



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
VALPARAÍSO



**Julio Patricio Jara Muñoz**

**Modelamiento y evaluación electromagnética  
de un transformador de distribución trifásico  
en distintas condiciones de carga.**

**Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrico**



**Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 8 de Abril de 2019



Modelamiento y evaluación electromagnética de un transformador de distribución trifásico en distintas condiciones de carga.

Julio Patricio Jara Muñoz

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico,  
aprobada por la comisión de la  
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la  
Facultad de Ingeniería de la  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
conformada por

Sr. Werner Jara Montecinos

Profesor Guía

Sr. Paulino Alonso Rivas

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth

Secretario Académico

Valparaíso, 8 de Abril de 2019

# Índice general

Introducción.....	3
Objetivos generales.....	5
Objetivos específicos.....	5
1 Antecedentes generales.....	6
1.1 Transformadores de poder sometidos a cargas por sobre su nominal. ....	6
1.2 Consecuencias generales.....	7
1.3 Efectos y riesgos de una carga de emergencia de corta duración. ....	7
1.4 Conclusiones del capítulo .....	8
2 Marco teórico.....	9
2.1 Cantidades fundamentales del campo electromagnético. ....	9
2.2 Transformadores en aceite y sus componentes.....	11
2.2.1 Núcleo.....	11
2.2.2 Circuito eléctrico (Devanados).....	13
2.2.3 Aislamientos sólidos.....	14
2.2.4 Líquido (aceite).....	16
2.2.5 Tanque.....	17
2.2.6 Acabado.....	18
2.3 Clasificación de transformadores.....	18
2.4 Tipos de ventilación.....	18
2.5 Pérdidas de los Transformadores.....	19
2.6 Rendimiento o Eficiencia.....	20
2.7 Modelo eléctrico del transformador.....	21
2.8 Algunos aspectos dinámicos del modelo térmico.....	23
2.9 Modelo de temperatura aceite superior.....	25
2.9.1 Tasa relativa de envejecimiento.....	26
2.10 Conclusiones del capítulo.....	26
3 Modelo térmico analítico del transformador.....	27
3.1.1 Solución de las ecuaciones diferenciales.....	27
3.1.2 Conversión a ecuaciones de diferencia.....	29

---

3.1.3 Ejemplo práctico metodo ecuaciones de diferencia.....	32
3.2 Conclusiones del capítulo .....	37
<b>4 Desarrollo y análisis del transformador en elementos finitos.....</b>	<b>38</b>
4.1 Presentación del dispositivo. ....	38
4.2 Dimensiones y características de sus componentes. ....	41
4.2.1 Núcleo. ....	41
4.2.2 Devanados de alta y baja tensión .....	42
4.2.3 Derivación de Yugo .....	44
4.2.4 Derivación de Pared.....	45
4.2.5 Marcos de los Yugos .....	47
4.2.6 Tanque .....	48
4.2.7 Barras de distribución .....	49
4.3 Descripción física del modelo. ....	51
4.3.1 Descripción de la malla. ....	51
4.3.2 Parámetros físicos del núcleo.....	53
4.3.3 Parámetros físicos del tanque. ....	53
4.3.4 Parámetros físicos de los devanados. ....	54
4.3.5 Párametros físicos de los marcos de hierro. ....	55
4.3.6 Parámetros físicos de las derivaciones. ....	56
4.3.7 Parámetros eléctricos del circuito. ....	59
4.3.8 Definición de la aplicación.....	60
4.4 Ensayo a plena carga. ....	61
4.4.1 Densidad de flujo magnético en el núcleo. ....	61
4.4.2 Densidad de flujo magnético en las derivaciones. ....	63
4.5 Análisis de pérdidas.....	66
4.5.1 Pérdidas en el núcleo y derivaciones.....	66
4.5.2 Pérdidas en los devanados. ....	69
4.5.3 Conclusiones del capítulo.....	73
<b>5 Adaptación del modelo computacional a un Transformador Real .....</b>	<b>74</b>
5.1 Descripción General del Dispositivo real .....	74
5.1.1 Dimensiones y características de sus componentes. ....	76
5.1.2 Núcleo.....	77
5.2 Análisis de pérdidas.....	78
5.2.1 Pérdidas en el núcleo.....	78
5.2.2 Pérdidas en los devanados. ....	80
5.2.3 Conclusiones del capítulo.....	82
<b>Discusión y conclusiones.....</b>	<b>83</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>85</b>

# Introducción

El Transformador de potencia cumple una función importante para el transporte de energía eléctrica a grandes distancias, este permite elevar o disminuir voltajes y de esta forma transformar la potencia eléctrica a valores adecuados para su transmisión o distribución según se necesite. Así, alrededor de 130 años, este dispositivo pasó a ser una revolución técnica que influyó considerablemente en el desarrollo de la sociedad moderna. En aquellos años se observó la creciente necesidad de energía en las ciudades e industrias, las cuales ya no podían ser abastecidas por pequeños generadores y se necesitó transportar mayor potencia desde otras fuentes, debido a esto era necesario construir extensas líneas eléctricas las cuales necesitaban un aumento de la tensión para reducir el valor de la corriente en las líneas de alta tensión (ahora media tensión) y así reducir las pérdidas. Este fue el momento del nacimiento de un nuevo componente en el sistema eléctrico: el transformador de potencia.

Considerando lo anterior, se entiende que un dispositivo eléctrico de tal importancia es necesario estudiarlo detalladamente para así proporcionar mejoras en cuanto a su rendimiento, durabilidad y dimensionamiento para los distintos usos en la industria eléctrica. El presente trabajo muestra un completo análisis alrededor de sus características técnicas fundamentales, el cual proporciona una visión detallada de sus dimensiones y cualidades físicas de los materiales que lo forman para así comprender la función de sus componentes y proceder al desarrollo de un modelo en elementos finitos que represente de manera óptima los fenómenos electromagnéticos que ocurren en distintas condiciones de carga.

El eje principal de este trabajo apunta a diseñar y evaluar un modelo electromagnético de un transformador usando el método para la resolución de diversos problemas en ingeniería y física. El método es pensado para usarse en computadoras, las cuales han tenido grandes avances de procesamientos de información, en este caso la resolución de ecuaciones asociadas a un problema físico sobre geometrías complejas. Este método entrega resultados de problemas en general muy complejos, para este caso en particular se enfocará en los fenómenos electromagnéticos que se desarrollan en un transformador de poder en distintas condiciones de carga.

Este trabajo tiene la particularidad de detallar aspectos técnicos de importancia para el diseño de transformadores, información poco accesible en general. Esta parte del proyecto describe y analiza detalles constructivos y funcionales del núcleo, bobinados y ciertos componentes necesarios para mejorar su eficiencia dentro del tanque que contiene al dispositivo.

## **Objetivos generales**

- Desarrollar y evaluar el modelo electromagnético de un transformador trifásico de potencia.

## **Objetivos específicos**

- Investigar detalles técnicos de los transformadores.
- Investigar y analizar modelo de transformador en elementos finitos.
- Desarrollar modelo electromagnético en elementos finitos.
- Analizar y obtener resultados sobre las características de operación del transformador.
- Validar modelo comparándolo con características y ensayos de un transformador real.

# 1 Antecedentes generales

En ocasiones como lo son las situaciones de respaldo o fallas es necesario someter a los transformadores de distribución a cargas que superan sus indicaciones nominales, lo que conlleva un acelerado envejecimiento de su aislante, acelerando el desgaste de su vida útil. Si bien esto siempre sucederá, es necesario hacer un análisis sobre los efectos que tiene sobre el equipo, para así poder prevenir o anticipar el cambio del equipo en cuestión.

## **1.1 Transformadores de poder sometidos a cargas por sobre su nominal.**

La expectativa de vida normal es una base de referencia convencional para el servicio continuo bajo temperatura ambiente de diseño y condiciones de funcionamiento asignadas. La aplicación de una carga superior a la de la placa de características y/o de una temperatura ambiente superior a la de diseño implica un grado de riesgo y un envejecimiento acelerado. Es el objeto de esta parte de la norma IEC60067 identificar tales riesgos e indicar como, dentro de las limitaciones, los transformadores se pueden cargar por encima de los valores de la placa característica. Estos riesgos se pueden reducir por el comprador especificando claramente las condiciones de carga máxima y por el fabricante teniendo estas en cuenta en el diseño del transformador.

## 1.2 Consecuencias generales

Las consecuencias de cargar un transformador por encima de su placa característica son las siguientes:

- Las temperaturas de los arrollamientos, calas, conexiones, aislamientos y aceite se incrementarán y pueden alcanzar niveles inaceptables.
- La densidad de flujo de dispersión fuera del círculo magnético aumenta, causando un calentamiento adicional por efecto Foucault en las partes metálicas atravesadas por el flujo de dispersión.
- Como cambia la temperatura, cambiará la humedad y el contenido en gas en el aislamiento y en el aceite.
- Los pasatapas, cambiadores de tomas, terminaciones de cables y los transformadores de intensidad también se expondrán a esfuerzos elevados que reducen sus márgenes de diseño y aplicación.

## 1.3 Efectos y riesgos de una carga de emergencia de corta duración.

Un régimen de carga incrementada de corta duración conducirá a una condición de servicio que tiene un incremento de riesgo de fallo. La sobrecarga de emergencia de corta duración causa un nivel de punto caliente en los conductores susceptible de conducir a una reducción temporal de la resistencia dieléctrica. Sin embargo, la aceptación de esta condición para un corto espacio de tiempo puede ser preferible a una pérdida de suministro. Este tipo de carga raramente se espera que ocurra, y debe ser reducida rápidamente o desconectar el transformador en un breve espacio de tiempo para evitar el fallo. La duración admisible de esta carga es más corta que la constante de tiempo térmico del transformador y depende de la temperatura de funcionamiento antes del aumento de la carga; típicamente, sería menor a media hora.

- El riesgo principal de fallos a corto plazo, es la reducción de la rigidez dieléctrica debido a la posible presencia de burbujas de gas en una región de gradiente eléctrico elevado, esto es en los arrollamientos y las conexiones. Estas burbujas se generan probablemente cuando las temperaturas del punto caliente sobrepasan los 140 °C para un transformador con un contenido de humedad en el aislamiento del arrollamiento alrededor del 2%. Esta temperatura crítica descenderá cuando la concentración de humedad aumente.

En las partes metálicas desnudas, excepto en arrollamientos, que no estén en contacto térmico directo con el aislamiento celulósico pero están en contacto con aislamiento no celulósico (por ejemplo, papel aramida o fibra de vidrio) y con el aceite del transformador, pueden alcanzar rápidamente temperaturas elevadas. No se debería exceder una temperatura de 180 °C.

- La degradación temporal de las propiedades mecánicas a temperaturas elevadas puede reducir la capacidad de soportar los esfuerzos de corto circuito.

- El aumento de la presión en los pasatapas puede provocar un fallo debido a las fugas de aceite. También puede aparecer gases en los pasatapas tipo condensador si la temperatura de aislamiento excede alrededor de 140 °C
- La dilatación del aceite podría provocar un rebosamiento del mismo en el conservador
- El corte de corrientes excesivamente altas en el cambiador de tomas podría ser peligroso.

Las limitaciones sobre las temperaturas máximas del punto caliente en arrollamientos, circuito magnético y partes estructurales se basan en consideraciones de riesgos de corta duración.

Los riesgos de corta duración normalmente desaparecen después de que la carga ha sido reducida a un nivel normal, pero es necesario que hayan sido claramente identificados y aceptados por todas las partes involucradas, por ejemplo, planificadores, propietarios y operadores [1].

## **1.4 Conclusiones del capítulo**

Se pudo apreciar lo las consecuencias de someter un transformador a sobrecarga, que si bien no debiese hacerse, es imposible no hacerlo en ciertos momentos debido a estados de respaldos de emergencia en la distribución, así es necesario estudiar y evaluar los riesgos que conlleva para de esta manera mantener los dispositivos en buenas condiciones.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Cantidades fundamentales del campo electromagnético.

En el electromagnetismo hay cuatro cantidades de campo vectoriales fundamentales: intensidad de campo eléctrico  $E$ , densidad de flujo eléctrico (o desplazamiento eléctrico)  $D$ , densidad de flujo magnético  $B$  e intensidad de campo magnético  $H$ .

La intensidad de campo  $E$  es el único campo necesario al analizar la electrostática, es decir los efectos de cargas eléctricas estacionarias en el espacio libre; se define como la fuerza eléctrica por unidad de carga de prueba. El vector de desplazamiento eléctrico  $D$  es útil en el estudio de campos eléctricos en medios materiales. De forma parecida, la densidad de flujo magnético  $B$  es el único vector necesario al analizar la magnetostática, es decir los efectos de corrientes eléctricas estacionarias en Medios materiales, y se relaciona con la fuerza magnética que actúa sobre una carga que se mueve a determinada velocidad. El vector de intensidad de campo magnético  $H$  es útil en el estudio de campos magnéticos en el vacío.

En la Tabla 1-1 se presentan las cuatro unidades fundamentales del campo electromagnético, así como sus unidades. En esta tabla,  $V/m$  es volt por metro y  $T$  representa un tesla o volt-segundo por metro cuadrado. Si no hay variación temporal, como en los casos estáticos o estacionarios, las cantidades de campo eléctrico  $E$  y  $D$  y las cantidades de campo magnético  $B$  y  $H$  forman dos pares vectoriales separados. Sin embargo, en los casos dependientes del tiempo, las cantidades de campos eléctricos y magnéticos acopladas; es decir, si  $E$  y  $D$  son variables contra el tiempo producirán  $B$  y  $H$  y viceversa. Las cuatro son funciones puntuales. Las propiedades de los materiales (o medios) determinan las relaciones entre  $E$  y  $D$  y entre  $B$  y  $H$ . Estas relaciones se denominan *relaciones constitutivas* de un medio [2].

Tabla 2-1 : Cantidades Fundamentales del campo Electromagnético [2].

Símbolos y unidades para las cantidades de campo	Cantidad de Campo	Símbolo	Unidad
Eléctrico	Intensidad de campo eléctrico	E	V/m
	Densidad de flujo eléctrico(desplazamiento eléctrico)	D	C/m <sup>2</sup>
Magnético	Densidad de flujo magnético	B	T
	Intensidad de flujo magnético	H	V/m

En el modelo electromagnético hay tres constantes universales, estas se relacionan con las propiedades del espacio libre (Vacío) y son: *Velocidad de la onda electromagnética* (incluyendo la luz) en el vacío,  $c$ ; *Permitividad* del vacío,  $\epsilon_0$ ; y *Permeabilidad* del vacío,  $\mu_0$ . Se han realizado varios experimentos que confirman la velocidad de la luz en el vacío, para esta explicación basta con considerar:

$$c \cong 3 \times 10^8 \text{ [m/s]} \quad (2-1)$$

Las otras dos constantes,  $\epsilon_0$  y  $\mu_0$ , se relacionan con los fenómenos eléctricos y magnéticos, respectivamente:  $\epsilon_0$  es la constante de proporcionalidad entre la densidad de flujo eléctrico D y la intensidad de campo eléctrico E en el vacío, de manera que:

$$D = \epsilon_0 E \quad (2-2)$$

$\mu_0$  es la constante de proporcionalidad entre la densidad de flujo magnético B y la intensidad de campo magnético H, de esta forma se tiene:

$$H = \frac{1}{\mu_0} B \quad (2-3)$$

Los valores de  $\epsilon_0$  y  $\mu_0$  se determinan de acuerdo con el sistemas de unidades elegido y no son independientes. En el sistema SI, adoptado de manera casi universal para el trabajo electromagnético, se elige la permeabilidad del como:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]} \quad (2-4)$$

Donde (H/m) representa Henry por metro.

Con los valores de  $c$  y  $\mu_0$  establecidos en las ecuaciones (1-1) y (1-4), el valor de la permitividad en el vacío se obtiene de la siguiente relación:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \text{ [m/s]} \quad (2-5)$$

Es decir,

$$\epsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0} \cong 8.854 \times 10^{-9} \text{ [F/m]} \quad (2-6)$$

Donde F/m es la abreviatura de Faraday por metro. En la siguiente tabla se resumen las tres constantes y sus valores:

Tabla 2-2 : Constantes universales electromagnetismo [2].

Contante universal	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad de la luz en el vacío	$c$	$3 \times 10^8$	[m/s]
Permeabilidad en el vacío	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$	[H/m]
Permitividad en el vacío	$\epsilon_0$	$8.854 \times 10^{-9}$	[F/m]

## 2.2 Transformadores en aceite y sus componentes

### 2.2.1 Núcleo.

El núcleo de un transformador corresponde al circuito magnético encargado de conducir la mayor parte del flujo magnético y de esa manera concatenar magnéticamente los circuitos eléctricos del transformador. Es sabido que siempre existirá la presencia de flujo que no se canaliza en este componente, normalmente llamado flujo de dispersión.

Este se compone por láminas de Acero de Silicio, grano orientado, laminas en frio, el cual le da una alta permeabilidad magnética y de esta manera proveer una alta eficiencia, bajo nivel de ruido y baja corriente de excitación. Todas las láminas están aisladas en ambas caras por medio de un aislante inorgánico llamado "Carlite" que consiste en una capa especial aislante aplicada en el proceso térmico final de recocido y planchado.

Hay cuatro tipos de lámina de grano orientado, cuyas características se encuentran mencionadas en la siguiente tabla:

Tabla 2-3: Pérdidas en el Silicio a 50 Hz y 60 Hz [3].

Grado de orientación	Espesor		60 Hz				50 Hz			
	Pulg	mm	Watt/Lb		Watt/Kg		Watt/Lb		Watt/Kg	
			15 kG	17 kG						
M-2	0.007	0.18	0.42	-	0.93	-	0.32	-	0.70	-
M-3	0.009	0.23	0.46	-	1.01	-	0.35	-	0.77	-
M-4	0.011	0.28	0.51	0.74	1.12	1.63	0.39	0.56	0.85	1.24
M-6	0.014	0.35	0.66	0.94	1.06	2.07	0.50	0.71	1.11	1.57

Se sabe que la relación entre las pérdidas a 60 Hz y a 50 Hz tienen la siguiente relación:

$$\text{Pérdidas a 50 Hz} = 0.76 \times \text{Pérdidas a 60 Hz} \quad (2-6)$$

El tipo de lámina más usual en la fabricación de núcleos para transformadores es la M-4, en la siguiente figura se puede observar la estructura granular del acero al silicio, en esta figura se presenta sin el recubrimiento interlaminar [3].



Figura 2-1 : Estructura granular del acero al silicio (M-4) [3].

## 2.2.2 Circuito eléctrico (Devanados)

Los devanados son la parte que componen el circuito eléctrico del transformador (devanados primarios y secundarios). Los devanados se fabrican en diferentes diseños dependiendo de las necesidades del diseño, y los materiales que utilizan, básicamente, Son: el cobre y el aluminio.

La función de los devanados (primarios) es crear un flujo magnético para inducir en los devanados (secundarios) una fuerza electromotriz, y transferir potencia eléctrica del primario al secundario mediante el principio de inducción electromagnética; este proceso se desarrolla con una pérdida de energía muy pequeña.

Aun cuando el cobre tiene una baja resistencia específica su mayor costo comparado con el aluminio dio lugar al incremento del uso de aluminio (usado por primera vez en 1952), Especialmente en transformadores de distribución y pequeña potencia, ya sea sumergido en aceite o en seco.

El diseñador debe considerar varias características de ambos materiales, la siguiente tabla presenta datos específicos de distintos materiales:

Tabla 2-4 : Comparación de las propiedades físicas del aluminio y del cobre [3].

PROPIEDAD	ALUMINIO	COBRE
Conductividad Eléctrica a 20 °C recocido	62 %	100%
Peso específico en gramos por centímetros cubico a 20 °C	2.7	8.89
Calor Especifico	0.21	0.094
Punto de Fusión	660	1083
Conductividad térmica, a 20 °C ( <i>Calorías/°C/cm<sup>2</sup>/cm</i> )	0.53	0.941
Esfuerzo mecánico a la tensión en <i>kg/mm<sup>2</sup></i>	16	25
Peso total de un transformador de 2500 kVA con devanado de alta tensión a 44 kV (kg)	6318	6682

- a) Las ventajas de la bobina de cobre son:
  - resistencia mecánica
  - conductividad eléctrica buena
- b) Las ventajas de la bobina de aluminio son:
  - Estabilidad en el costo por suministro
  - Eficiente disipación de calor (capacidades muy pequeñas) únicamente para devanados en banda, no para devanados de alambre; uso de hoja de aluminio (foil de aluminio).
  - Considerable reducción de peso.

Los conductores de cobre grado electrolítico de 100% de conductividad IACS en sección redonda, con recubrimientos de resina aislante de polivinil formal modificada o en sección rectangular, con recubrimiento en 4 capas de papel. Estos aislamientos son compatibles al líquido aislante, con resistencia térmica de 180°C y 105°C respectivamente.

Los conductores de aluminio grado eléctrico, con pureza del 99% cuyas dimensiones y forma le proveen al devanado área para la adecuada ampacidad, y un excelente desempeño en condiciones extremas de corto circuito [3].

### **2.2.3 Aislamientos sólidos.**

El sistema de aislamiento aísla los devanados entre ellos y a tierra, así como las partes cercanas al núcleo y a las partes de acero del tanque.

El sistema de aislamiento de la mayoría de los transformadores de potencia consiste en aceite y celulosa. Las propiedades dieléctricas de ambos materiales cambian a lo largo de la vida útil del transformador. El aislamiento papel-aceite se degrada con el tiempo y el proceso depende de las condiciones térmicas y eléctricas, de la cantidad de agua y oxígeno, y de otras condiciones presentes en el interior del transformador

El aislamiento contiene una serie de materiales aislantes, los cuales, juntos forman el sistema de aislamiento. Este sistema incluye materiales como:

- Cartón prensado.
- Papel Kraft prensado o tratado.
- Papel manila y corrugado.
- Collares de cartón prensado y aislamientos finales.
- Esmaltes y barnices.
- Recubrimientos orgánicos e inorgánicos para la laminación del núcleo.
- Porcelanas.
- Recubrimientos de polvo epóxico.
- Madera de maple o machiches para armados.
- Fibra Vulcanizada.
- Algodón (hilos y cintas).
- Plásticos y cementos, telas y cintas adhesivas, cintas de fibra de vidrio, etc.

Así, todos los materiales anteriores, forman parte de la sección solida del aislamiento, el cual debe cumplir con las siguientes expectativas:

- a) Calidad para soportar las tensiones altas, sucedidas en funcionamiento normal (esfuerzos dieléctricos), esto incluye ondas de impulso y transitorios.
- b) Calidad para soportar esfuerzos mecánicos y térmicos (calor) los cuales, generalmente acompañan a un cortocircuito.
- c) Calidad para prevenir excesivas acumulaciones de calor (transmisión de calor).
- d) Calidad para mantener las características deseadas por un periodo de vida de servicio aceptablemente largo dando un adecuado mantenimiento.

Es evidente que cualquier debilitamiento en el aislamiento puede conducir a la falla en el transformador. El aislamiento está deteriorado cuando ha perdido una parte significativa de su propiedad dieléctrica original, característica mecánica o resistencia al impulso. La continuación en el proceso de deterioro terminará en lo inevitable: una falla mecánica o eléctrica [3].

### 2.2.4 Líquido (aceite).

El líquido aislante puede ser aceite mineral para transformador, silicona o R-temp, de estos el usado el 95% de las veces es el aceite mineral, el cual cumple no solo la función de aislar eléctricamente, sino que también es parte principal de la refrigeración.

Los aceites para transformadores son de naturaleza mineral. Proceden de la destilación fraccionada de petróleo, a la que sigue un proceso de refinado.

La composición química depende de la procedencia. Básicamente se trata de una mezcla completa de hidrocarburos, según proporciones de unas u otras moléculas, se habla de aceites con base parafínica o aromática [7].

Las diferencias en la composición química darán lugar a diferencias en las propiedades físicas y en el comportamiento químico de los aceites después de su puesta en servicio. La composición química tiene efectos profundos en las características físicas del aceite.

El aceite aislante es una mezcla adecuada de hidrocarburos isoparafínicos, nafténicos y aromáticos aportando cada una de estas bases su cuota de propiedades deseables y mediante proporciones óptimas limitar lo indeseable que cada una pueda tener, con el fin de que el producto final cumpla las cuatro funciones básicas que un buen aceite aislante debe poseer; es decir:

- a) Ser buen aislante eléctrico.
- b) Refrigerar adecuadamente el transformador, disipando el calor natural que genera el proceso de transformación.
- c) Protector de las partes internas del transformador.
- d) Tener a la vez una buena estabilidad a la oxidación, con contenidos apropiados de inhibidor natural y/o sintético que prevenga la formación de lodo. (Esta función tiene apariencia paradójica, pero es claro que está asociada al concepto moderno de diagnóstico y mantenimiento preventivo).

Para los equipos eléctricos, las principales preocupaciones son:

- a) Aceites parafínicos tienden a formar ceras (compuestos sólidos) a baja temperatura.
- b) Aceites parafínicos tienen una estabilidad térmica<sup>11</sup> menor que la de los aceites nafténicos y aromáticos.
- c) Aceites parafínicos tienen una mayor viscosidad<sup>12</sup> a baja temperatura que la de los aceites nafténicos y aromáticos.

Estos factores pueden perjudicar el rendimiento de los equipos eléctricos de alta tensión. Los dos primeros factores tienen un efecto desfavorable sobre las características dieléctricas del aceite. El tercer factor afecta desfavorablemente la capacidad de disipar calor del aceite.

Los inhibidores de oxidación, como DBPC (di-ter-butyl-paracresol) y DBP (di-tert-butyl- fenol), se añaden al aceite para retardar el proceso de oxidación. Estos compuestos trabajan atrayendo moléculas de oxígeno a sí mismos en lugar de permitir que el oxígeno se unen con el tiempo a las moléculas de aceite [9].

### **2.2.5 Tanque.**

Es un elemento indispensable en aquellos transformadores cuyo medio de refrigeración no es el aire. El tanque es principalmente el contenedor para el aceite y una protección física de la parte activa. También sirve como estructura de apoyo para los accesorios y equipos de control. El tanque tiene que resistir las presiones ambientales, como la atmósfera corrosiva, alta humedad y radiación solar [6]. Problemas en el interior del tanque como arcos internos puede vaporizar instantáneamente el aceite circundante, lo que puede conducir a una presión de gas tan alta que podría romperlo [7].

Los transformadores deben ser construidos con un tanque hermético, con objeto de preservar el aceite, ya que este tiene la función de dieléctrico y también de refrigerante, del conjunto núcleo-bobinas. El transformador debe permanecer sellado perfectamente desde una temperatura de -5 °C a un máximo de 105 °C en la parte superior del líquido aislante [3].

El tanque está elaborado en lámina de acero generalmente grado ASTM A-36, el cual es habilitado con maquinaria de corte láser, dobladoras y guillotinas. Adicionalmente se colocan refuerzos interiores o exteriores para soportar presiones superiores a la presión máxima de operación. Lo anterior es unido mediante soldadura continua ya sea Mig y/o de Arco Eléctrico.

A cada oblea o radiador empleado se le verifica individualmente su hermeticidad antes de soldarse al tanque. Posterior a que los radiadores son soldados al tanque, la unidad completa es sometida a prueba de hermeticidad y posteriormente pasa al proceso de acabado.

Una vez terminado y probado el transformador se somete nuevamente a prueba de hermeticidad por un tiempo mínimo de 6 horas, garantizando así un transformador libre de fugas [4].

### **2.2.6 Acabado.**

El tanque es sometido a un proceso de preparación de superficie utilizando un sistema de limpieza especializado, asegurando una adherencia de los recubrimientos anticorrosivos y de acabado con pintura horneada del color especificado por norma o por el cliente.

No hay un criterio de fin de vida única y simple que se pueda utilizar para cuantificar la vida remanente del transformador. Sin embargo, es útil un criterio para los usuarios de transformadores, de aquí que parece oportuno centrarse sobre el proceso de envejecimiento y la condición de aislamiento [4].

### **2.3 Clasificación de transformadores.**

Los transformadores pueden ser clasificados de distintas maneras, según se tome como base la operación, la construcción o el tipo de ventilación; así tenemos que:

- a) Por la operación. Se refiere a la energía o potencia que manejan dentro del sistema eléctrico.
  - Transformadores de distribución. Los que tienen capacidad desde 5 hasta 500 kVA (monofásicos y/o trifásicos).
  - Transformadores de potencia. Los que tienen capacidad mayor a 500 kVA.
- b) Por número de fases. Dependiendo de las características del sistema al cual se conectarán.
  - Monofásico. Transformadores de potencia o de distribución que son conectados a una línea o fase y neutro o tierra. Tienen un solo devanado de alta y un solo devanado de baja tensión [3].

### **2.4 Tipos de ventilación.**

Los elementos constructivos que se dotan a los transformadores para su refrigeración en el que el aire ejerce las funciones de refrigerante externo y el aceite como refrigerante interno. El método de enfriamiento de un transformador es muy importante, ya que la disipación del calor, influye mucho en su tiempo de vida y capacidad de carga, así como en el área de su instalación y su costo. Estos se clasifican en los siguientes [5]:

- Transformador ONAN, el sistema de refrigeración está formado por el aceite dentro de la cuba y los radiadores con circulación por termosifón y el aire exterior con circulación natural,
- Transformadores ONAF, a la cuba y los radiadores se le agrega un equipo de ventiladores en el exterior para forzar la circulación del aire,

- Transformadores OFAF, a los elementos anteriormente mencionados se añaden motobombas para conseguir la circulación forzada del aceite,
- Transformadores ODAF, además de disponer de los elementos anteriormente mencionados se equipan de una serie de conductos en el interior de la cuba para poder dirigir el flujo del aceite para que éste pueda recorrer los arrollamientos completamente.
- Transformadores OFW, en el que el refrigerante externo es agua, van dotados de serpentines que recorren el interior de la cuba, disponen además de equipos necesarios para enfriar el agua y motobombas en el caso de que su circulación sea forzada [4].

## 2.5 Pérdidas de los Transformadores.

Las pérdidas que se pueden producir en los transformadores, se producen en los devanados, y se deben principalmente al efecto Joule en el entrehierro debido a Histéresis y por corrientes de Foucault [12], en la Figura 1-3 se presenta el circuito equivalente de un transformador.

En la conexión de un transformador en la red de distribución, los devanados presentan una determinada resistencia al circular una corriente que provoca una caída de tensión que se debe tener en cuenta en ambos devanados  $R_1$  y  $R_2$ . El flujo magnético que se origina en los devanados primarios no se cierra en su totalidad con el devanado secundario a través núcleo magnético sino que una parte de esta atraviesa el aislante y se cierra por el aire. Las pérdidas de flujo de dispersión magnética se traducen en la llamada inducción de dispersión y son representadas por  $X_1$  y  $X_2$ . Por otro lado las pérdidas asociadas al núcleo debido a las corrientes de foucault y a la histéresis corresponden a  $R_{Fe}$  y  $X_\mu$  respectivamente [10].

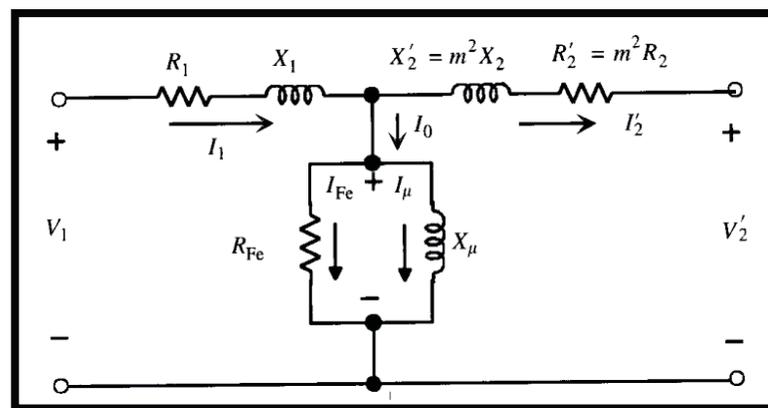


Figura 2-2 : Modelo equivalente monofásico [10].

Al analizar las pérdidas producidas por el transformador hay que tener en cuenta que todas las máquinas en funcionamiento producen pérdidas en potencia. Si estas pérdidas son desglosadas se traducen en:

- Pérdidas por corrientes parasitas o Foucault y pérdidas por histéresis, donde estas a su vez son también denominadas pérdidas en vacío.
- Pérdidas del cobre en el devanado [10].

## 2.6 Rendimiento o Eficiencia.

Es de gran relevancia el conocer el rendimiento de cualquier máquina, dispositivo o sistema por el valor económico que implica, tanto desde el punto de vista del costo de operación como del ambiental. En general el rendimiento de una máquina, está dado por el cociente de las potencias de salida y de entrada como se ve en la ecuación (1-7).

$$\eta = \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia de entrada}} = \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia de entrada} + \text{pérdidas}} \quad (2-7)$$

En el caso particular de los transformadores estos son comprados y juzgados por su eficiencia [10]. El transformador posee su rendimiento muy elevado y requieren muy bajo mantenimiento, debido a su condición de máquina estática.

$$\eta = \frac{X \cdot S \cdot \cos \theta_{carga}}{X \cdot S \cdot \cos \theta_{carga} + P_o + x^2 P_{cc}} \quad (2-8)$$

Con la ecuación (1-8), es posible calcular la eficiencia del transformador, donde el producto de S representa la potencia asignada en [kVA],  $P_o$  es las perdidas constantes (perdidas que son independientes del factor de carga) en [W], X es el factor de carga y P es la potencia de la carga en [W]. Es posible observar que a medida que el factor de potencia de la carga ( $\cos \theta_{carga}$ ) disminuye el rendimiento empeora [9]. Ahora si se desea sacar el mejor provecho a la máquina, el rendimiento óptimo está dado por la siguiente expresión:

$$\eta = \sqrt{\frac{P_o}{P_{cc}}} \quad (2-9)$$

En conclusión, la máquina trabajará a su máximo rendimiento cuando las pérdidas fijas o en vacío sean igual a las pérdidas variables o en el hierro. Cabe mencionar que a medida que aumentan las dimensiones de la máquina, crece más rápidamente la potencia que las pérdidas y por lo tanto mejora su rendimiento. Lamentablemente, no todo es tan sencillo y en las máquinas de gran potencia aparecen otros factores que complican su funcionamiento, por ejemplo la forma de evacuar el calor que producen las pérdidas para mantener la temperatura de operación dentro de los límites admitidos por los materiales aislantes [12].

## 2.7 Modelo eléctrico del transformador.

El circuito eléctrico está constituido por los devanados (primario y secundario). Estos se hacen sobre horma y cubierta de cinta aislante, tratadas al vacío, impregnadas de barniz y cocido. La función que desempeñan cada uno de los devanados da origen al funcionamiento del transformador y esto es posible con el uso de la corriente alterna.

El circuito equivalente del transformador permite simular su comportamiento eléctrico. Para comprender el funcionamiento del transformador existen una serie de expresiones que nos llevan a deducir el circuito equivalente mostrado en la Figura 1-2 que representa el comportamiento electromagnético de la máquina. Sin embargo los parámetros de este circuito se pueden obtener experimentalmente mediante dos ensayos:

### a) Ensayo de circuito abierto o vacío

Consiste en aplicar al lado primario o enrollado de baja tensión del transformador una tensión sinusoidal asignada, mientras el lado secundario o enrollado de alta tensión se encuentra abierto. Al mismo tiempo se debe medir la potencia absorbida  $P_0$ , la corriente de vacío  $I_0$  y la tensión en el secundario tal como se muestra en la Figura 1-5.

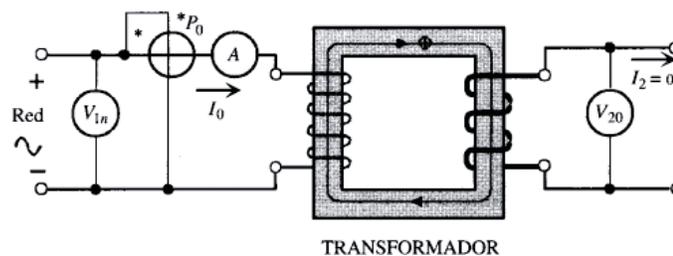


Figura 2-3 : Esquema eléctrico de ensayo en vacío [10].

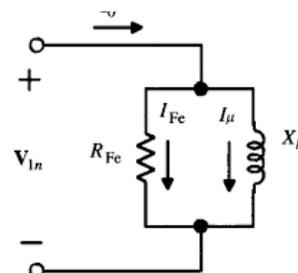


Figura 2-4 : Circuito equivalente del ensayo en vacío [10].

Las magnitudes de la rama serie del primario son pequeñas en comparación a los parámetros de la rama de magnetización dado que la tensión de esta es similar a la tensión nominal, por lo que se desprecia la rama serie para el cálculo del ensayo.

Siendo  $V_{1n}$  e  $I_o$  los valores efectivos de voltaje y corriente de entrada,  $P_o$  la potencia activa, las cuales medidas permite calcular las constantes de la rama de excitación por medio de las expresiones:

$$R_{fe} = \frac{V_{1n}^2}{P_o} \quad (2-10)$$

$$X_\mu = \frac{V_{1n}^2}{\sqrt{V_{1n}^2 \cdot I_o^2 \cdot P_o}} \quad (2-11)$$

### b) Ensayo de corto circuito

Como lo dice su nombre, en este ensayo se cortocircuita el devanado secundario y se aplica al primario una tensión que se va elevando gradualmente desde cero (3-10 % de la tensión nominal) hasta que circula la corriente asignada de plena carga por los devanados [10].

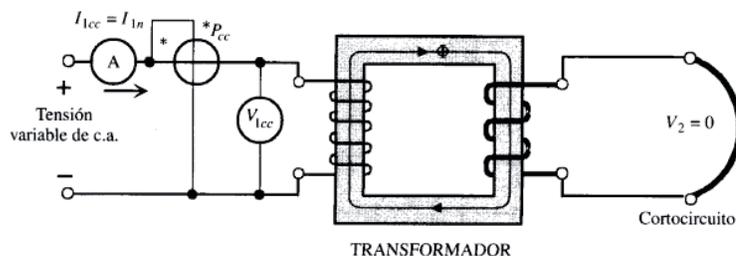


Figura 2-5 : Esquema eléctrico y circuito equivalente del ensayo de corto circuito [10].

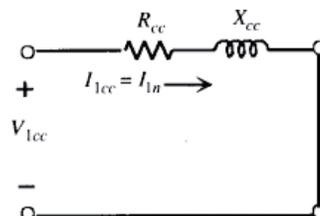


Figura 2-6 : Circuito equivalente del ensayo de corto circuito [10].

Las magnitudes de la rama de magnetización son mucho mayores que las de la rama serie de ambos enrollados (primario y secundario), por lo que al proceder con el ensayo la rama de magnetización se desprecia, dado que casi toda la corriente circula por la rama serie del circuito equivalente de la Figura 1-2. Así el cálculo de los parámetros está dado por:

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 = \frac{P_{cc}}{I_{1cc}^2} \quad (2-12)$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2 = \frac{\sqrt{V_{cc}^2 \cdot I_{1cc}^2 - P_{cc}}}{I_{1cc}^2} \quad (2-13)$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_{cc}}{2} \quad (2-14)$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_{cc}}{2} \quad (2-15)$$

## 2.8 Algunos aspectos dinámicos del modelo térmico.

Al tratar de analizar el problema de la temperatura del transformador, la analogía básica entre los procesos térmicos y eléctricos se da a continuación.

Tabla 2-5 : Analogía Termo-Eléctrica [13].

Térmico		Eléctrico	
Calor Generado	$q$	Corriente	$I$
Temperatura	$\theta$	Voltaje	$V$
Resistencia	$R_{th}$	$R_{th}$	$R_e$
Capacitancia	$C_{th}$	Capacitancia	$C_e$

En este punto, puede ser útil definir la resistencia térmica y capacitancia térmica como la capacidad del material para resistir el flujo de calor y para almacenar calor, respectivamente.

La analogía anterior asume que las características térmicas de un material son constantes, es decir, no están cambiando con temperatura. Para usar esta analogía eléctrica-térmica para el cálculo de la temperatura del transformador, será necesario modificar aún más el método de capacitancia concentrada mediante la introducción de una resistencia térmica no lineal, que tiene en cuenta los cambios en las características térmicas del aceite del transformador con la temperatura[16].

El aceite del transformador tiene características térmicas fuertemente dependientes de la temperatura como se presenta en la Tabla 2-6, donde el aceite la dependencia de la viscosidad de la temperatura es más pronunciada. La resistencia térmica no lineal estará claramente definida en siguientes secciones para el modelo de temperatura de aceite superior y el modelo de temperatura de punto caliente.

Tabla 2-6 : Características Térmicas del aceite del transformador [13].

Temperatura (°C)	Densidad $\rho$ ( $kg/m^3$ )	Calor e specifico $C_p$ ( $kg/m^3$ )	Conductividad térmica k ( $W/m\ ^\circ C$ )	Coef. de expansión cubica térmica ( $W/m\ ^\circ C$ )	Viscosidad Cinématica ( $m^2/s$ )
-15	902	1700	0,1341	$6,2 \times 10^{-4}$	$450 \times 10^{-6}$
-5	896	1740	0,1333	$6,4 \times 10^{-4}$	$180 \times 10^{-6}$
5	890	1785	0,1326	$6,7 \times 10^{-4}$	$85 \times 10^{-6}$
15	884	1825	0,1318	$6,9 \times 10^{-4}$	$45 \times 10^{-6}$
25	879	1870	0,1310	$7,15 \times 10^{-4}$	$27 \times 10^{-6}$
35	873	1910	0,1303	$7,40 \times 10^{-4}$	$17 \times 10^{-6}$
45	867	1950	0,1295	$7,65 \times 10^{-4}$	$11,5 \times 10^{-6}$
55	861	1995	0,1287	$7,8 \times 10^{-4}$	$8,2 \times 10^{-6}$
65	855	2040	0,1280	$7,9 \times 10^{-4}$	$6,1 \times 10^{-6}$
75	849	2080	0,1272	$7,95 \times 10^{-4}$	$4,7 \times 10^{-6}$
85	844	2120	0,1264	$8,00 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-6}$
100	835	2180	0,1253	$8,00 \times 10^{-4}$	$3,0 \times 10^{-6}$

## 2.9 Modelo de temperatura aceite superior.

El modelo de temperatura de aceite superior se proporciona como un circuito térmico (Fig. 2), basado en la analogía termoeléctrica y el calor teoría de la transferencia, donde:

- $q_{tot}$  : Pérdidas totales;
- $q_{fe}$  : Calor generado por pérdidas sin carga;
- $q_{cu}$  : Calor generado por pérdidas de carga;
- $C_{thot}$  : Capacitancia térmica del aceite;
- $\Theta_{oil}$  : Temperatura del aceite superior;
- $R_{th-oil}$ : Resistencia térmica no lineal;
- $\Theta_{amb}$  : Temperatura ambiente.

El calor generado por el transformador de carga y sin carga las pérdidas están representadas por dos fuentes de calor ideales. El ambiente la temperatura se representa como una fuente de temperatura ideal. Notar que la resistencia del aceite es indicada como una resistencia no lineal, ya que antes se vio que los parámetros varían según la temperatura [18] y [13].

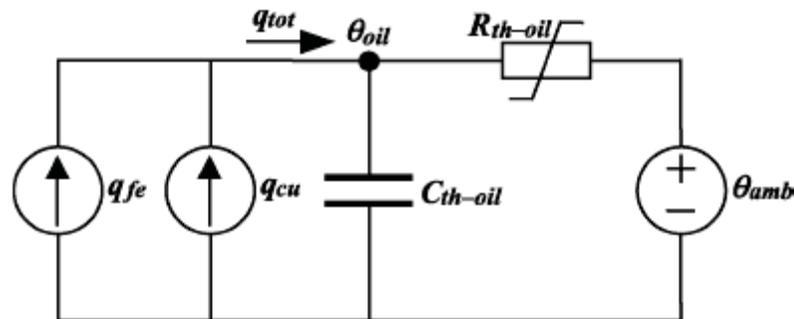


Figura 2-7 : Modelo Térmico del aceite superior [13].

### 2.9.1 Tasa relativa de envejecimiento.

Aunque el envejecimiento o degradación del aislamiento es una función temporal de la temperatura, contenido de humedad, oxígeno y de ácido el modelo presentador por la norma se basa únicamente en la temperatura del aislamiento como parámetro de control.

Puesto que la distribución de temperatura no es uniforme, la parte que está funcionando a temperatura más elevada sufrirá normalmente la degradación mayor. Por lo tanto, la tasa de envejecimiento se refiere a la temperatura del punto caliente del arrollamiento. En este caso la tasa relativa de envejecimiento  $V$  se define de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$V = 2^{(\theta_h - 98) / 6} \quad (2-16)$$

$$V = e^{\left( \frac{15000}{110 + 273} + \frac{15000}{\theta_h + 273} \right)} \quad (2-17)$$

Donde  $\theta_h$  corresponde a la temperatura del punto caliente [1].

La pérdida de vida  $L$  sobre un cierto periodo de tiempo es igual a:

$$L = \int_{t_1}^{t_2} V dt \quad \text{o} \quad L \approx \sum_{n=1}^N V_n \times t_n \quad (2-18)$$

## 2.10 Conclusiones del capítulo

Se logró entender los aspectos técnicos más importantes de los transformadores, desde los materiales que lo componen hasta su comportamiento térmico. Todo esto da cuenta de los complejos aspectos que lo generan, de esta manera se logra tener una visión amplia de sus características.

## 3 Modelo térmico analítico del transformador.

La formulación de las ecuaciones de calentamiento como exponenciales se sigue particularmente para la determinación de los parámetros de transferencia de calor para ensayo y para escenarios simplificados. En este campo, la determinación de la temperatura del punto caliente es más probable que sea requerida por el factor de carga  $K$  arbitrariamente variable en el tiempo y la temperatura ambiente  $\Theta_a$  variable en el tiempo.

Para esta aplicación, la mejor aproximación es el uso de las ecuaciones diferenciales de transferencia de calor. Tales ecuaciones se resuelven fácilmente si se convierten a ecuaciones de diferencia como se indica más adelante.

### 3.1.1 Solución de las ecuaciones diferenciales.

Cuando los principios de transferencia de calor se aplican a la situación del transformador, las ecuaciones diferenciales son solamente lineales para refrigeración OD de flujo dirigido. Para las otras formas de refrigeración, OF y ON, la tasa de circulación del medio refrigerante depende de la propia temperatura del refrigerante. En otras palabras, si no hay ventiladores, la tasa de flujo de aire en el radiador depende de su temperatura, mientras que si hay ventiladores, no es así. Similarmente si no hay bombas de aceite, o el flujo de aceite no está “dirigido”, la tasa de flujo de aceite depende de su propia temperatura, mientras que si hay bombas y flujo dirigido, no es así.

La consecuencia de esto es que para refrigeración ON y OF, las ecuaciones diferenciales no son lineales, implicando que la respuesta, bien del calentamiento del aceite superior o del calentamiento del punto caliente, para un cambio de etapa de la corriente de carga, no es una función exponencial verdadera [17].

No obstante, para evitar una complejidad indebida, en la IEC60076 se propone una aproximación, sabiendo que la relación lineal afecta solamente al valor final de cualquier

cambio de temperatura que ocurra, y que la función tiempo es todavía exponencial, si la refrigeración es ON, OF u OD.

Siendo modificada la ecuación se obtiene (entrada K,  $\theta_a$ , salida  $\theta_o$ ):

$$\left[ \frac{1 + K^2 R}{1 + R} \right]^x \times (\Delta\theta_{or}) = k_{11} \tau_o \times \frac{d\theta_o}{dt} + [\theta_o - \theta_a] \quad (3-1)$$

Todos los símbolos y parámetros son definidos anteriormente, los cuales dependen de las características del equipo a estudiar.

La ecuación diferencial para la temperatura del aceite superior (entrada K, salida  $\Delta\theta_h$ ) se resuelva más fácilmente como al suma de dos ecuaciones diferenciales, donde:

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_{h1} - \Delta\theta_{h2} \quad (3-2)$$

Las dos ecuaciones se pueden definir de la siguiente manera:

$$k_{21} \times K^y \times (\Delta\theta_{hr}) = k_{22} \times \tau_w \times \frac{d\Delta\theta_{h1}}{dt} + \Delta\theta_{h1} \quad (3-3)$$

$$(k_{21} - 1) \times K^y \times (\Delta\theta_{hr}) = (\tau_o/k_{22}) \times \frac{d\Delta\theta_{h2}}{dt} + \Delta\theta_{h2} \quad (3-4)$$

Estas dos ecuaciones se combinan de acuerdo con la ecuación ( 2).

Finalmente la ecuación para la obtención del punto caliente es:

$$\theta_h = \theta_o - \Delta\theta_h \quad (3-5)$$

En cuanto a las ecuaciones ( 3-2) y ( 3-4), la complejidad tiene propósito de considerar el hecho de que el medio refrigerante tiene inercia mecánica añadida a la inercia térmica. El efecto es mayor para refrigeración natural (ON), algo menor para refrigeración de aceite forzado con flujo no dirigido (OF), e insignificante para refrigeración con aceite forzado y flujo dirigido (OD), en relación con transformadores de potencia. Es también insignificante para transformadores de distribución.

### 3.1.2 Conversión a ecuaciones de diferencia.

Las ecuaciones diferenciales anteriores no se pueden resolver por las funciones de salida en términos de funciones matemáticas simples tales como exponenciales, a menos que las funciones de entradas sean también simples: por ejemplo, funciones escalón puras. Para un transformador instalado, la corriente de carga y la temperatura ambiente no son funciones de tiempo bien definidas. Si se hacen aproximaciones, por ejemplo, aproximando la corriente de carga como una series de cambios de etapa y manteniendo la temperatura ambiente constante, entonces ello conlleva que los resultados son también solamente aproximaciones.

Si las ecuaciones diferenciales se transforman en ecuaciones de diferencia, entonces todo se simplifica llevándolo a un problema sencillo.

Las ecuaciones diferenciales antes descritas se pueden reformular como las siguientes ecuaciones de diferencia, donde el factor D representa una pequeña diferencia sobre una etapa de tiempo.

De esta manera la ecuación (3-1) se convierte en:

$$D\theta_o = \frac{Dt}{k_{11}\tau_o} \left[ \frac{1 + K^2 R}{1 + R} \right]^x \times (\Delta\theta_{or}) - [\theta_o - \theta_a] \quad (3-6)$$

El operador “D” implica una diferencia en la variable asociada que corresponde a cada etapa de tiempo Dt. A cada etapa de tiempo el valor de orden  $n$  de  $D\theta_o$  se calcula a partir del valor de orden  $(n - 1)$ :

$$\theta_{o(n)} = \theta_{o(n-1)} + D\theta_{o(n)} \quad (3-7)$$

De igual manera las ecuaciones (3-3) y (3-4) se convierten en ecuaciones de diferencia transformándose de la siguiente manera:

$$D\Delta\theta_{h1} = \frac{Dt}{k_{22}\tau_w} [k_{21} \times \Delta\theta_{hr}K^y - \Delta\theta_{h1}] \quad (3-8)$$

$$D\Delta\theta_{h1} = \frac{Dt}{k_{22}\tau_w} [k_{21} \times \Delta\theta_{hr}K^y - \Delta\theta_{h1}] \quad (3-9)$$

$$D\Delta\theta_{h2} = \frac{Dt}{(1/k_{22})\tau_o} \times [(k_{21} - 1) \times \Delta\theta_{hr}K^y - \Delta\theta_{h2}] \quad (3-10)$$

El procedimiento para es idéntico al explicado de la ecuación (3-6).

De esta manera el calentamiento del punto caliente en la etapa de tiempo de orden  $n$  está determinado por:

$$\Delta\theta_{h(n)} = \Delta\theta_{h1(n)} + \Delta\theta_{h2(n)} \quad (3-11)$$

Y finalmente, la temperatura del punto caliente en la etapa de tiempo de orden  $n$  está determinada por:

$$\theta_{h(n)} = \theta_{o(n)} + \Delta\theta_{h(n)} \quad (3-12)$$

Para que el valor sea cada vez más preciso el valor del intervalo  $Dt$  debe ser muy pequeño, más aun siempre considerar que no sea más grande que la mitad de la constante de tiempo más pequeña del modelo térmico.

Existen otros métodos para el cálculo de la temperatura del punto caliente en el transformador, y más precisos, pero este será el más adecuado dada su facilidad ya que más complejidad no justifica aquí considerando la imprecisión de los datos de entrada [14].

Las ecuaciones diferenciales de pérdida de vida del transformador también se pueden convertir a ecuaciones de diferencia. La ecuación fundamental para el cálculo es:

$$\frac{dL}{dt} = V \quad (3-13)$$

De esta manera;

$$DL_{(n)} = V_{(n)} \times Dt \quad (3-14)$$

y

$$L_{(n)} = L_{(n-1)} + DL_{(n)} \quad (3-15)$$

### 3.1.3 Ejemplo práctico metodo ecuaciones de diferencia.

La utilidad de este método es obtener información sobre el punto caliente y la pérdida de vida, y se puede aplicar de la siguiente manera:

- **Establecer los parámetros del transformador**

Los parámetros utilizados se eligen de tal modo que la temperatura del punto caliente asignada es 110 °C a una temperatura ambiente de 30°C. Los parámetros son alistados en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Parámetros del transformador [1].

$\Delta\theta_{or}$	45 K
$\Delta\theta_{hr}$	35 K
$\tau_o$	150 min
$\tau_w$	7 min
$R$	8
$x$	0.8
$y$	1.3
$k_{11}$	0.5
$k_{21}$	2
$k_{22}$	2

- **Establecer los datos de entrada.**

Tabla 3-2 : Datos de entrada [1].

Step	Tiempo (min)	Temp. Ambiente °C	Load Factor (K)
0	0	30,30	0,81
1	3	29,90	0,87
2	6	29,80	0,88
3	9	29,50	0,86
4	12	29,60	0,90
5	15	29,50	0,92
6	18	29,50	0,95
7	21	28,90	0,96
8	24	29,00	0,97
9	27	28,60	1,00
10	30	28,00	1,70
11	33	28,70	1,70
12	36	27,80	1,73
13	39	28,10	1,72
14	42	27,90	1,69
15	45	27,10	1,68
16	48	26,90	1,71
17	51	26,70	1,69
18	54	27,20	1,67
19	57	26,70	1,68
20	60	26,90	1,63
21	63	26,50	1,59
22	66	26,20	1,53
23	69	26,30	1,49
24	72	25,40	1,41
25	75	25,60	1,38
26	78	25,30	1,32
27	81	24,80	1,28
28	84	24,50	1,21
29	87	24,30	1,19
30	90	24,10	0,87
31	93	24,30	0,88
32	96	24,10	0,87
33	99	23,40	0,86
34	102	23,60	0,85
35	105	23,80	0,87
36	108	23,10	0,83
37	111	23,30	0,86
38	114	23,10	0,85
39	117	22,30	0,82
40	120	22,20	0,86

Las temperaturas ambiente y los factores de carga están disponibles a intervalos de a 3 min. Esta es una etapa de tiempo máxima puesto que debería ser menor que la mitad de la constante de tiempo más pequeña,  $\tau_w$  en las ecuaciones, para una solución precisa. Puesto que  $\tau_w = 7 \text{ min}$  en este caso, la etapa de tiempo  $Dt = 3 \text{ min}$ .

- **Calcular condiciones iniciales.**

Aunque el sistema no puede estar estrictamente en régimen permanente al comienzo de un periodo de cálculo, este es usualmente el mejor que se puede asumir, y tiene poco efecto sobre el resultado.

Las condiciones iniciales, entonces, se calculan ajustando las derivadas de tiempo igual a cero en cada una de las ecuaciones (3-1) (3-2) y (3-3), resultando los siguientes valores.

Tabla 3-3 : Condiciones iniciales [1].

$\theta_{(0)}$	63,9 °C
$\Delta\theta_{h1(0)}$	53,2 K
$\Delta\theta_{h2(0)}$	26,6 K

En caso de que se quiera obtener una condición inicial por la pérdida de vida  $L(0)$  se puede asumir que es cero.

- **Resolver las ecuaciones de diferencia.**

En  $n = 0, t = 0$ ,  $\theta_{(0)} = 63,9 \text{ C}^\circ$ ,  $\Delta\theta_{h1(0)} = 53,2 \text{ K}$ ,  $\Delta\theta_{h2(0)} = 26,6 \text{ K}$  que son las condiciones iniciales del equipo en estudio.

Luego para  $n = 1$ ,  $t = 3 \text{ min}$  y a partir de las ecuaciones (3-6) y (3-7), la temperatura del aceite superior cambia como sigue:

$$D\theta_{o(1)} = \frac{3}{0,5 \times 150} \left[ \left[ \frac{1 + 0,87^2 \times 8}{1 + 8} \right]^{0,8} \times 45 - [63,9 - 29,9] \right] = 0,121 \text{ y} \quad (3-16)$$

$$\theta_{o(1)} = \theta_{o(0)} + D\theta_{o(1)} = 63,9 + 0,121 = 64,0 \quad (3-17)$$

Similarmente a partir de la ecuación (3-8), el calentamiento del punto caliente cambia como sigue:

$$D\Delta\theta_{h1(1)} = \frac{3}{2,0 \times 7} [2,0 \times 35 \times 0,87^{1,3} - 53,2] = 1,12 \text{ y} \quad (3-18)$$

$$\Delta\theta_{h1(1)} = \Delta\theta_{h1(0)} + D\Delta\theta_{h1(1)} = 53,2 + 1,12 = 54,3 \quad (3-19)$$

De la misma manera, con la ecuación (3-9), el segundo término del calentamiento del punto caliente cambia como sigue:

$$D\Delta\theta_{h2(1)} = \frac{3}{(1/2,0) \times 150} \times [(2,0 - 1) \times 35 \times 0,87K^{1,3} - 26,6] = 0,104 \quad (3-20)$$

$$\Delta\theta_{h2(1)} = \Delta\theta_{h2(0)} + D\Delta\theta_{h2(1)} = 26,6 + 0,104 = 26,7 \quad (3-21)$$

Entonces, el calentamiento del punto caliente total, a partir de la ecuación (3-10) es:

$$\Delta\theta_{h(1)} = \Delta\theta_{h1(1)} - \Delta\theta_{h2(1)} = 54,3 - 26,7 = 27,6 \quad (3-22)$$

Finalmente, la temperatura del punto caliente se obtiene con la ecuación (3-11):

$$\theta_{h(1)} = \theta_{o(1)} + \Delta\theta_{h(1)} = 64,0 + 27,6 = 91,6 \quad (3-23)$$

La pérdida de vida  $L$  en esta etapa de tiempo viene dada por:

$$DL_{(1)} = V_{(1)} \times Dt = \left[ e^{\left( \frac{15000}{110+273} + \frac{15000}{\theta_h+273} \right)} \right] \times 3 = 0,42 \text{ min} \quad (3-24)$$

Con esto se obtiene que la pérdida de vida total en este punto es:

$$L_{(1)} = L_{(0)} + DL_{(1)} = 0 + 0,42 = 0,42 \text{ min} \quad (3-25)$$

Luego con  $n = 2, t = 6 \text{ min}$ , se repite el cálculo completo pero con todos los subíndices incrementados en 1 y así continuar hasta  $n = 40$ . La salida correspondiente a la temperatura del punto caliente se muestra en el siguiente figura.

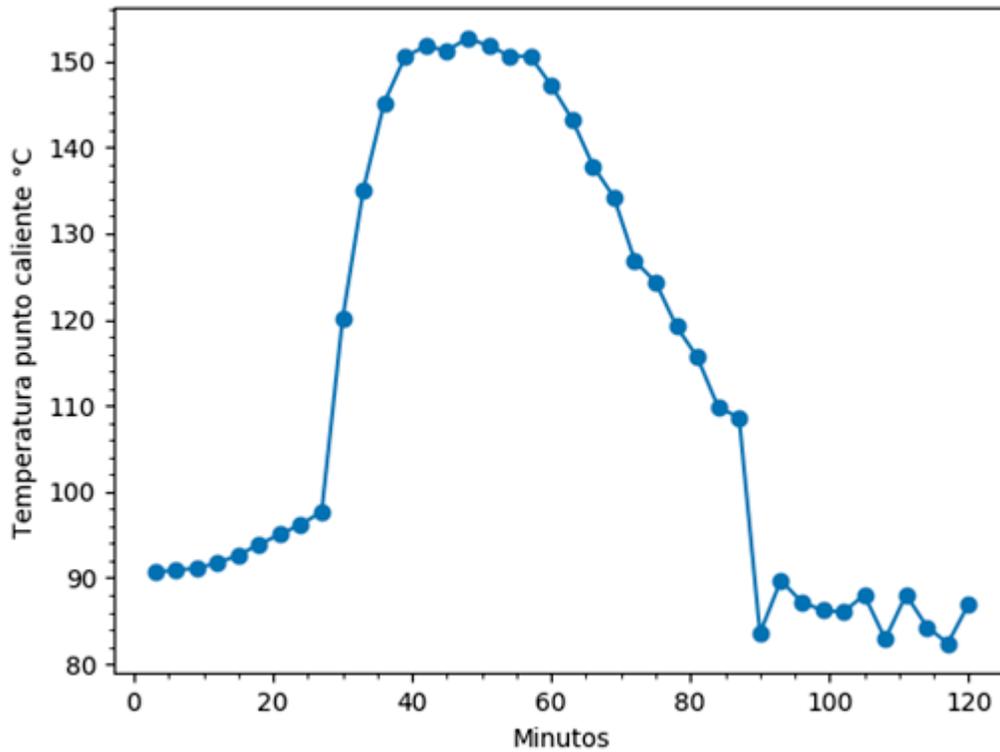


Figura 3-1: Temperatura del punto caliente ante una carga variable (Fuente: Elaboración propia).

Puesto que el tiempo transcurrido es de 2 horas o 0,0833 días, y la pérdida de vida es de 6,15 días, la pérdida de vida relativa durante esta sobrecarga  $6,15/0,0833=74$  veces la normal. Esto es serio si por otra parte hay largos periodos de tiempo (caso habitual) a temperaturas del punto caliente relativamente bajas.

### **3.2 Conclusiones del capítulo**

Este análisis ha permitido entender el comportamiento térmico de un transformador de poder, aspectos importante como sus transitorios, de los cuales hay que considerar que tienen tiempos muy largos (de hasta 8 horas) de esta manera permite tener en cuenta que en caso de simulaciones con algún método numérico estas se realizaran con un tiempo de proceso muy largo.

## 4 Desarrollo y análisis del transformador en elementos finitos.

El siguiente paso de este proyecto es el desarrollo de un modelo de transformador mediante un software de elementos finitos, que en este caso será FLUX 12.1 (by Cedrat), el cual consta de herramientas necesarias para desarrollar el análisis en cuestión, tanto electromagnético como térmico.

### 4.1 Presentación del dispositivo.

El transformador estudiado es conformado por las siguientes partes:

1. Núcleo magnético (Verde) que consta de tres columnas.
2. Una bobina (turquesa) de baja y una de alta tensión por cada columna.
3. Dos derivaciones, una de Yugo y otra de Pared (Azul).
4. Marcos de hierro magnético masivo (Magenta).
5. Barras de distribución que generan la salida de corriente y están hechas de material de cobre.

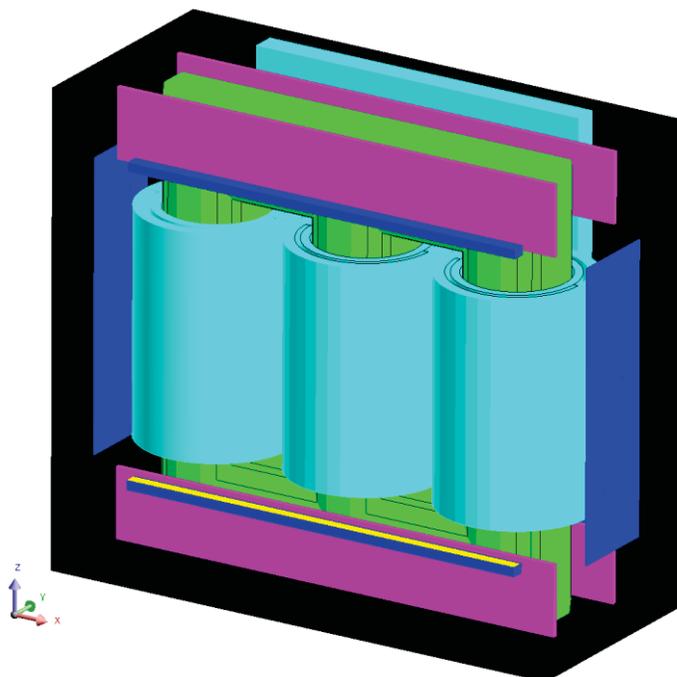


Figura 4-1: Dispositivo y sus partes.

Los parámetros del transformador a desarrollar son los siguientes:

Tabla 4-1: Parámetros Eléctricos del Transformador [19].

Parámetro	Valor
Potencia	150 MVA
Frecuencia	50 Hz
Voltajes VH/VL	132 / 14.1 kV
Corrientes IH/IL	655 / 3537 A
Número de vueltas NH / NL	432 / 80
Conexión	Y-D

Cada una de sus partes presenta características físicas mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 4-2 Características Físicas del transformador [19].

Componen te	Material	Permeabilidad relativa	Resistividad (Ohm/m)	Saturación Magnética (T)	Orientación de laminación
Núcleo	CRGO	55000	$2.07 * 10^{-7}$	1.8	Laminación a lo largo del núcleo ( $e=2.7 * 10^{-4} m$ )
Derivación de Yugo	CRGO	55000	$2.07 * 10^{-7}$	1.8	Laminación en el borde, paralelo al marco
Derivación de Pared	CRGO	55000	$2.07 * 10^{-7}$	1.8	Laminación a lo ancho en paralelo al estanque ( $e=2.7 * 10^{-4} m$ )
Marcos y pared del Estanque	Hierro Forjado	800	$2 * 10^{-7}$	1.5	Sin laminación

Por otra parte, los bobinados presentan las siguientes características:

Tabla 4-3 Características de los bobinados [19].

Componente	Material	Resistividad (ohm ·m)	Numero de vueltas
Bobinado Alto Voltaje	Cobre	$2.1 * 10^{-8}$	432
Bobinado Bajo Voltaje	Cobre	$2.1 * 10^{-8}$	80
Barras de distribución	cobre	$2.1 * 10^{-8}$	No aplica

Tabla 4-4 Dimensiones de bobinados

Componente	Ancho del alambre en la dirección radial (mm)	Longitud del cable en dirección axial (mm)	Número de conductores en dirección radial (mm)	Número de conductores en dirección axial
Conductor de alto voltaje	1.4	5.4	52	224
Conductor de bajo voltaje	2	8.2	35	160

## 4.2 Dimensiones y características de sus componentes.

Para apreciar bien el dispositivo se procede a detallar las dimensiones de cada uno de sus componentes y a su vez exponer sus características.

### 4.2.1 Núcleo.

En las siguientes figuras se muestra la forma del núcleo, sus dimensiones y la ser un núcleo escalonado se indica el número de niveles (Figura 2-3).

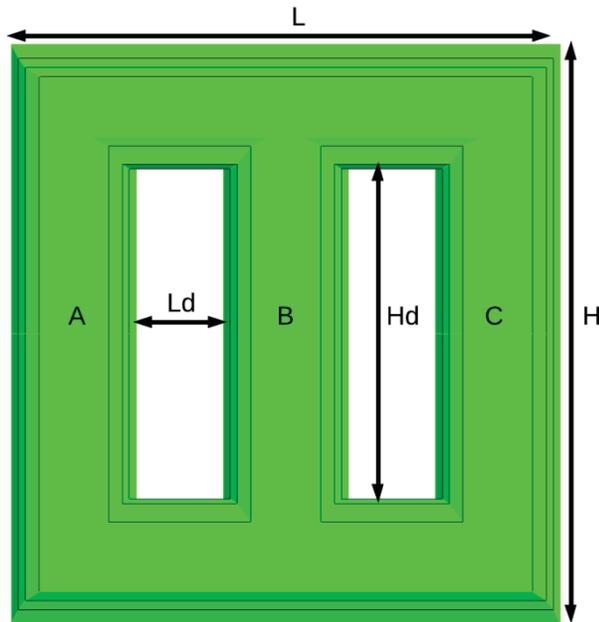


Figura 4-2: Núcleo visto de frente y sus dimensiones.

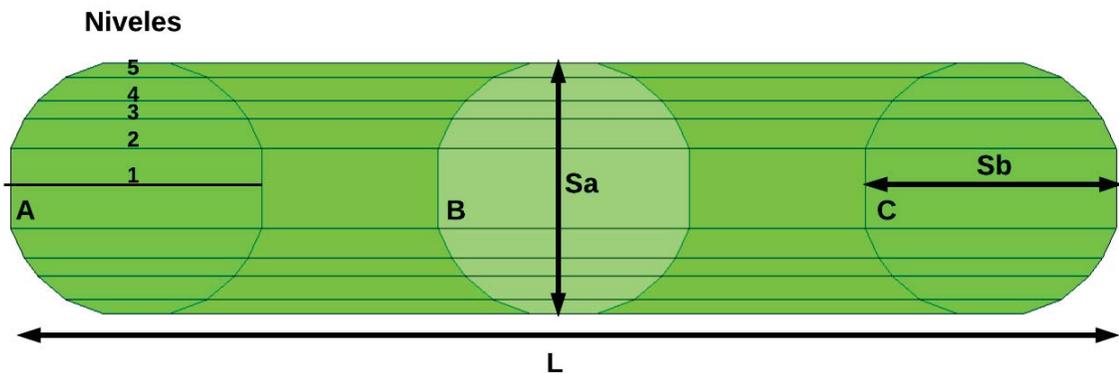


Figura 4-3: Sección de columnas, espesor y número de niveles del núcleo visto por sobre el yugo.

En la siguiente tabla se muestran los valores de las dimensiones mostradas anteriormente:

Tabla 4-5 : Dimensiones del núcleo [19].

Dimensión	Abreviación	Longitud (m)
Altura del Núcleo	H	3,815
Longitud del Yugo	L	3,610
Sección de los yugos y Columnas	Sb	0,820
Espesor del Núcleo	Sa	0,816
Distancia entre Piernas	Ld	1,395
Distancia entre yugos	Hd	2,175

#### 4.2.2 Devanados de alta y baja tensión

La configuración de las bobinas consiste en un devanado alta tensión rodeando cada pierna del núcleo, mientras la bobina de baja tensión se encuentra entre los devanados de alta tensión y el núcleo. Estas en un transformador real se asemejan a un cilindro como se muestra en la figura 2-4.

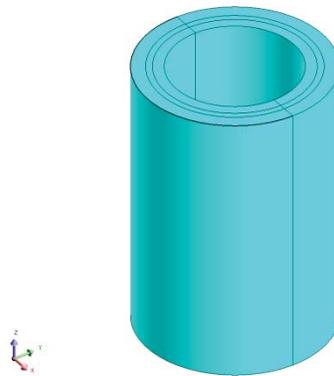


Figura 4-4 : Devanados del transformador.

En un transformador real y en la mayoría de las configuraciones existe una pequeña separación entre los devanados de alta y de baja. Si bien en general existe aceite refrigerante circulando en estas ranuras, como en esta sección solo se realizará un análisis electromagnético por ahora en este espacio se configurará relleno de aire, como se muestra en la figura 2-5.

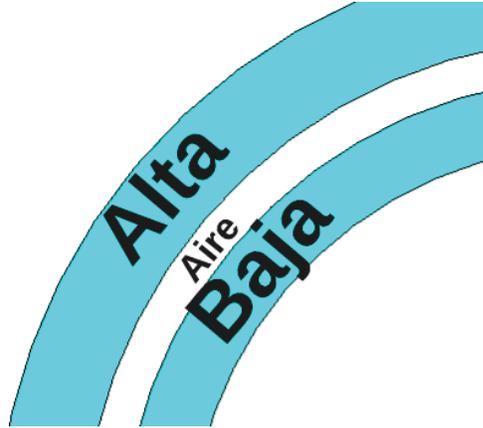


Figura 4-5 : Dimensiones de altura y radios de bobina de alta y de baja tensión.

En la figura 2-6 se muestran los parámetros para dimensionar los devanados, la altura y los radios de cada uno. En la tabla 2-6 se muestran los valores de estos parámetros.

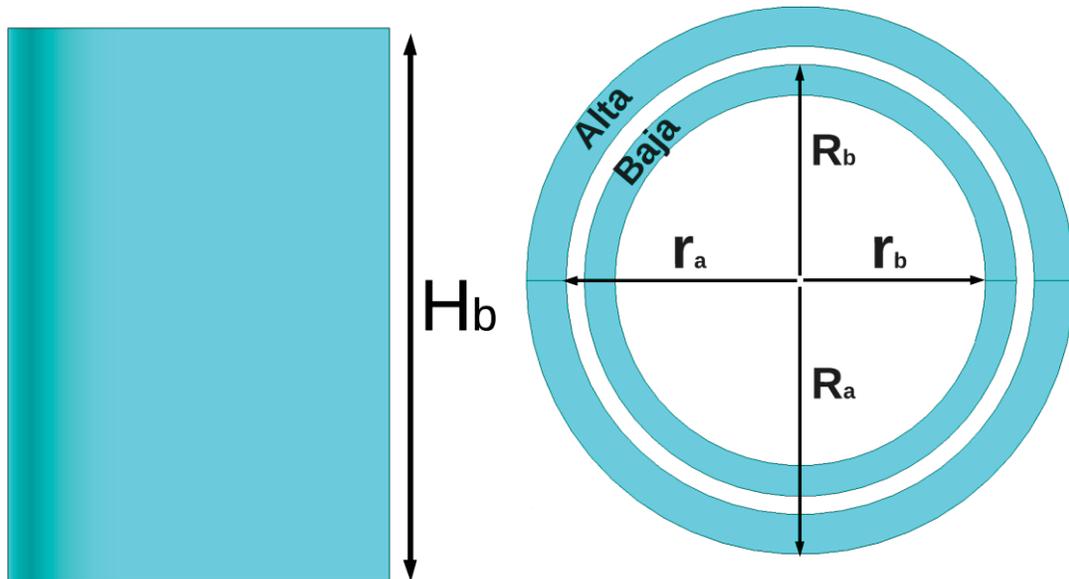


Figura 4-6 : Aire entre bobina de alta y de baja tensión.

Tabla 4-6 : Dimensiones de los devanados [19].

Dimensión	Abreviación	Longitud (m)
Altura de los devanados	H	3,815
Radio interior devanado alta tensión	L	3,610
Radio interior devanado baja tensión	Sb	0,820
Radio exterior devanado alta tensión	Sa	0,816
Radio exterior devanado de alta tensión	Ld	1,395

### 4.2.3 Derivación de Yugo

Al considerar la existencia de flujo magnético de fuga, es necesario canalizarlo en un volumen específico de material magnético, para así reducir las pérdidas que produciría si este se desviara hacia los Yugos (material no magnético), El dispositivo se muestra en la siguiente figura.

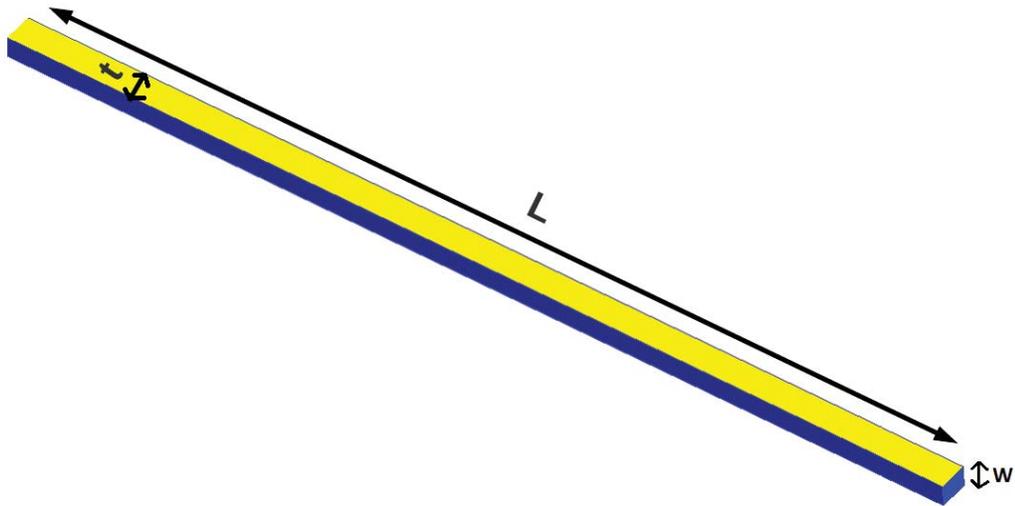


Figura 4-7: Derivación de Yugo.

Tabla 4-7: Dimensiones de la Derivación del Yugo [19].

Dimensión	Abreviación	Longitud (m)
Largo del yugo	L	3,60
Anchi del yugo	t	0,11
Alto del yugo	W	0,08

#### 4.2.4 Derivación de Pared

Este elemento está conformado por placas de acero magnético laminado y tiene la finalidad de canalizar el flujo magnético de fuga que podría captar el metal no magnético de la pared del estanque, reduciendo así las pérdidas que produciría. El componente se muestra en las siguientes figuras:

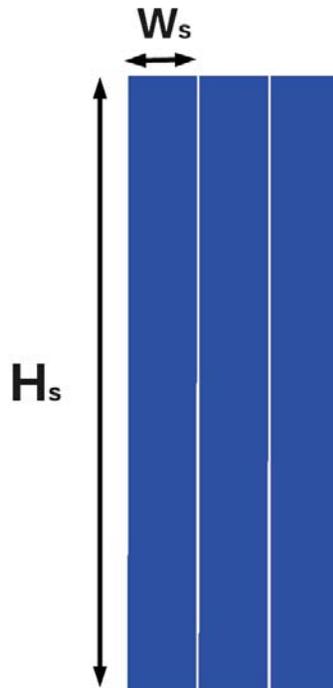


Figura 4-8: Derivación de Pared.

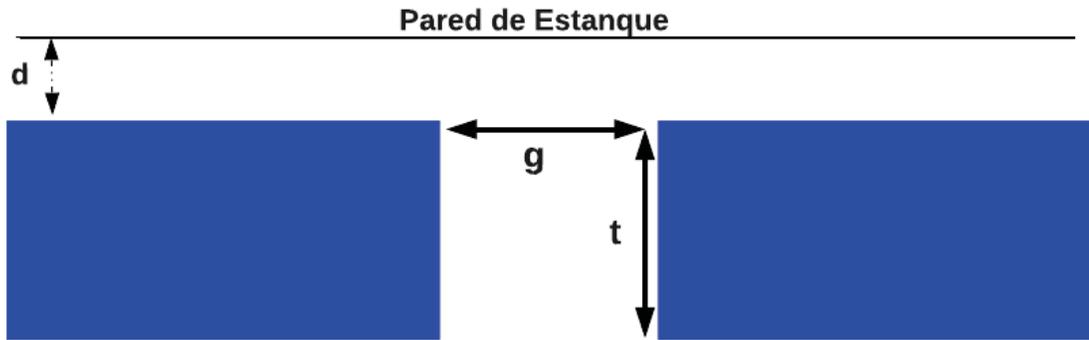


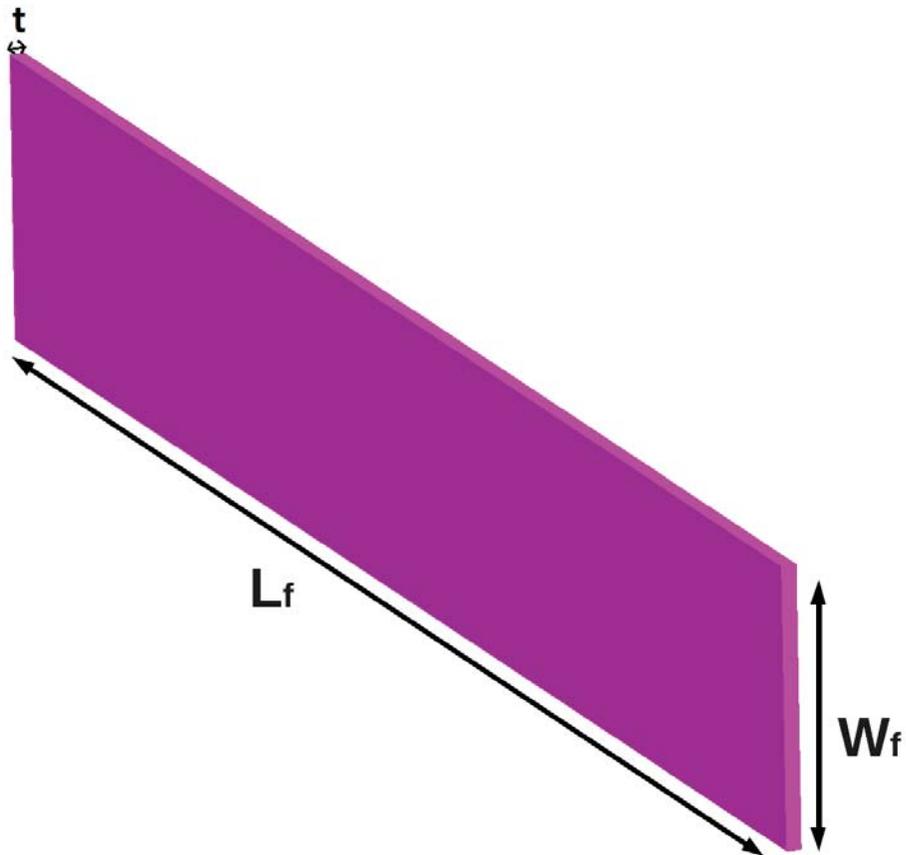
Figura 4-9: Espaciado ( $g$ ), anchura de cada lamina ( $t$ ) y distancia de la derivación a la pared del estanque ( $d$ ), visto por sobre la lámina.

Tabla 4-8: Dimensiones de la Derivación de Pared [19].

Dimensión	Abreviación	Longitud (m)
Altura	Hs	2,50
Anchura de cada lamina	Ws	0,25
Espesor	t	0,01
Espacio entre cada lamina	g	0,01
Distancia entre derivación de pared y pared del estanque	d	0,01

### 4.2.5 Marcos de los Yugos

Los marcos tienen la función de soporte para los yugos del transformador, están hechos de acero no magnético. El dispositivo cuenta con cuatro de estas, de las cuales dos están en el yugo superior y dos en el yugo inferior del transformador.



Listado 4-1: Marco que sostiene los yugos.

Tabla 4-9: Dimensiones del marco de los Yugos [19].

Dimensión	Abreviación	Longitud (m)
Altura	Hs	4,07
Anchura	W	0,61
Espesor	t	0,03

#### 4.2.6 Tanque

El tanque es el que contiene el transformador, el cual generalmente contiene aceite o gas refrigerante en su interior, pero como al igual como se comentó anteriormente para efectos de análisis electromagnético este contenido no influye, por lo cual se establece este volumen con las características del aire.

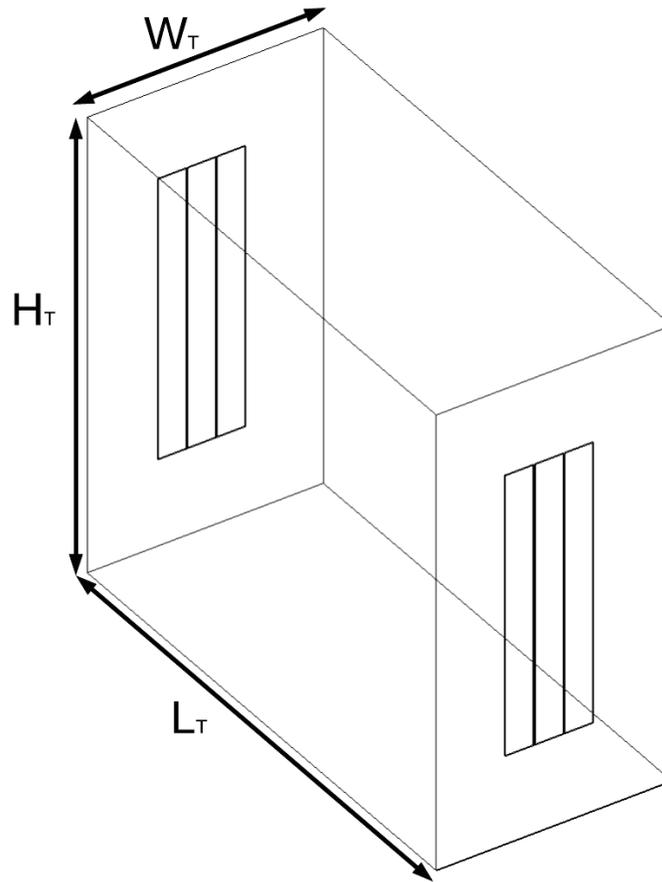


Figura 4-9: Tanque que contiene al transformador.

Tabla 4-10: Dimensiones del Tanque [19].

Dimensión	Abreviación	Longitud (m)
Altura	HT	4,06
Anchura	LT	4,60
Espesor	WT	2,02

#### 4.2.7 Barras de distribución

Las barras de distribución son las salidas de las corrientes del devanado secundario y están hechas de cobre. Para este modelo aun no es necesario implementar barras de distribución en el primario, ya que este es configurado con una corriente fija impuesta, por otro lado las corrientes del secundario son las inducidas por el primario, de esta manera es necesario adicionar barras de distribución. Las barras de distribución se muestran en la siguiente figura:

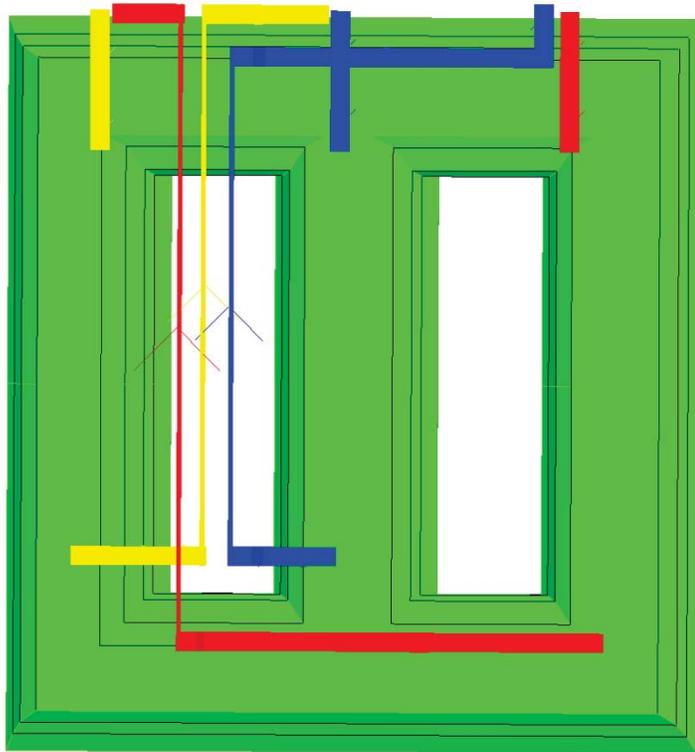


Figura 4-10: Barras de distribución.

Estas son tres, una para cada devanado secundario, y presentan una sección transversal rectangular de  $1.200 \text{ [mm}^2\text{]}$ , como se muestra en la figura:

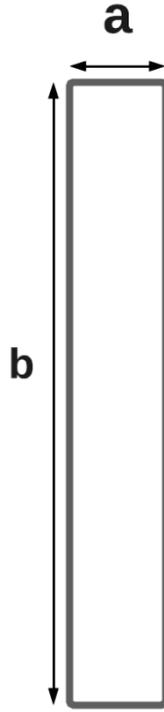


Figura 4-11: Sección Transversal de las barras.

Tabla 4-11: Dimensiones de las barras de distribución [19].

Dimensión	Abreviación	Longitud (m)
Largo sección transversal	b	0,10
Ancho sección transversal	a	0,01
Largo barra distribución A	La	6,85
Largo barra distribución B	Lb	5,30
Largo barra distribución C	Lc	4,98

### 4.3 Descripción física del modelo.

Para modelar el dispositivo es necesario configurar los parámetros físicos de los materiales que ocupan cada volumen en elementos finitos, de esta manera en este capítulo se procede a detallar cada una de estas características, las cuales fueron asignadas de acuerdo a la precisión necesaria (que depende de la malla) y a los tipos de resultados esperados (que depende de las características del material).

#### 4.3.1 Descripción de la malla.

En la siguiente tabla están detalladas las características de las mallas a ocupar en cada espacio de volumen, de estas las que poseen elementos finitos más pequeños es donde se requiere mayor precisión en los resultados. Por otro lado, la mayoría posee tipos de elementos finitos tipo triangular, la excepción sería la región de volumen que corresponde a los devanados, los cuales tienen forma cuadrada que es generado con “MAPPED”. En la siguiente tabla se muestran las mallas ocupadas con sus respectivos volúmenes.

Tabla 4-12 : Características de la malla [19].

Volumen de elementos finitos	Tipo de malla	Tamaño de elementos [mm]
Núcleo	Automática (triangulares)	50.0
Tanque	Automática (triangulares)	150
Derivaciones de pared	Automática (triangulares)	15.0
Derivaciones de yugo	Automática (triangulares)	35.0
Barras	Tipo Mapped	35.0
Devanados	Automática (triangulares)	55.3

Se observa que las derivaciones de pared tienen los elementos finitos de menor tamaño, esto es para lograr un resultado con mayor precisión en esta zona que presenta una forma muy delgada y una densidad de flujo magnético menor que las demás regiones.

En la siguiente figura se puede observar el dispositivo completo enmallado:

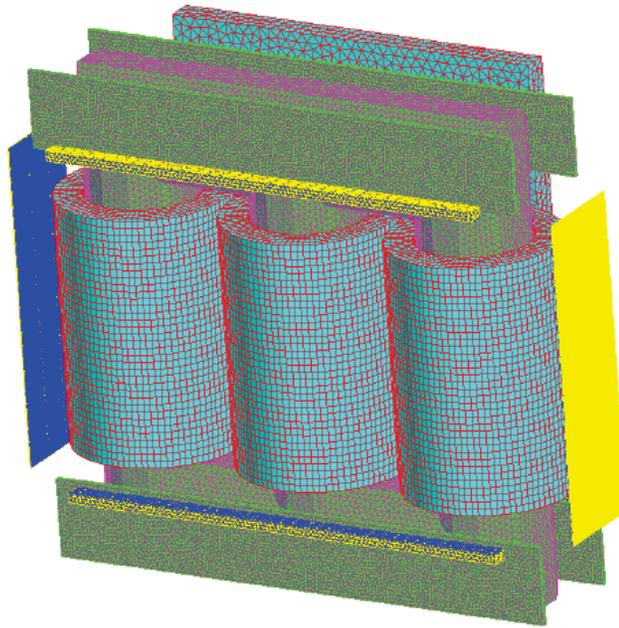


Figura 4-12 : Dispositivo con enmallado.

### 4.3.2 Parámetros físicos del núcleo.

El núcleo está hecho de acero ferromagnético laminado de grano orientado tipo M-4 [2], el cual es modelado con las siguientes características físicas [19]:

Tabla 4-13 : Parámetros físicos del material del núcleo [19].

Material	
Nombre	crgo_core
Propiedad magnética	Isotropic analytic saturation (arctg, 2 coeff)
Permeabilidad relativa inicial	55000
Magnetización de saturación	1.8 [T]
Tipo de curva B(H)	Densidad de flujo sinusoidal

Tabla 4-14 : Configuración de la región de volumen del núcleo [19].

Región de volumen	
Nombre	Core
Tipo de región	Magnetic non conducting region
Material de la región	crgo_core

### 4.3.3 Parámetros físicos del tanque.

El tanque se configuró con volumen región con características del aire, es decir que no tiene cualidades magnéticas. Por otro lado para las paredes del estanque se configuró una región superficie con las características del acero, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4-15 : Propiedades del material de las paredes del estanque [19].

Material	
Nombre	Tank_Surface
Propiedad magnética	Linear isotropic ( $\mu_r=100$ )
Propiedades eléctricas	Isotropic Resistivity ( $1.77e-7$ [ohm · m])

Tabla 4-16 : Configuración de la región de superficie de las paredes del tanque [19].

Región superficie	
Nombre	Tank
Tipo de región	Surface impedance region
Material de la región	Tank_Surface

#### 4.3.4 Parámetros físicos de los devanados.

Para efectos de los resultados que se desea obtener en los devanados, que en este caso fueron las pérdidas por efecto Joule y por efecto Foucault, además siendo sabida universalmente la resistividad del cobre, no es necesario darle cualidades físicas específicas, las pérdidas por efecto joule se pueden obtener mediante  $I^2 \cdot R$  y las pérdidas por Foucault se obtuvieron con el método ocupado en la sección 4.4 de este informe, así el tiempo de simulación es reducido.

Por lo anteriormente comentado, a esta región no se le otorgó propiedades físicas, como se detalla a continuación:

Material:

- Sin propiedades físicas.
- Región de volumen:
  - Nombre: Air
  - Tipo de Región: Air or vacuum region.

### 4.3.5 Parámetros físicos de los marcos de hierro.

Los marcos de hierro cumplen la función de sostener en núcleo, los cuales se les configuró de la siguiente manera:

Tabla 4-17 : Parámetros físicos del material de los marcos [19].

Material	
Nombre	Mild_steel_frame
Propiedades Magnéticas	Isotropic analytic saturation (arctg, 2 coeff).
Permeabilidad relativa inicial	400
Magnetización de saturación	1.5 [T]
Tipo de curva B (H)	Densidad de flujo sinusoidal

Tabla 4-18 : Configuración de la región volumen de los marcos de hierro [19].

Región volumen	
Nombre	Frame
Tipo de región	Solid conductor region described by surface impedance
Material de la región	Mild_steel_frame

### 4.3.6 Parámetros físicos de las derivaciones.

Para las derivaciones de flujo magnético es más complejo modelar ya que son volúmenes de alta laminación y muy delgados. En este cada derivación esta fija, a los marcos y a la pared del tanque, mediante una lámina muy delgada de acero magnético y conductor (lámina de fijación). Para la configuración de la región volumen de estas partes se le otorgó la característica de “Air or vacuum region”. De esta manera, para el caso de las derivaciones se presentan las siguientes características físicas:

#### a) Derivaciones de pared

##### I. Derivación

Tabla 4-19 : Parámetros físicos del material de la derivación [19].

Material	
Nombre	CRGO_M4_SHUNT
Propiedades Magnéticas	Isotropic Analytic Saturation (Arct. 2 coeff)
Permeabilidad relativa inicial	55000
Magnetización de saturación [T]	1.8
Tipo de curva B [H]	Densidad de flujo sinusoidal

Tabla 4-20 : Configuración de la región de superficie de la derivación [19].

Región superficie	
Nombre	LAMINATED_WALL_SHUNT
Tipo de región	Magnetic non conductin region
Material de la región	CRGO_M4_SHUNT
Grueso de la región	$10 \cdot 10^{-3}[m]$

I. Lámina de fijación

Tabla 4-21 : Parámetros físicos otorgados al material de la lámina de fijación [19].

Material	
Nombre	SHUNT_FIXATION_PLATE
Propiedades Magnéticas	Linear isotropic
Permeabilidad relativa inicial	250
Resistividad isotrópica [ $ohm \cdot m$ ]	$1.77 \cdot 10^{-7}$

Tabla 4-22 : Configuración de la región de superficie de la lámina de fijación [19].

Región superficie	
Nombre	WS_FIXATION_PLATE
Tipo de región	Thin conducting region (Hyperbolic current density through the thickness)
Material de la región	SHUNT_FIXATION_PLATE
Grueso de la región	$3 \cdot 10^{-3}[m]$

**b) Derivaciones de yugo y láminas de fijación:**

## I. Derivación

Tabla 4-23 : Configuración de la región de superficie de la derivación [19].

Región de superficie	
Nombre	LAMINATED_YOKE_SHUNT
Tipo de región	Magnetic non conducting region. Almost tangential magnetic flux.
Material de la región	CRGO_M4_SHUNT
Grueso de la región	$3 \cdot 10^{-3} [m]$

## II. Lámina de fijación

Tabla 4-24 : Configuración de la región de superficie de la derivación [19].

Región de superficie	
Nombre	YS_FIXATION_PLATE
Tipo de región	Thin conducting region (hyperbolic current density through the thickness)
Material de la región	SHUNT_FIXATION_PLATE
Grueso de la región	$3 \cdot 10^{-3} [m]$

### 4.3.7 Parámetros eléctricos del circuito.

Para este caso se configuró corrientes nominales en los devanados con la intención de poder realizar un ensayo a plena carga del transformador. En este caso no es necesario confeccionar un circuito, bastó con asignarle a cada bobina no enmallada un elemento eléctrico de bobina trenzada, una para cada devanado como se detallan en las siguientes tablas:

Tabla 4-25 : Parámetros asignados a los devanados de la fase A [19].

Fase A	Bobina de alta	Bobina de Baja
Nombre bobina tensada	B_HV_A	B_LV_A
Tipo de bobina trenzada	Stranded coil with imposed current [A]	Stranded coil with imposed current [A]
Valor de corriente	655 [A]	3537 [A]
Fase (en grados)	0°	180°

Tabla 4-26 : Parámetros asignados a los devanados de la fase B [19].

Fase B	Bobina de alta	Bobina de Baja
Nombre bobina tensada	B_HV_B	B_LV_B
Tipo de bobina trenzada	Stranded coil with imposed current [A]	Stranded coil with imposed current [A]
Valor de corriente	655 [A]	3537 [A]
Fase (en grados)	-120°	60°

Tabla 4-27 : Parámetros asignados a los devanados de la fase C [19].

Fase A	Bobina de alta	Bobina de Baja
Nombre bobina tensada	B_HV_C	B_LV_C
Tipo de bobina trenzada	Stranded coil with imposed current [A]	Stranded coil with imposed current [A]
Valor de corriente	655 [A]	3537 [A]
Fase (en grados)	120°	-60°

#### 4.3.8 Definición de la aplicación.

Para poder llevar a cabo la resolución del problema modelado es necesario definir las características en las cuales se tomará la muestra de datos. En la siguiente tabla se definen las características de la aplicación en la cual se lleva a cabo el proceso de resolución [20].

Steady State AC Magnetic 3D application	
Frecuencia de trabajo	50 Hz
Formulation model	Automatic formulation
Approximating functions type for vector potential	Nodal finite elements

Figura 4-13 : Definición de la aplicación [19].

#### 4.4 Ensayo a plena carga.

Luego de la configuración de parámetros físicos, los cuales definen el comportamiento del fenómeno que ocurre con el transformador en funcionamiento, se continuó con el análisis de resultados de un ensayo a plena carga, de los cuales se desprenden varias síntesis que se detallarán a continuación.

##### 4.4.1 Densidad de flujo magnético en el núcleo.

Para poder observar con detalle el comportamiento magnético del transformador, en la siguiente figura se presenta la distribución de la densidad de flujo magnético (en Tesla) en todo el volumen del núcleo, es ahí por donde se canaliza casi la totalidad del flujo magnético.

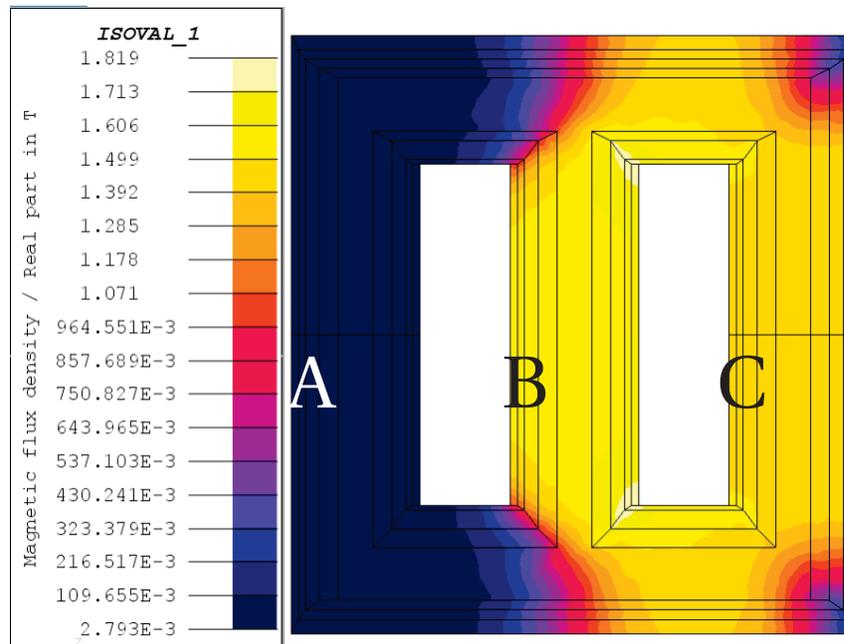


Figura 4-14 : Densidad de flujo magnético en el núcleo.

La aplicación que se estableció para el análisis de resultados es “Steady State AC Magnetic 3D application”, la cual toma los datos cuando se alcanza el estado estable de funcionamiento del dispositivo, de esta manera capta los datos de densidad de flujo magnético en un instante determinado del estado estable.

Se puede observar en la Figura 4-14 que de las tres piernas del núcleo hay dos (las del lado derecho) que presentan mayor densidad de flujo. Esto se puede explicar observando las corrientes de cada devanado que se muestran a continuación:

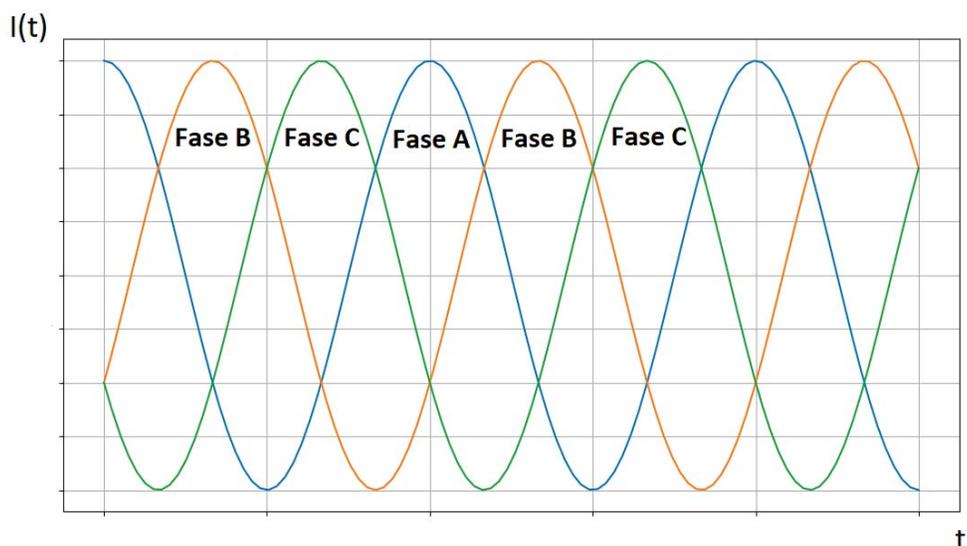


Figura 4-15 : Corrientes de fase del transformador.

Cada corriente de fase está desfasada en  $120^\circ$  cada una, dado que el flujo magnético en el núcleo es inducido por las corrientes este también presenta un desfase de  $120^\circ$  [23]. Este desfase ocurre cuando una de las tres fases supera en magnitud de corriente positivamente a las otras dos, mientras que el flujo magnético producido por esta corriente se canaliza por la pierna del núcleo en donde su bobina respectiva tiene una mayor corriente negativa. Esto se puede apreciar en la siguiente figura, la cual muestra en que piernas está canalizado la mayor parte del flujo magnético.

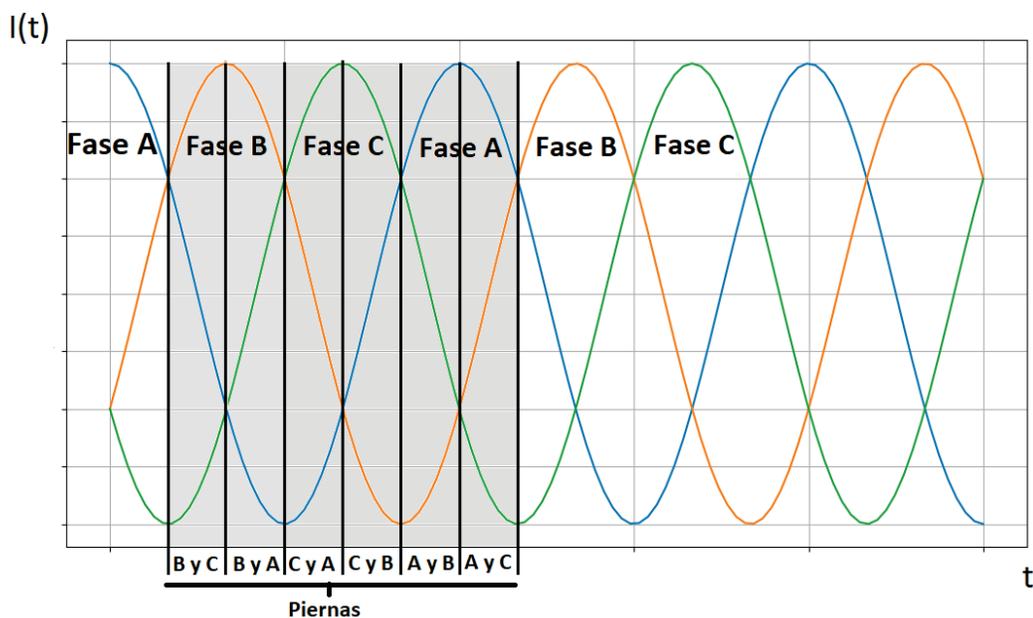


Figura 4-16 : Corrientes de fase y las piernas con mayor flujo magnético.

Así se observa que en el caso cuando la corriente mayor es en la fase A, la primera mitad de este periodo la corriente más negativa es de la fase C, por ende el flujo magnético va a ser canalizado mayoritariamente por la pierna B y C, mientras que en la segunda mitad de este periodo la

corriente más negativa está en la fase A, de esta manera la mayor parte del flujo magnético se canaliza en las piernas B y A. De esta manera continúa variando el flujo magnético entre las piernas con un desfase de  $120^\circ$  entre ellas.

En concordancia con estos ciclos, se pudo deducir que en el momento en que se toma la muestra de la densidad de flujo magnético en el núcleo puede ser un semiperiodo cuando la mayor corriente está en la fase B o C. Más aun, se pudo observar que en la pierna B tiene una leve diferencia de superioridad en cuanto a la densidad de flujo, por este hecho se dedujo que la muestra se tomó en un semiperiodo donde la fase B presentaba mayor corriente que las demás.

#### 4.4.2 Densidad de flujo magnético en las derivaciones.

Como ya se había comentado anteriormente, las derivaciones son elementos que captan el flujo de dispersión, es decir el flujo que no capta el núcleo y que generalmente se canalizaría por las paredes o terminaciones del estanque, las cuales están hechas de material conductor y con una menor permeabilidad magnética, así al ser canalizados por las derivaciones que están elaboradas con material no conductor y acero magnético se puede disminuir las pérdidas debidas a este flujo de dispersión.

En las siguientes figuras se puede observar los isovalores correspondientes a la densidad de flujo magnético por las derivaciones de pared y las derivaciones de yugo respectivamente.

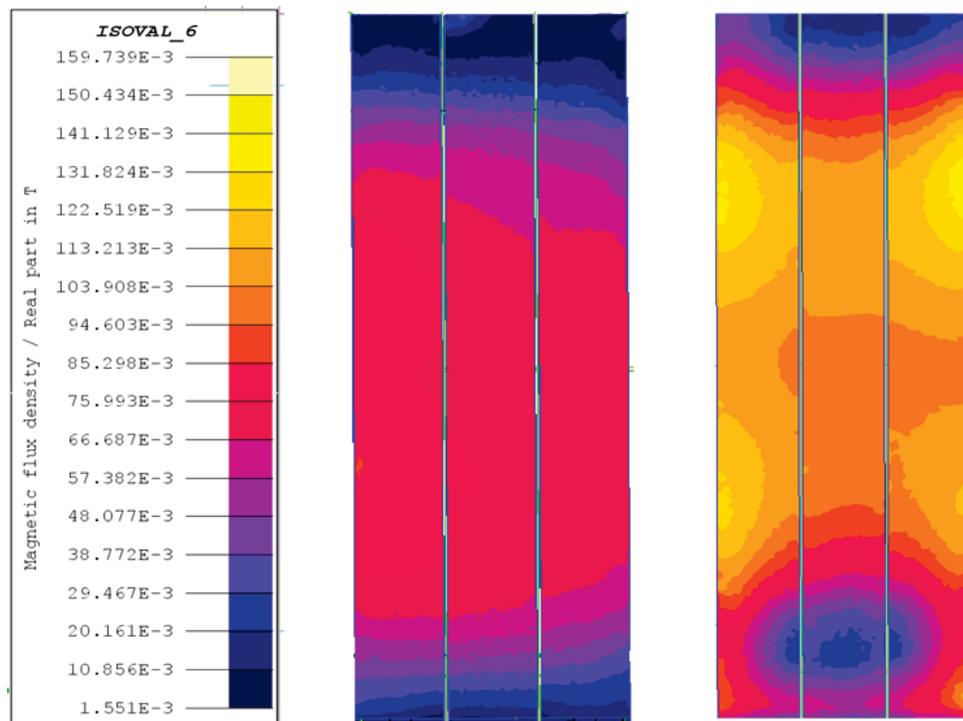


Figura 4-17: Densidad de flujo magnético en las derivaciones de pared.

Se puede apreciar que la derivación del lado izquierdo es la que tiene una mayor densidad de flujo, que justamente coincide con que el lado izquierdo del núcleo en el instante en que se toma la muestra, el cual también presenta una mayor densidad de flujo. Es posible traducir esta relación a que la mayor dispersión de flujo se produce donde la densidad de flujo es mayor en el núcleo.

Por otro lado, tenemos las derivaciones de yugo, las cuales se presentan a continuación:

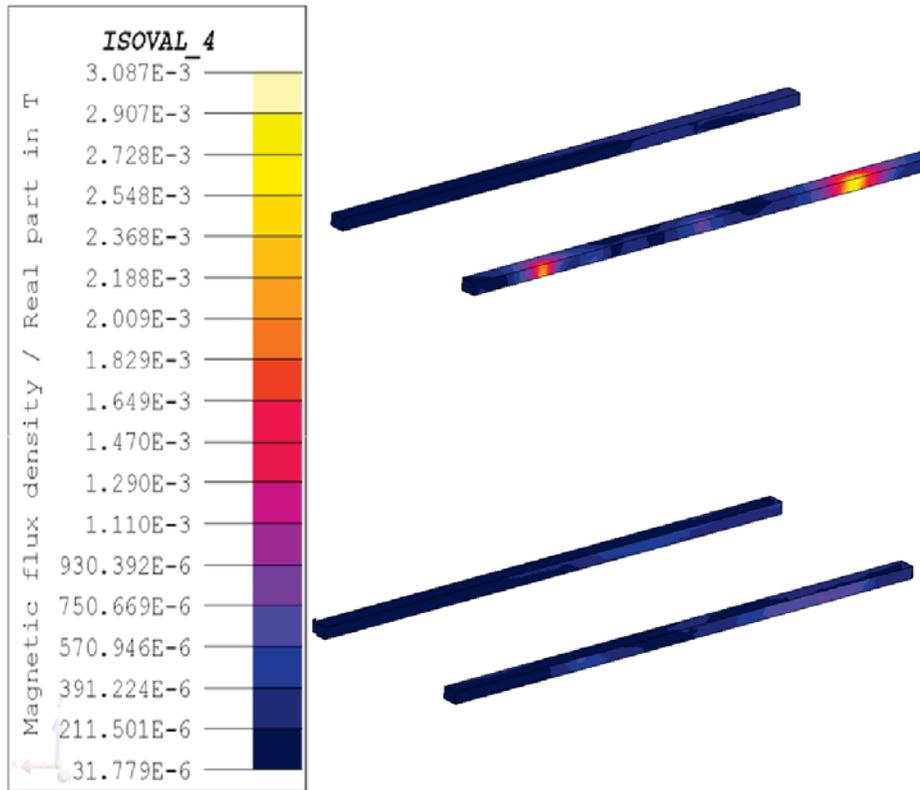


Figura 4-18 : Densidad de flujo en las derivaciones de yugo.

Se puede observar que las derivaciones de yugo también canalizaron flujo de dispersión, además de esto se observó una leve asimetría la cual se observa en la figura 4-8, una de las derivaciones superiores mostró mayor canalización que las demás. Este fenómeno se le atribuyó a una disimetría en las derivaciones de pared, las cuales están instaladas en la pared del estanque pero no equidistantes a todas las derivaciones de yugo, sino que están unos cuantos centímetros cargados hacia una dirección, como se muestra en la siguiente figura:

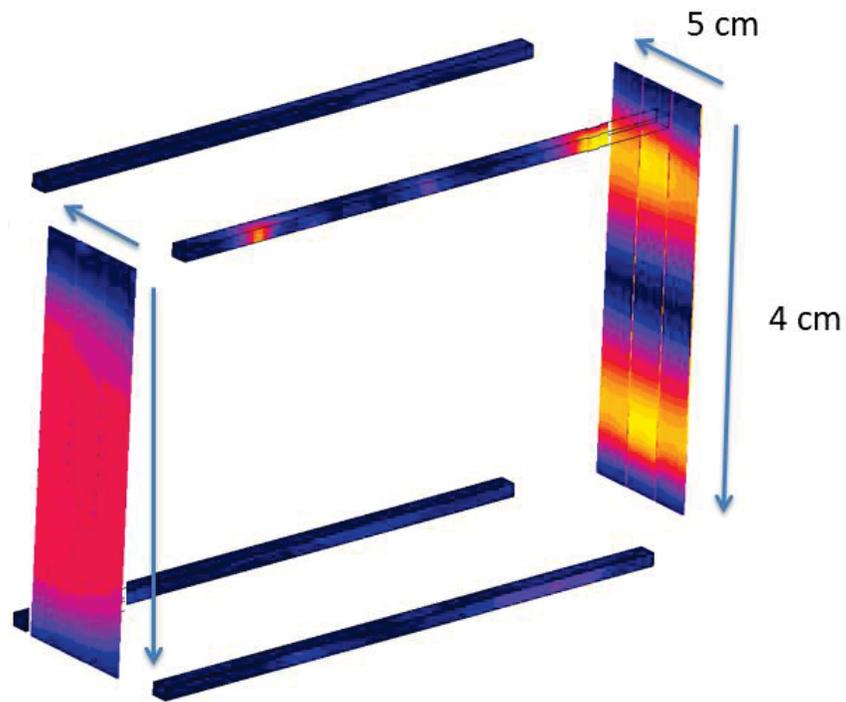


Figura 4-19 : La dirección de la posición asimétrica de las derivaciones.

Como se puede observar, están ubicados cuatro centímetros más hacia abajo y cinco centímetros más hacia atrás en relación a una posición que equidistaría de las derivaciones de yugos.

Se pudo concluir que leves asimetrías en la construcción de un dispositivo influyen de manera considerable la funcionalidad de las partes del dispositivo.

## 4.5 Análisis de pérdidas

A continuación se procedió a calcular las pérdidas en el transformador, las cuales mayoritariamente corresponden a las pérdidas por efecto Joule en los devanados [21], aunque no son despreciables las pérdidas procedentes de efecto Foucault tanto en los devanados como en el núcleo y las derivaciones.

### 4.5.1 Pérdidas en el núcleo y derivaciones.

Para obtener las pérdidas en el núcleo se utiliza el método de Bertotti [22], el cual consiste en una aproximación cuadrática de las pérdidas en el acero magnético. Para entender esta aproximación es necesario observar la curva de pérdidas reales de un acero tipo M-4, uno de los más utilizados [2] y el que se ocupó para este modelo. Las pérdidas reales se muestran en la siguiente figura:

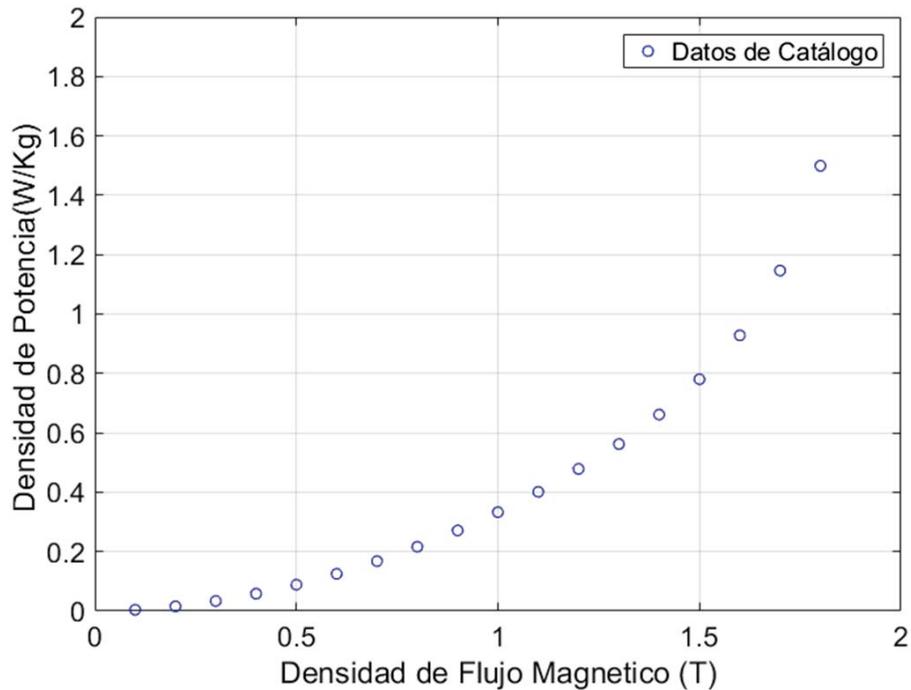


Figura 4-20 : Densidad de pérdidas en función de la densidad de flujo magnético (Acero M-4)  
(Fuente: Elaboración propia).

Se puede apreciar una tendencia cuadrática en la curva, que si bien no es perfectamente cuadrática se podría plantear una función bastante aproximada. En este caso el método de Bertotti plantea un tipo de función cuadrática como la que se muestra a continuación [19]:

$$dP_{moy} = \left[ k_h B_m^2 f + \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} (B_m f)^2 + k_e (B_m f)^{3/2} \cdot 8.67 \right] k_f \quad (4-1)$$

Para esta ecuación, los parámetros se describen en la siguiente tabla:

Tabla 4-28 : parámetros de la ecuación de Bertotti [19].

Parámetro	Significado	Unidad
$k_h$	Coefficiente de pérdidas magnéticas por histéresis	$Ws/T^2 m^2$
$\sigma$	Conductividad	$Sm^2$
$k_e$	Coefficiente de pérdidas en exceso	$W(Ts^{-1})^{-3/2} m^{-3}$
$d$	Espesor de laminación	$m$
$k_f$	Coefficiente de relleno	-
$f$	Frecuencia	$Hz$

Para este modelo se eligieron los parámetros desde el catalogo del acero magnético M-4, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 4-29 : Valores ocupados para este modelo [25].

$k_h$	13.14	$Ws/T^2 m^2$
$\sigma$	4822100	$Sm^2$
$k_e$	0.265	$W(Ts^{-1})^{-3/2} m^{-3}$
$d$	$0.27 \times 10^{-3}$	$m$
$k_f$	0.97	-
$f$	50	$Hz$

De esta manera la curva que más se adapta al comportamiento de las pérdidas en el material real sería la siguiente:

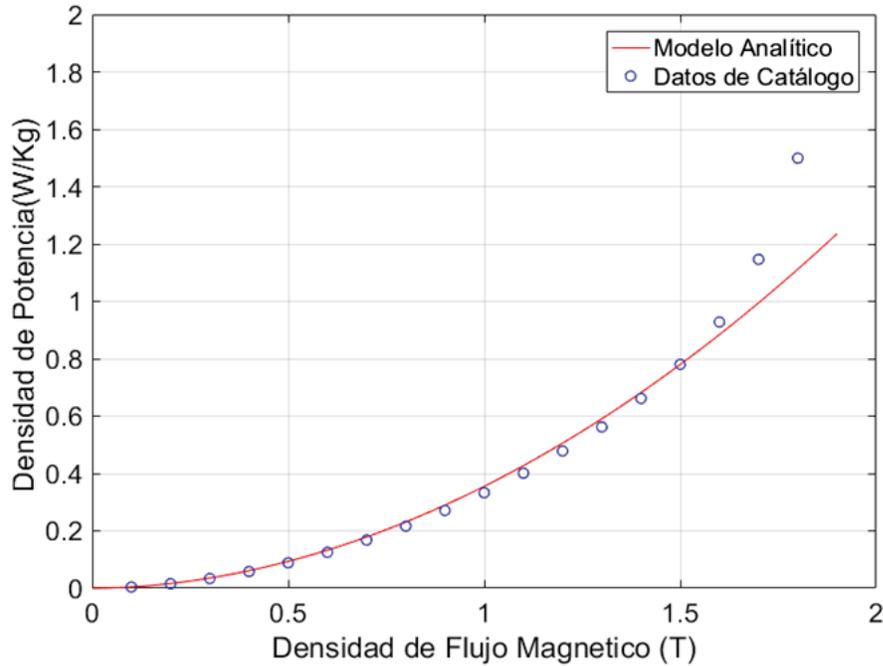


Figura 4-21 : Curvas de modelo analítico y de los datos de catálogo.

Si bien se adapta bastante al modelo real de pérdidas, en los puntos más altos de densidad de flujo hay un error considerable el cual se debió tomar en cuenta al momento de los resultados.

De esta manera, las pérdidas en el tanque son:

Tabla 4-30 : Pérdidas en el núcleo.

Pérdidas en el núcleo
37300 W

Para las pérdidas correspondientes a las derivaciones se consideró solo las producidas por la lámina de fijación, ya que por las derivaciones mismas las corrientes por Foucault son despreciables debidos a su alta laminación, de esta manera en el modelo computacional se enfocó en las pérdidas producidas por el tanque, las láminas de fijación y los marcos de hierro. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4-31 : Pérdidas por flujo de dispersión.

Pérdidas por flujo de dispersión				
Marcos de hierro	Lamina fijación derivación de yugo	Lamina de fijación derivación de pared	Tanque	Total
1701 W	471 W	186 W	4804 W	7162 W

Obteniendo así pérdidas totales debidas al flujo de dispersión de 7162 W. Por otro lado, luego se hizo el mismo ensayo (a plena carga) pero sin las derivaciones de pared y de yugo, obteniendo los siguientes valores de pérdidas:

Tabla 4-32 : Pérdidas por flujo de dispersión sin las derivaciones.

Pérdidas por flujo de dispersión		
Marcos de hierro	Tanque	total
2368 W	6528 W	8897 W

De esta manera se obtuvo un valor total de 8897 W en pérdidas, esto implicaría que las derivaciones disminuyen en un 19 % las perdidas debidas al flujo de dispersión, porcentaje que corresponde a un aproximado de 300 W que instiga a pensar que no es demasiado, pero considerando que un transformador tiene un régimen de trabajo casi permanente estas pueden ser considerables.

#### 4.5.2 Pérdidas en los devanados.

Las pérdidas en los devanados corresponden en mayor parte al efecto Joule, aunque no deja de ser considerable las pérdidas por efecto de corrientes parásitas o más bien dicho por efecto Foucault. Esta sección calculará ambas que corresponderían a las pérdidas totales de los devanados.

En primer lugar, se tiene que las resistencias en corriente directa se presentan a continuación:

Tabla 4-33 : Resistencia de los devanados por fase [19].

Resistencia por fase en DC devanado primario		Resistencia por fase en DC devanado secundario	
17 °C	75 °C	17 °C	75 °C
0.105 Ohm	0.184 Ohm	0.0037 Ohm	0.0045 Ohm

De esta manera para obtener las pérdidas por efecto Joule solo bastó ocupar  $I^2R$ , en el cual se ocupa la resistencia del devanado a 75 °C ya que está funcionando a plena carga, además este se multiplicar por tres ya que es un transformador trifásico.

Considerando lo anterior, se calculó un total de 413.6 kW de pérdidas por efecto Joule en los devanados.

Por otro lado también es posible obtener las pérdidas por efecto de Foucault, que se procederá a explicar. Para medir los conductores dentro de los devanados, creamos dos rejillas 2D (LV y HV). Luego, mediremos la densidad de flujo magnético (Bradial y Baxial). Las medidas y ubicación de esta rejilla de presentan en las siguientes tablas:

Tabla 4-34 : Rejilla 2D en devanado de alta tensión (Rectangular in the XZ plane) [19].

Coordinate system	Origin of the 2D Grid	Characteristics along X	Characteristics along Z
XYZ1	-2000	Xpos : 33.9	Zpos : 914.1
		Xneg : 60.9	Zneg : 1009.1
	0	Number of discretisation elements : 52	Number of discretisation elements : 224
	0		

Tabla 4-35 : : Rejilla 2D en devanado de alta tensión (Rectangular in the XZ plane) [19].

Coordinate system	Origin of the 2D Grid	Characteristics along X	Characteristics along Z
XYZ1	-1900	Xpos : 52.86	Zpos : 912
	0	Xneg : 19.86	Zneg : 1007
	0	Number of discretisation elements : 35	Number of discretisation elements : 160

Estas rejillas se crean en función de las dimensiones axial y radial de los conductores rectangulares.

De esta manera se obtuvieron los datos sobre las densidades de flujo magnético Radial y Axial, para luego proceder a calcular las pérdidas ocupando la ecuación de la referencia [19] que se muestra a continuación:

$$P(eddy) = \frac{1}{\sigma\mu_o^2} \left[ \frac{b \cdot \sinh(a/\delta) - \sin(a/\delta)}{\delta \cdot \cosh(a/\delta) - \cos(a/\delta)} Brad^2 - \frac{a \cdot \sinh(b/\delta) - \sin(b/\delta)}{\delta \cdot \cosh(b/\delta) - \cos(b/\delta)} Bax^2 \right] \quad (4-2)$$

Donde;

Tabla 4-36 : Parámetros para el cálculo de pérdidas por corrientes parásitas [19].

Símbolo	significado	Unidad
$\sigma$	Conductividad de los conductores	siemens
$a$	Tamaño del conductor en dirección axial	m
$b$	Tamaño del conductor en dirección radial	m
$\delta$	Efecto skin	m
Brad, Bax	Densidad de flujo magnético por conductor (axial y radial)	T
$\mu_o$	Permeabilidad relativa del aire	-

En este caso se utilizaron los valores del material conductor (cobre), con las respectivas dimensiones de conductores y la permeabilidad del aire que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4-37 : Valor de los parámetros utilizados [19].

$\sigma$	$a$	$b$	$\delta$	$\mu_o$
$5.96 \cdot 10^7 [s \cdot m^{-1}]$	5.4 [mm]	1.4 [mm]	11.1 [mm]	1[-]

Así podemos calcular las pérdidas por conductor con los valores de densidad de flujo magnético Radial y Axial por cada conductor que nos entre la rejilla 2D. Los valores finales de pérdidas dieron 34789 W por corrientes parasitas en los devanados. Así se puede concluir que las pérdidas totales, que serán las pérdidas por efecto Joule más las pérdidas por efecto Foucault, tienen un valor final de 448389 W siendo así por Foucault un 8.3 % de las pérdidas totales en los devanados.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los valores de pérdidas obtenidos en todo el dispositivo:

Tabla 4-38 : Pérdidas en las partes del transformador.

Pérdidas en el transformador	
Pérdidas núcleo	37300 W
Pérdidas marcos de hierro	1701 W
Pérdidas Lámina de fijación derivación de pared	186 W
Pérdidas lámina de fijación derivación de yugo	471 W
Pérdidas en el tanque	4804 W
Pérdidas por efecto Foucault en devanados	34789 W
Pérdidas por efecto Joule en los devanados	413.6 kW

Obteniendo un total de 492851 W en pérdidas totales del dispositivo, de esta manera la siguiente tabla muestra los porcentajes de pérdidas del total en cada parte del transformador:

Tabla 4-39 : Pérdidas de los transformadores en porcentajes del total.

Pérdidas en el transformador	
Pérdidas núcleo	7.6 %
Pérdidas marcos de hierro	0.35 %
Pérdidas Lámina de fijación derivación de pared	0.003 %
Pérdidas lámina de fijación derivación de yugo	0.01 %
Pérdidas en el tanque	0.97 %
Pérdidas por efecto Foucault en devanados	7.05 %
Pérdidas por efecto Joule en los devanados	83.9 %

### 4.5.3 Conclusiones del capítulo

Se logró observar el comportamiento de las pérdidas en el transformador, como por ejemplo el efecto de las derivaciones las cuales canalizan el flujo magnético y así se reduce las pérdidas que causaría el flujo de dispersión en el tanque. Por otro lado, también se observó que las mayores pérdidas ocurren en los devanados, principalmente por efecto Joule, aunque las pérdidas por efecto Foucault corresponden a un 7 % del total, lo cual no deja de ser despreciable. Así también las pérdidas en el núcleo corresponden a un 7 % del total, lo cual presentan un porcentaje importante a considerar.

# 5 Adaptación del modelo computacional a un Transformador Real

En este proyecto se buscar obtener un modelo en elementos finitos que represente de la manera más fiable posible las características de un transformador de poder real, así el presente capítulo presentará y analizará las características de un modelo real, el cual dará paso a la adaptación del modelo antes visto (Cap. 4) y así poder comparar los resultados y validar el prototipo computacional.

## 5.1 Descripción General del Dispositivo real

En este caso contamos con un transformador real de gran potencia, el cual no varía en demasía, en cuanto a la forma, en relación al prototipo computacional. En la siguiente tabla se muestran sus parámetros eléctricos.

Tabla 5-1: Parámetros Eléctricos [24].

Parámetro	Valor
Potencia	36 MVA
Frecuencia	50 Hz
Voltajes VH/VL	110 / 69 kV
Corrientes IH/IL	188,95 / 301,23 A
Número de vueltas NH / NL	625 / 392
Conexión	Y-Y

## Adaptación del modelo computacional a un Transformador Real

Si bien hay valores que se desconocen ya que no aparece en las especificaciones, se asumen como idénticos al transformador del capítulo anterior. En este análisis se optó por esto ya que estos parámetros no influyen mayormente en los resultados.

Tabla 5-2 : Características físicas del dispositivo [24].

Componente	Material	Permeabilidad relativa	Resistividad (Ohm/m)	Saturación Magnética (T)	Orientación de laminación
Núcleo	CRGO	55000	$2.07 * 10^{-7}$	1.8	Laminación a lo largo del núcleo ( $e=2.710^{-4} m$ )
Derivación de Yugo	CRGO	55000	$2.07 * 10^{-7}$	1.8	Laminación en el borde, paralelo al marco
Derivación de Pared	CRGO	55000	$2.07 * 10^{-7}$	1.8	Laminación a lo ancho en paralelo al estanque ( $e=2.7x10^{-4} m$ )
Marcos y pared del Estanque	Hierro Forjado	800	$2 * 10^{-7}$	1.5	Sin laminación

## Adaptación del modelo computacional a un Transformador Real

No se especifica detalles de las barras de distribución, se considerará las mismas características del modelo computacional.

Tabla 5-3 : Características de los Devanados [24].

Componente	Material	Resistividad (ohm ·m)	Numero de vueltas
Bobinado Alto Voltaje	Cobre	$2.1 * 10^{-8}$	625
Bobinado Bajo Voltaje	Cobre	$2.1 * 10^{-8}$	392
Barras de distribución	cobre	$2.1 * 10^{-8}$	No aplica

Tabla 5-4: Dimensiones de los Devanados [24].

Componente	Ancho del alambre en la dirección radial (mm)	Longitud del cable en dirección axial (mm)	Número de conductores en dirección radial (mm)	Número de conductores en dirección axial
Conductor de alto voltaje	2.5	10.5	4	80
Conductor de bajo voltaje	2.5	12.5	5	82

### 5.1.1 Dimensiones y características de sus componentes.

Para este caso se consideró gran parte de sus componentes iguales a los presentado en el prototipo computacional del capítulo anterior, ya que no se encontraron especificaciones de estos elementos, además para el análisis no son mayormente influyentes. De esta manera se procederá a describir el núcleo y los devanados.

### 5.1.2 Núcleo

El núcleo consta de tres piernas y dos yugos igual que el modelo anterior, en la siguiente figura se describe sus dimensiones.

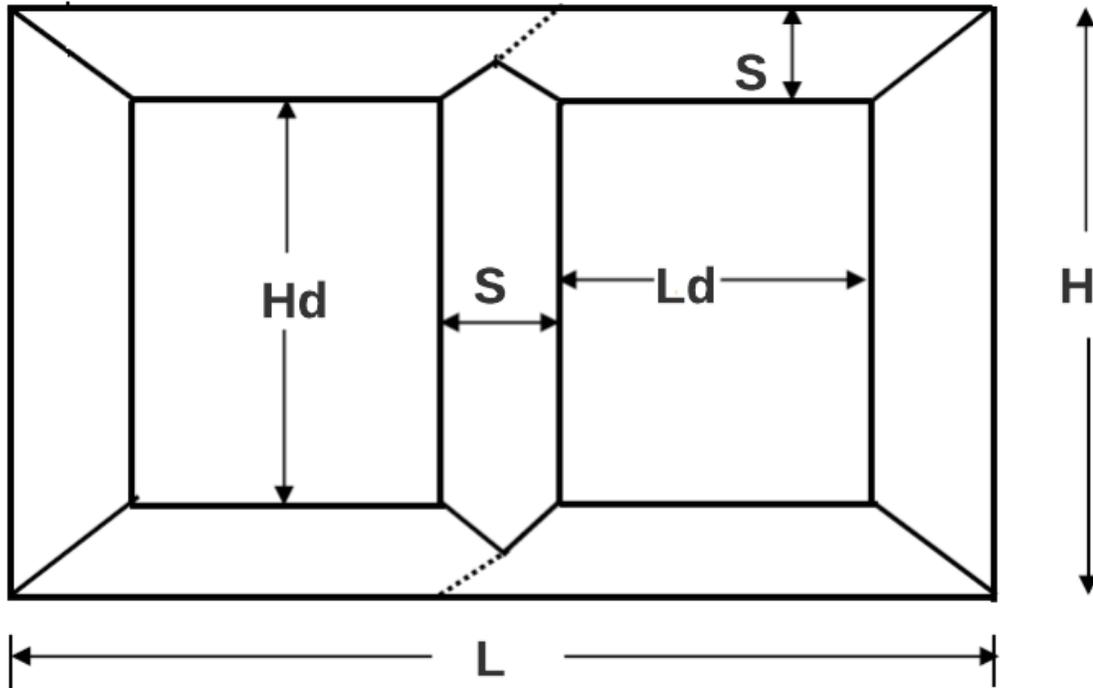


Figura 5-1: Dimensiones del Núcleo (Fuente: Elaboración propia).

El núcleo está conformado por 11 niveles [24], a diferencia de los 5 niveles que poseía el modelo del capítulo anterior, esta diferencia no marca gran diferencia en el análisis a realizar. Por otro lado este tampoco presenta mayor diferencia en sus medidas de piernas y yugos.

Tabla 5-5: Dimensiones Núcleo [24].

Dimensión	Abreviación	Longitud (m)
Altura del Núcleo	H	3,220
Longitud del Yugo	L	3,640
Sección de las Columnas	S	0,820
Distancia entre Piernas	Ld	0,920
Distancia entre yugos	Hd	2,020

## 5.2 Análisis de pérdidas.

Pudiendo modificar el núcleo y sabiendo las longitudes axiales y radiales del dispositivo real se procedió a hacer el cálculo de pérdidas en los devanados y en el núcleo con los mismos métodos que se ocuparon en el capítulo 4.

### 5.2.1 Pérdidas en el núcleo.

En este caso se procedió a analizar las pérdidas de la misma manera que el modelo del capítulo anterior, solo se modificaron las medidas de. De esta manera podemos observar la densidad de flujo magnético en el núcleo ya modificado en la siguiente figura:

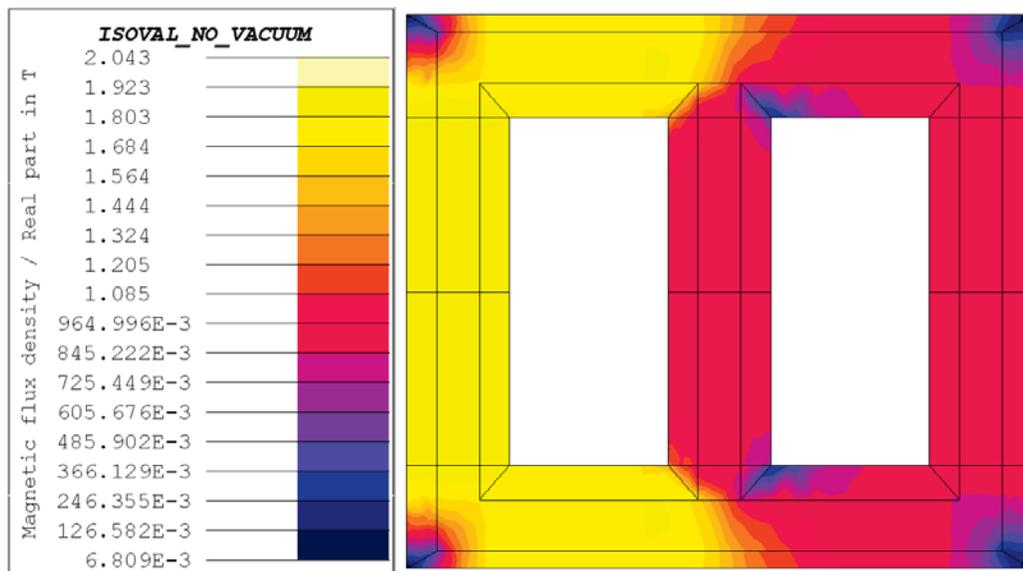


Figura 5-2 : Densidad de flujo magnético en el núcleo (Fuente: Elaboración propia).

Para este caso la curva que mejor se adaptó se presenta a continuación:

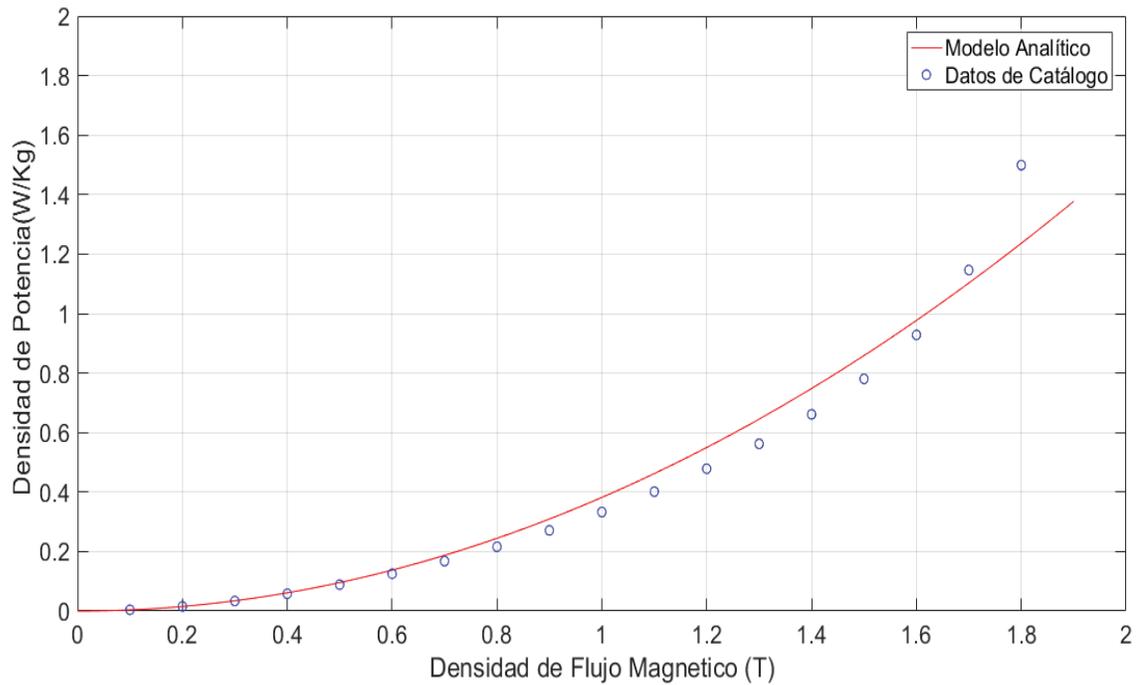


Figura 5-3 : Modelo analítico que mejor se adaptó (Fuente: Elaboración propia).

En la siguiente tabla se muestran los valores de pérdidas obtenidas por el modelo analítico y los valores de pérdidas reales:

Tabla 5-6 : Pérdidas reales y pérdidas del modelo analítico [24].

Pérdidas reales	35719 w
Pérdidas del modelo Bertotti	27763 w

Se puede observar una diferencia (28%) la cual se atribuye a impurezas como espacios de aire en el material real, estas se generan al momento de la construcción del núcleo.

### 5.2.2 Pérdidas en los devanados.

En primero lugar se calculó las pérdidas debidas al efecto Joule, el cual representa el mayor porcentaje de pérdidas de todo el dispositivo. Este se calcula sabiendo la resistencia de cada devanado, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 5-7 : Resistencias de los devanados a 75°C [24].

Resistencia por fase en DC devanado primario	Resistencia por fase en DC devanado secundario
75 °C	75 °C
0.9444 Ohm	2.7907 Ohm

De esta manera se puede calcular las perdidas por Joule como se indica en la siguiente ecuación:

$$P_{\text{primario}} = I^2 R \cdot 3 = 188.5^2 \cdot 0.9444 \cdot 3 = 100669.97 \text{ W} \quad (5-1)$$

$$P_{\text{secundario}} = I^2 R \cdot 3 = 301.23^2 \cdot 2.7907 \cdot 3 = 759680.28 \text{ W} \quad (5-2)$$

Así las pérdidas por efecto Joule totales son:

$$P_{\text{totales}} = P_{\text{primario}} + P_{\text{secundario}} = 860350,25 \text{ W} \quad (5-3)$$

### Adaptación del modelo computacional a un Transformador Real

Para obtener las pérdidas por efecto Foucault y como la dimensión de los devanados es distinta a la del transformador del capítulo anterior es necesario cambiar los parámetros de la rejilla 2D y hacerla acorde a este transformador. Los parámetros se muestran a continuación:

Tabla 5-8 : Rejilla 2D en devanado de alta tensión (Rectangular in the XZ plane).

Coordinate system	Origin of the 2D Grid	Characteristics along X	Characteristics along Z
XYZ1	-2000	Xpos : 33.9	Zpos : 914.1
	0	Xneg : 60.9	Zneg : 1009.1
	0	Number of discretisation elements : 4	Number of discretisation elements : 80

Tabla 5-9 : Rejilla 2D en devanado de baja tensión (Rectangular in the XZ plane).

Coordinate system	Origin of the 2D Grid	Characteristics along X	Characteristics along Z
XYZ1	-2000	Xpos : 33.9	Zpos : 914.1
	0	Xneg : 60.9	Zneg : 1009.1
	0	Number of discretisation elements : 5	Number of discretisation elements : 82

Así luego de ocupar la formula (4-2) se obtuvo un valor de 30789 W debido al efecto Foucault. Las pérdidas totales serían las pérdidas por efecto Foucault más efecto Joule, que en este caso da un valor de 891139.25 W. Se sabe de catálogo que las pérdidas en los devanados es 735306 W, dejando así un error de 17 % por sobre el valor de catálogo.

### **5.2.3 Conclusiones del capítulo**

Se logró observar que el modelo representa una buena aproximación para el dispositivo real en cuanto a lo que se refiere a sus pérdidas, las cuales son estudios importantes dentro de estos dispositivos los cuales se busca cada vez mejorar su eficiencia. El modelo de Bertotti si bien es representado por una curva cuadrática se recomienda ajustar a una curva cubica, esto dado que existen valores, principalmente en las densidades de flujo magnético superiores, donde hay un gran margen de error.

## Discusión y conclusiones

Se logró estudiar los fundamentos básicos del electromagnetismo para de esta manera tener las bases físicas claras y así proceder a un estudio detallado de los fenómenos físicos que ocurren dentro de un transformador de estas magnitudes. Por otro lado, también se hizo una investigación sobre los materiales que componen el transformador, como lo es el acero magnético que compone al núcleo. Se logró dar cuenta de las características de este material las cuales se les atribuye características como orientación del grano que la forma, cualidad necesaria para así lograr más facilidad al flujo magnético que este elemento canaliza, que es la mayor parte del flujo magnético. Se pudo dar cuenta de cuál es el más utilizado en la industria y así se ocupó como base para la elaboración de los materiales en el modelo computacional en elementos finitos.

Por otro lado, el método de las ecuaciones exponenciales presenta una buena alternativa para modelar los puntos calientes de un transformador, pero solo en casos donde el factor de carga cambia por etapas. Esto implica claramente que para casos reales de servicio no podría servir, y el método más apropiado en este caso sería el método de solución de la ecuación diferencial mediante las ecuaciones de diferencia.

También se pudo observar los distintos modelos térmicos del transformador y la manera en que este sistema es modelado, y simplificado. Las ecuaciones se complejizan al tratarse de ecuaciones no lineales a causa de la variación física que le ocurre al aceite con el cambio de temperatura.

Se logró estudiar un modelo de transformador en elementos finitos, así también los componentes que lo conformaban. Dentro de estos componentes se encuentran las derivaciones que cumplen la función de canalizar el flujo de dispersión, reduciendo así las pérdidas que ocasionaría el que este flujo se dispersara por todo el tanque. Habiendo obtenido los valores de pérdidas en estas derivaciones se puede concluir que, si bien las pérdidas corresponden a un 0.013 % de las totales del transformador, deben ser consideradas ya que el transformador presenta regímenes de trabajo casi permanente (solo se detienen para mantenimiento o reparación), así estas pérdidas pasan a ser considerables y deben estudiarse.

También se procedió a obtener las pérdidas en el núcleo, el cual se obtuvo mediante el método de Bertotti, éste corresponde a una aproximación cuadrática del comportamiento de la densidad de pérdidas en el núcleo, que si bien se aproxima bastante bien presenta un error con respecto a los valores reales observables en las curvas. Estas pérdidas corresponden a un 7 % de las pérdidas totales, valor que no deja de ser importante con respecto al total.

Así también se analizó las características de un transformador real como la forma y medida de sus bobinados. Se pudo apreciar las dimensiones de sus conductores lo cual es necesario para identificar pérdidas por corrientes parásitas, en donde también influye el efecto Skin en estos.

Las pérdidas en el núcleo de este último transformador presentaron un 28 % de error por debajo de las pérdidas reales, las cuales se atribuyeron a imperfecciones al momento de construcción del núcleo, como lo son los espacios con aire que quedan dentro. Por otro lado, las pérdidas atribuidas a los devanados y que corresponden a las mayores dentro del dispositivo son dos: las por efecto Joule y por efecto Foucault. Las primeras se calcularon mediante las resistencias de cada devanado, mientras que las segundas fue necesario crear una rejilla 2D para obtener las densidades de flujo magnético en cada conductor. Así ambas sumadas se obtiene un valor bastante similar al experimental, presentando un 17 % de error por sobre el real.

# Bibliografía

- [1] Norma IEC60076-7: “Guía de carga para transformadores de potencia”
- [2] D.K. Cheng, Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería, E.E.U.U., 1993.
- [3] P. Avelino, «Transformadores de distribución: teoría, cálculo, construcción, y pruebas,» México, 2001.
- [4] Transformadores GRAM, «[www.transformadoresgram.com](http://www.transformadoresgram.com),» [En línea]. Available: [http://www.transformadoresgram.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=94&Itemid=95](http://www.transformadoresgram.com/index.php?option=com_content&view=article&id=94&Itemid=95) [Último acceso: Septiembre 2017].
- [5] F. Cayambe, «Análisis de Vida útil del transformador de potencia en régimen de explotación. Aplicación al sistema de potencia Ecuatoriano, » Tesis de grado Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2013.
- [6] Hydroelectric Research And Technical Services Group D-8450, « Transformer Maintenance FIST 3-30, » United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, October 2000.
- [7] A. Carlsson, «Power transformer design fundamentals, »ABB Transformers, ABB, Ludvika, Agosto 2000.
- [8] E. Ras, « Transformadores de potencia, medida y protección, » Barcelona, España, 1993.
- [9] J. Harlow, « Electric Power Transformer engineering, » 1ª edición, E.E.U.U, 2012.
- [10] J. FraileMora, « Máquinas eléctricas, » Quinta edición, España, 2003.
- [11] S. Chapman, «Máquinas eléctricas, » Tercera edición, Mc Graw Hill, E.E.U.U. , 2002.

- 
- [12] N. A. Lemozy , «Rendimiento de Transformadores,» Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, 2009.
- [13] M. H. D. Susa «Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers, » IEEE, 2005.
- [14] F. Cayambe, «Análisis de Vida útil del transformador de potencia en régimen de explotación. Aplicación al sistema de potencia Ecuatoriano, » Tesis de grado Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2013.
- [15] “Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers” Dejan Susa, Matti Lehtonen and Hasse Nordam. IEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 10.
- [16] “Transformer Thermal Modelling, Load Curve Development and Life Estimation” CB Holtshausen. R&D Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering 2015, 31,12-16
- [17] “A fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling” Glenn Swift, Life Senior Member, IEEE.
- [18] “A Simplified Transformer Thermal Model Based on Thermal-Electric Analogy” W.H Tang Senior Member IEEE.
- [19] Tutorial Summary: Power Transformer, FLUX by Cedrat.
- [20] multiphysics FLUX by Cedrat.
- [21] The Computation of Winding Eddy Losses in Power Transformers Using Analytical and Numerical Methods, por Mluleki Cyril Hlatshwayo, E.E.U.U, 2005
- [22] An improved Approach to power losses in magnetic laminations under nonsinusoidal induction waveform, Fausto Fiorillo y Alexander Novikov, 1990, E.E.U.U
- [23] Transformadores Trifásicos en Régimen Equilibrado, por Martinez Rivera Hermes el Jul 08, 2018.
- [24] Catálogo datos nominales transformador de 36 MVA, JORPA , Santiago de Chile.
- [25] Catalogo Acero magnetico, AKSteel.