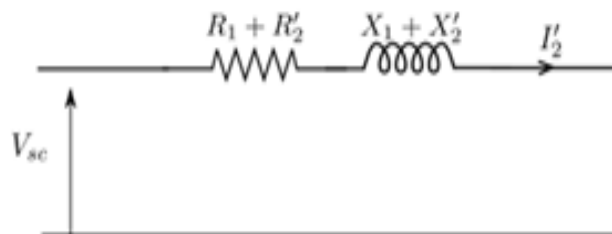


Figura 30. Circuito aproximado para la prueba de cortocircuito.

Para esta prueba se deben medir voltaje, corriente y potencia de entrada para cada caso mencionado anteriormente

Prueba de cortocircuito primario(1)-variador(3)

Primario - Variac	prueba de corto circuito 1-3	
	medidas	valor
	Voltaje Entrada [V]	12,8
	corriente Entrada [A]	0,21

	potencia de entrada [W]	2,7
	corriente corto circuito [A]	1,97

Tabla 9. Valores de prueba de cortocircuito entre los devanados 1-3.

Prueba de cortocircuito primario(1)-fijo(2)

Primario - FIJO	prueba de corto circuito 1-2	
	medidas	valor
	Voltaje Entrada [V]	11,6
	corriente Entrada [A]	1,25
	potencia de entrada [W]	14,3
	corriente corto circuito [A]	2,37

Tabla 10. Valores de prueba de cortocircuito entre los devanados 1-2..

Prueba de cortocircuito primario(2)-ventilador(3)

Primario - Ventilador	prueba de corto circuito 1-4	
	medidas	valor
	Voltaje Entrada [V]	5,6
	corriente Entrada [A]	0,04
	potencia de entrada [W]	0,28
	corriente corto circuito [A]	0,1

Tabla 11. Valores de prueba de cortocircuito entre los devanados 1-4.

Prueba de cortocircuito fijo(2)-variac(3)

Fijo - Variac	prueba de corto circuito 2-3	
	medidas	valor
	Voltaje Entrada [V]	6,9
	corriente Entrada [A]	0,48
	potencia de entrada [W]	3,2
	corriente corto circuito [A]	2

Tabla 12. Valores de prueba de cortocircuito entre los devanados 2-3.

Para cada una de las pruebas se aplica las siguientes fórmulas para hallar las impedancias equivalentes:

$$Z_{eqij} = \frac{V_{ccij}}{I_{ccij}^2}$$

	R[Ω]	X[Ω]
primario(1)-fijo(2) (z12)	9.152	1.536
primario(1)-variac(3) (z13)	56.689	22.394
primario(1)-ventilador(4) (z14)	125.000	63.047
fijo(2)-variac(3) (z23)	13.889	3.706

Tabla 13. Impedancias equivalente vistas desde el devanado i.

Resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones podemos obtener los valores de cada una de las impedancias (z1,z2,z3,z4)

$$z_{12} = z_1 + a_{12}^2 z_2$$

$$z_{13} = z_1 + a_{13}^2 z_3$$

$$z_{14} = z_1 + a_{14}^2 z_4$$

$$z_{23} = z_2 + a_{23}^2 z_3$$

	R[Ω]	X[Ω]
Z primario (z1)	3.947	22.31031
Z secundario (z2)	1.042	5.72100
Z Variac (z3)	0.432	0.00094
Z ventilador (z4)	33.87	13.54272

Tabla 14. Impedancias de cada devanado.

En la prueba también se tomó la temperatura de estabilización de los devanados a corriente nominal, la cual tuvo un valor de 55°C.

7. Circuito equivalente

Con los datos obtenidos de las pruebas de vacío, cortocircuito y DC se obtiene el circuito equivalente para el transformador, para una frecuencia nominal de 60Hz y una temperatura ambiente de 25°C.

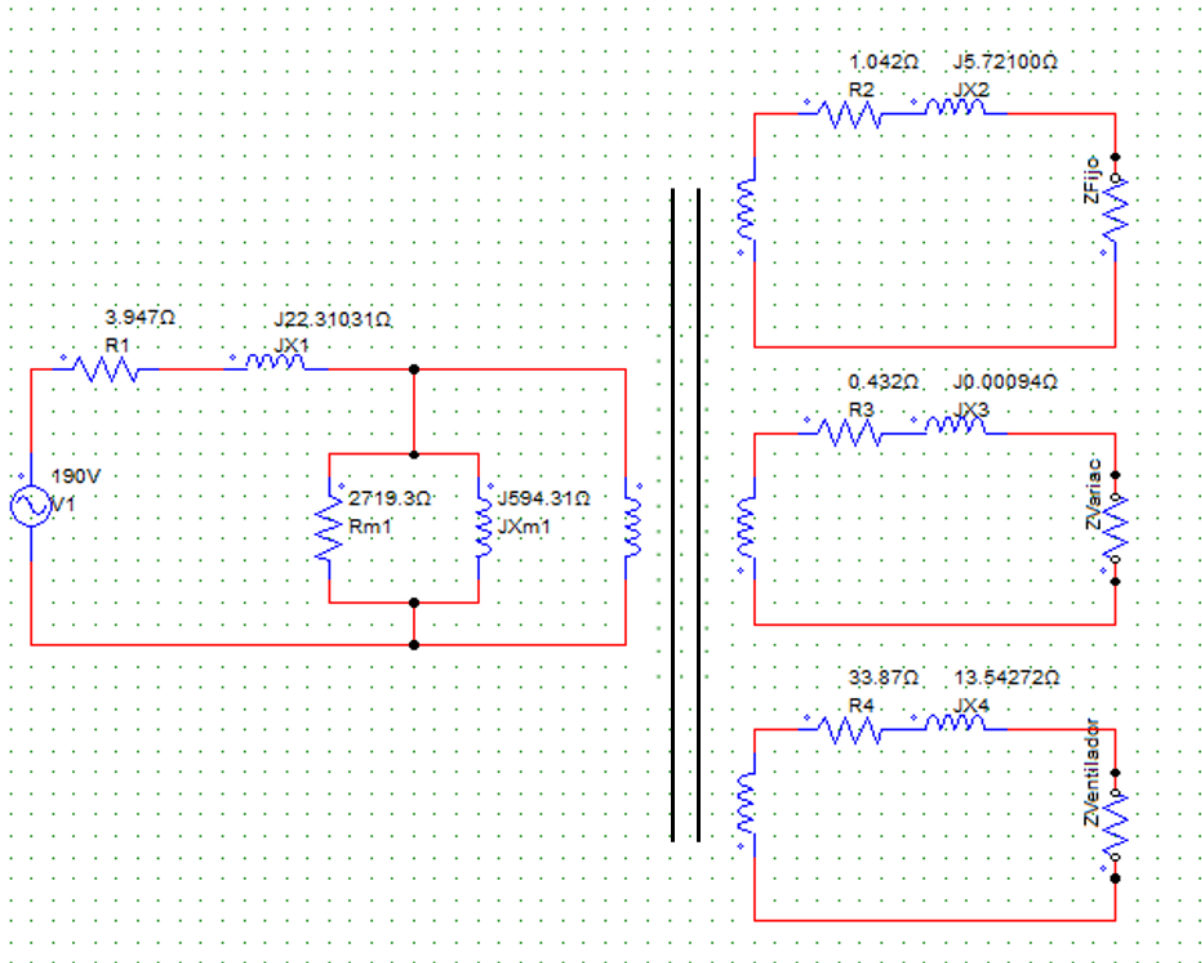


Figura 31. Circuito equivalente exacto del transformador.

8. Corrección de resistencias a 85°

Para la corrección en temperatura, la resistencia está dada por

$$R = R_0(1 + \alpha \nabla T)$$

En donde:

R_0 = Resistencia a temperatura ambiente (25°C).

α = Coeficiente de temperatura del material.

∇T = Cambio en la temperatura.

$\alpha_c = 3,9e - 3 [^{\circ}C^{-1}]$ Para el cobre

$\alpha_H = 5e - 3 [^{\circ}C^{-1}]$ para el hierro

Considerando las ecuaciones presentadas, se procede a calcular las resistencias a 85°C:

$$R1 = 3.947 * (1 + (3.9e - 3) * 60) = 4.87 \, \Omega$$

$$R2 = 1.042 * (1 + (3.9e - 3) * 60) = 1.2858 \, \Omega$$

$$R3 = 0.432 * (1 + (3.9e - 3) * 60) = 0.533 \, \Omega$$

$$R4 = 33.87 * (1 + (3.9e - 3) * 60) = 41.79 \, \Omega$$

$$Rm = 2719.3 * (1 + (5e - 3) * 60) = 3535.09 \, \Omega$$

9. Eficiencia del transformador

Para medir la eficiencia η se tomaron los datos de potencia activa P en el primario y en cada uno de los devanados del secundario a carga nominal y se calculó de la siguiente forma:

Eficiencia a carga nominal	
Medida	Valor
Potencia de entrada	323 W
Potencia fijo	240 W
Potencia variac	50 W
Potencia ventilador	11 W
Potencia salida	301 W

Tabla 15. Datos para cálculo de eficiencia.

$$\eta = \frac{P2 + P3 + P4}{P1} = 0,9318885449 = 93.188\%$$

10. Regulación en el transformador

La regulación de voltaje está determinado por la relación entre el voltaje secundario en vacío y el voltaje secundario a plena carga, esto hace referencia a la caída de tensión en las terminales con las condiciones mencionadas. Se desea hallar la regulación experimental; para ello utilizamos la siguiente ecuación:

$$\Delta V = \frac{V20 - V2}{V2} * 100$$

Los valores obtenidos en la práctica son los siguientes:

Regulación de voltaje práctica	
Medida	Valor
Voltaje secundario vacío (V20)	190,4 V
Voltaje secundario nominal (V2)	187,3 V
Regulación	1,628151261 %

Tabla 16. Regulación de voltaje práctica.

11. Comparación del transformador con y sin ventilación forzada

Se llevará el transformador a una potencia mayor a la nominal en función de la temperatura máxima estable que pueden soportar los componentes del aislamiento (barniz, carrete, papel), para observar cuánto se puede sobrecargar el transformador y como se comportan las variables de (Voltaje, Corriente, Potencia).

Medida sin ventilación forzada	Valor		Medida Con ventilación forzada	Valor
Potencia de entrada	323 W		Potencia de entrada	682 W
Voltaje entrada	191,7 V		Voltaje entrada	188,7 V
Voltaje fijo	95,1 V		Voltaje fijo	79,8 V
Voltaje ventilador	104,8 V		Voltaje ventilador	93,4 V
Voltaje variac	21,53 V		Voltaje variac	16,7 V
Corriente fijo	2,58 A		Corriente fijo	5,55 A
Corriente ventilador	0,1 A		Corriente variac	3,87 A
Corriente variac	1,66 A		Corriente Ventilador	0.1 A
Temperatura	55°C		Temperatura	150°C

Tabla 17. Comparación de las medidas del transformador con y sin ventilación forzada.

Donde se puede observar que la potencia en el primario con ventilación forzada es más del doble de la potencia nominal sin ventilación forzada nominal, pero las regulaciones de voltaje en cada uno de los devanados del secundario caen un 16% en promedio y las corrientes suben casi al doble de la corriente nominal en cada uno de los devanados y con ellas las pérdidas en el cobre $P_c = I^2 R$ superan casi 4 veces las pérdidas en el cobre a la potencia nominal; las pérdidas en el hierro si se mantienen "constantes" ya que dependen es de el voltaje de entrada(V1).

12. Placa característica del transformador

Nombre o razón social del fabricante	Andrés Mateo Alzate David urbaez leon Laura Qinchia Dominguez Brandon Bastidas Macías Angel Ricardo Marín
Clase de transformador	Transformador para aplicación específica
Número de serie dato por por el fabricante.	NA.
Año de fabricación	2020
Número de fases	1 (Monofásico)
Potencia nominal para cada método de refrigeración si tiene varios.	11,008 VA
Frecuencia nominal.	60 Hz
Tensiones nominales, número de derivaciones y tensiones para cada una.	Primario: 309,329 W Fijo:258,1094 W Ventilador: 11,008 W Variac:41,289,065 W
Corriente nominal	Primario:1,6202A Fijo:2,448 A Ventilador:0,1 A Variac:2,5762 A
Tensión de cortocircuito a la corriente nominal, valor referido 85°C, y si es necesario su potencia de referencia.	NA.
Método de refrigeración forzada.	Ventilación forzada.
Ubicación y Marcación de terminales en el tanque.	NA.
Corriente de cortocircuito simétrica	NA.
Duración del cortocircuito simétrico máximo permisible.	NA.
Volumen del líquido aislante, en litros	NA.
Clase de aislamiento, para transformadores secos.	Clase F.
Peso total en kilogramos.	NA.
Nivel básico de aislamiento de cada devanado, BIL o NBA.	NA.
Peso de la parte activa extraíble, para transformadores mayores a 500kVA.	NA.

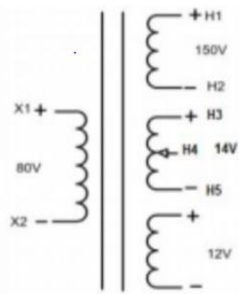
Diagrama de conexiones	
Líquido aislante	NA.
Condición de instalación y aumento de temperaturas diferentes a los normalizados.	NA.
Nombre de cliente y número del contrato, cuando se conozca.	NA.
Presión y vacío del transformador, para transformadores de potencia mayor o igual 1000 kVA.	NA.
Diagrama fasorial.	NA.
Material del devanado.	Cobre

Tabla 18.Placa característica del transformador.

13. Análisis de costos

A continuación se presenta una tabla con todos los gastos que surgieron en el proceso de diseño y construcción del transformador:

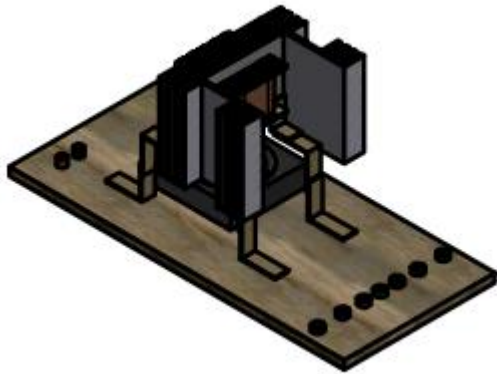
DESCRIPCIÓN	PRECIO [\$ COP]
2 Termocupla	6.500
Núcleo + Carrete + Cable AWG	31.000
Motor 11W	28.000
Láminas en "L"	4.200
Disipador de calor	12.000
Tornillos	25.800
Brocas	8.000
Termoencogible + Interruptor	2.000
Bobinado + Cables AWG	80.000
9 Borneras	22.800

Escobilla	15.000
Transporte	10.000
TOTAL	245.300

Tabla 19.Costos para la construcción del transformador.

14. Conclusiones

- La elaboración de un transformador siempre estará limitada para las características que se requieran. Esto se debe a que el espacio que se tiene para realizar los bobinados está limitado por la misma estructura del núcleo, por ende limitará las variables del transformador como son la potencia, voltaje, corriente. Esto quiere decir que no se puede lograr una potencia que esté por fuera de esta limitación, pues el espacio para el montaje no lo permitirá. Teniendo en cuenta estas limitaciones se establecen los parámetros más fundamentales a los que se desea llegar, mientras los otros parámetros quedarán en función de estos valores establecidos, siguiendo esto se puede hallar un modelo, el cual permite sacar una potencia considerable sin sobrepasar las restricciones determinadas.
- Con la intención de obtener la mayor potencia se pensó en rebobinar el primario y el fijo a doble hilo, esto hace que se pueda optimizar de una mejor manera el espacio, ya que a menor corriente menor es el calibre, disminuyendo así los espacios generados entre devanados. Este diseño no fue posible debido a que realizar el bobinado se vuelve más complejo, por lo que se recomiendan otros métodos para aumentar la potencia como lo son el embobinado mecánico, evitando completamente la intervención del fabricante.
- En el desarrollo del diseño para el proyecto, se planteó un algoritmo para seleccionar el calibre de un conjunto de conductores con el fin de maximizar la potencia nominal del transformador. En general el algoritmo funciona para cualquier diseño bajo las mismas restricciones de espacio.
- A la hora de realizar las pruebas se observó un factor importante que puede ser determinante en el diseño, este consiste en el sistema de refrigeración, el cual aportó de manera positiva para obtener datos más eficientes. Inicialmente se realizó la toma de datos sin refrigeración y luego se obtuvieron con refrigeración, donde se logró duplicar la potencia de entrada a una temperatura estable, es decir, no se observó fenómenos relevantes en el transformador que pudieran ocasionar daños. Sumado a ello, se ubicó de manera estratégica los disipadores de calor, de tal forma que tuvieran un aporte significativo en este aspecto. Por tal motivo, se concluye la importancia de tener una buena base de refrigeración, no solo para mejorar las características operacionales del transformador, sino también que ayuda a conservar el sistema de aislamiento, y por ende, la vida útil de las máquinas.



15. Bibliografía

- ICONTEC. NTC 618, TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS. PLACA DE CARACTERÍSTICAS. (1999/09/15). [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/19450717-Norma-tecnica-ntc-colombiana-618.html>
- Blanco Benito.A. Máquinas eléctricas. (8/10/2018). [En línea]. Disponible en: http://docentes.uto.edu.bo/ablancob/wp-content/uploads/maquina_electrica.pdf
- ICONTEC. NTC 1358, PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA TRANSFORMADORES. (1998/10/05). [En línea]. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/2379/4/AguilarGarc%C3%ADaJaimeAlejandro2015Anex>.
- Guru, B.S., & Hiziroglu, H.R. (2001). Electric Machinery and Transformers. Third Edition. New York, Oxford University Press