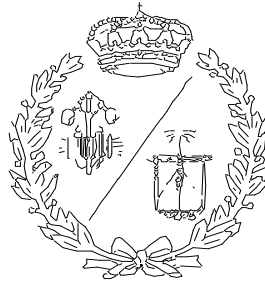


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS NUMÉRICO DEL
COMPORTAMIENTO FLUIDO-TÉRMICO-
MAGNÉTICO DE UN TRANSFORMADOR
MONOFÁSICO**
(NUMERICAL ANALYSIS OF THE FLUID-
THERMAL-MAGNETIC BEHAVIOUR OF A ONE
PHASE TRANSFORMER)

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Francisco José Iglesias Ruiz

Febrero-2017

A mi familia.

A mis amigos y compañeros de clase.

A mi tutor, D. Fernando Delgado San Román.



INDICE GENERAL

Documento nº1. Memoria

Documento nº2. Anexos

Documento nº3. Planos



Índice

1.INTRODUCCIÓN	9
2.ALCANCE.....	11
3.ANTECEDENTES	12
4. TRANSFORMADORES, ASPECTOS CONSTRUCTIVOS	14
4.1 DEFINICIÓN	14
4.2 ESQUEMA DE UN TRANSFORMADOR	14
4.3 FUNCIONAMIENTO	16
4.4 PÉRDIDAS EN UN TRANSFORMADOR.....	17
4.5 RENDIMIENTO	17
4.6 CALENTAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR	18
5. REFRIGERACIÓN DE TRANSFORMADORES	20
5.1 INTRODUCCIÓN	20
5.2 NOMENCLATURA.....	21
5.3 MÉTODOS DE CONSERVACIÓN DEL LÍQUIDO DIELECTRICO	22
6. ENSAYOS EN UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA.....	25
6.1 ENSAYO DE VACÍO	25
6.2 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO	26
7. MODELO FÍSICO DEL TRANSFORMADOR	28
7.1 AUTODESK INVENTOR.....	28
7.2 DISEÑO DE ELEMENTOS	28
7.3 CREACIÓN DE ENSAMBLAJES	30
7.4 PLANOS Y VISTAS DE PIEZAS Y ENSAMBLAJES	31
8. MODELO DE SIMULACIÓN	32
8.1 INTRODUCCIÓN	32
8.2 INTERPRETACION DEL MODELO	32
8.3 GEOMETRÍA DEL TRANSFORMADOR.....	33
8.4 SIMPLIFICACIONES DEL MODELO GEOMETRICO	33
8.5 PRINCIPIOS FÍSICOS	37
8.6 MODELO FÍSICO-MATEMATICO	38
8.7 PROPIEDADES FISICAS DE LOS MATERIALES	40
8.7.1 Propiedades del aceite mineral.....	40

8.7.2 Propiedades de los materiales sólidos	42
9. COMSOL MULTIPHYSICS.....	45
9.1 INTRODUCCIÓN	45
9.2 METODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)	45
9.3 COMSOL MULTIPHYSICS	46
9.4 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	47
9.5 MODELO FÍSICO A UTILIZAR	48
9.6 Condiciones de contorno	51
9.6.1 Campos magnéticos	52
9.6.2 Transferencia de calor en sólidos	56
9.6.3 Flujo laminar	58
9.7 ACOPLAMIENTO DE FÍSICAS.....	59
9.8 COLOCACION DE SONDAS DE MEDICIÓN	60
9.9 MALLADO.....	63
9.10 TIPO DE ESTUDIO.....	65
10. RESULTADOS.....	68
10.1 DISTRIBUCION DEL CAMPO MAGNETICO.....	68
10.2 DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS	69
10.3 CICLOS DE CONVECCION	71
10.4 VALORES RECOGIDOS POR LAS SONDAS.....	73
10.4.1 Sondas de valores máximos y promedios	74
10.4.2 Sondas pertenecientes al ensayo físico.....	74
11 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO	77
11.1 CONCLUSIONES	77
11.2 MEJORAS APLICABLES.....	77
12.BIBLIOGRAFIA	77





Índice de figuras:

Figura 1.1. Ensayo físico del transformador.....	9
Figura 1 2. Carga resistiva del 0,8 kW conectada al transformador.....	10
Figura 4.1. Esquema de un transformador de potencia.	14
Figura 4.2. Tipos de transformador. a) Acorazado. b) De columnas.....	15
Figura 4.3. Flujo en un transformador de potencia.....	17
Figura 4.4. Pérdidas y rendimiento en función del índice de carga (%).	18
Figura 5.1. Primera letra del código de refrigeración.	21
Figura 5.2. Segunda letra del código de refrigeración.....	21
Figura 5.3. Tercera letra del código de refrigeración.....	22
Figura 5.4. Cuarta letra del código de refrigeración.	22
Figura 5.5. Esquema de Relé Buchholz.	24
Figura 6.1. Circuito equivalente de un transformador visto desde el lado del primario.	25
Figura 6.2. Esquema de ensayo de vacío.	26
Figura 6.3. Esquema de ensayo de cortocircuito.	27
Figura 7.1. Ejemplo de la creación de una pieza a través de su boceto en Autodesk Inventor	29
Figura 7.2. Ejemplo de operación donde se consume el boceto original para crear la estructura 3D.....	29
Figura 7.3.: Ejemplo de ensamblaje de diferentes piezas creadas anteriormente. ..	30
Figura 8.1. Punto de partida para las simplificaciones geométricas del transformador.	33
Figura 8.2. Geometría de los devanados antes y después de la simplificación.	34
Figura 8.3. a) Núcleo formado por 120 láminas. b) Núcleo simplificado formado por 20 láminas.....	35



Figura 8.4. Comparación de la geometría simplificada con el montaje realizado con Autodesk Inventor.	36
Figura 8.5.: Modelo completo de la geometría a simular.....	36
Figura 8.6. Planos de simetría aplicados al modelo.	37
Figura 8.7. Densidad aceite mineral.....	40
Figura 8.8. Conductividad térmica del aceite mineral.....	41
Figura 8.9. Calor específico del aceite mineral.....	41
Figura 8.10. Viscosidad cinemática del aceite mineral.....	42
Figura 8.11. Propiedades predefinidas del núcleo del transformador (SILICON STEEL GO 3%).....	43
Figura 8.12. Propiedades del cobre de los devanados (COPPER).....	43
Figura 8.13. Propiedades físicas del tanque (STEEL AISI 4340).....	44
Figura 8.14. Propiedades físicas del plástico protector (ACRYLIC PLASTIC).	44
Figura 9.1. Geometría prevista para la simulación.....	48
Figura 9.2. Tabla con los valores iniciales del modelo.	49
Figura 9.3. Agrupación de las láminas del núcleo en selección explícita.	50
Figura 9.4. Viscosidad cinemática definida en Comsol Multiphysics.....	51
Figura 9.5. Dominios disponibles en la física de campos magnéticos.....	52
Figura 9.6. Contornos disponibles en la física de campos magnéticos.	52
Figura 9.7. Curva efectiva HB asignada al núcleo del transformador.	53
Figura 9.8. Definición del arrollamiento de baja tensión.....	54
Figura 9.9. Definición del carlite en los contornos internos del núcleo.	56
Figura 9.10. Asignación de la bobina de baja tensión a generación de calor debido a las pérdidas.....	57
Figura 9.11. Selección de los dominios de la física de fluidos.	58
Figura 9.12. Opciones de multifísicas disponibles en Comsol.....	60
Figura 9.13. Sonda de contorno localizada en los devanados,	61
Figura 9.14. Sondas puntuales colocadas para replicar las sondas del ensayo.	62
Figura 9.15. Mallado creado en la geometría del transformador.....	63
Figura 9.16. Calidad del mallado.....	64
Figura 9.17. Resumen y características del mallado,.....	65



Figura 9.18. Características del estudio frecuencia-estacionario.	66
Figura 10.1. Distribución del campo magnético.	68
Figura 10.2. Distribución de flujo magnético en el núcleo.	69
Figura 10.3.a) Distribución de T. con $T_{inicial}:40^{\circ}\text{C}$. B) Distribución de T. con $T_{inicial}:55^{\circ}\text{C}$	70
Figura 10.4. a) Distribución de temperaturas en planos de corte. b) Contornos isotérmicos.	71
Figura 10.5. Líneas de flujo del aceite a su paso por el transformador.	72
Figura 10.6. Corte el plano medio de la entrada y salida del fluido.	73



1.INTRODUCCIÓN

El punto de partida de este proyecto se basa en los resultados obtenidos en un ensayo de laboratorio. En este ensayo se ha diseñado un transformador monofásico de relación de transformación 110/220 y potencia nominal 0.8 KVA sumergido en aceite mineral. El transformador es colocado en el interior de una cuba de acero inoxidable. Con el fin de monitorizar el comportamiento de la máquina, cuatro termopares ubicados en el fondo y la parte superior de la cuba, en el devanado externo y en el núcleo. Estos termopares permiten ver la evolución de las temperaturas tanto en el aceite, como en la parte sólida.

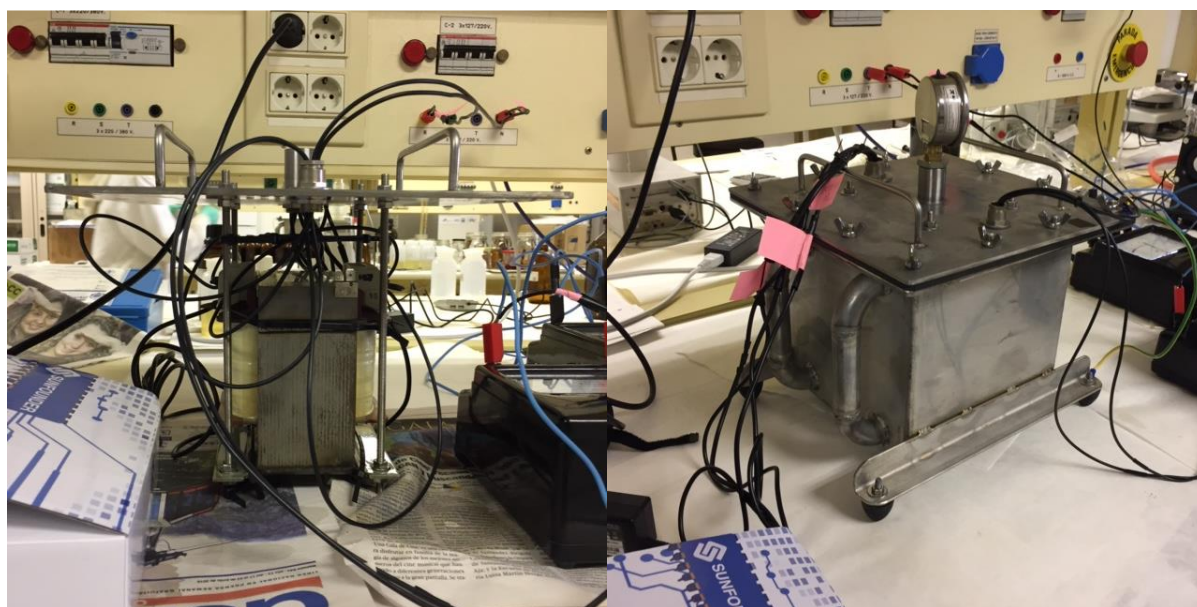


Figura 1.1. Ensayo físico del transformador.

Las medidas captadas por estos sensores son capturadas cada 10 segundos por una tarjeta de captura de datos y tratados informáticamente. Dicho tratamiento consiste en la representación gráfica de las temperaturas con el tiempo. Para poder obtener información precisa y fiable es necesario estudiar el transformador en régimen permanente. Para ello se utilizará una carga resistiva de potencia igual a la nominal del transformador (0.8 kW). Cuando estas temperaturas alcanzan un valor constante (régimen permanente en unas seis horas) se pueden tomar los valores obtenidos del transformador bañado en aceite mineral.

En el ensayo se monitorizarán los datos obtenidos al llevar al transformador a unos valores de sobrecarga en torno a 150% de la potencia nominal del transformador. Estos datos obtenidos servirán de base junto con las pérdidas obtenidas en los ensayos de vacío y cortocircuito (34 W y 20 W, respectivamente) para realizar la simulación con la ayuda de un programa de análisis de elementos finitos. El objetivo es conseguir un modelo lo suficientemente aproximado, es decir, que los resultados de la simulación se acerquen lo máximo posible a los datos experimentales.

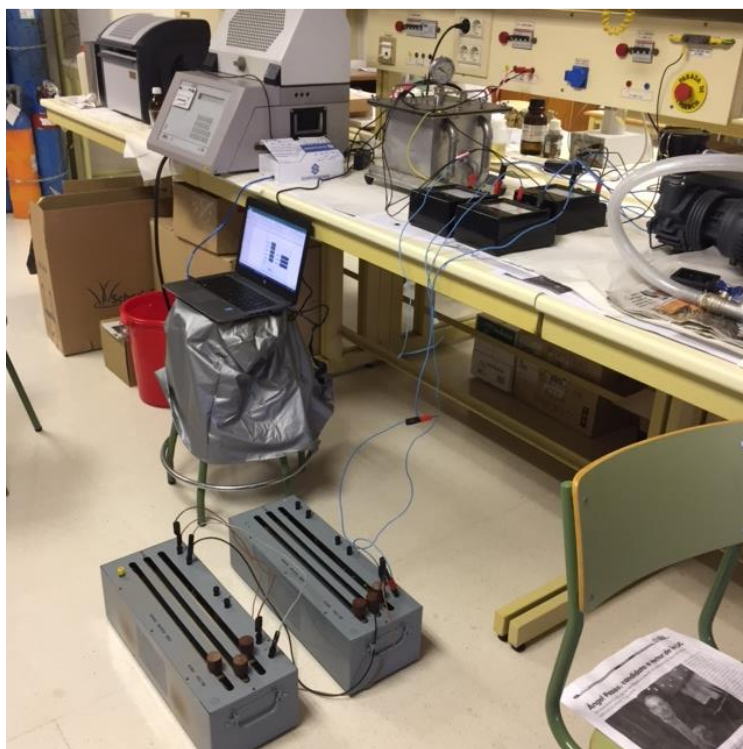


Figura 1 2. Carga resistiva del 0,8 kW conectada al transformador.

2.ALCANCE

Las conclusiones de este proyecto pretenden servir como punto de partida a la hora de comparar la capacidad refrigerante de un aceite mineral (caso base) y un aceite basado en esteres naturales (aceite alternativo). Además, será posible obtener aproximaciones o datos para cualquier punto de trabajo del transformador, así como para diferentes temperaturas del aceite.

También obtendremos primeras aproximaciones acerca del comportamiento del transformador con la adición de pequeñas partículas magnéticas en el refrigerante. Se podrá estudiar el efecto que causan al interaccionar con el campo magnético generado por el transformador.

Enfocado en la actividad industrial, el acoplamiento satisfactorio de la física de transferencia de calor con los estudios de mecánica de fluidos y campos magnéticos permitirá obtener prototipos más precisos. Esto está directamente relacionado con el número de prototipos necesarios hasta acercarnos a la solución o modelo válido, ya que las condiciones de partida serán más aproximadas.

3.ANTECEDENTES

Este proyecto está basado, principalmente, en dos artículos publicados acerca de la refrigeración de un transformador. En ambos artículos se expone la idea de refrigerar el transformador por medio de un fluido magnético el cual origina ciclos de convección y mejora la capacidad de enfriamiento del refrigerante.

En el año 2013 el ingeniero eléctrico Lucian Pislaru-Dănescu, junto a su equipo, presentaba en un artículo los resultados obtenidos en un prototipo de transformador refrigerado por ferro fluido. Experimentalmente determina las capacidades caloríficas y el comportamiento magnético del fluido. Para resolver la simulación utiliza métodos basados en cálculo de elementos finitos donde se lleva a cabo la resolución del experimento utilizando fluido estándar en un primer ejercicio y añadiendo las ferropartículas en el estudio posterior. En el artículo se expone que un ferrofluido posee una capacidad de intercambio térmico y unas propiedades dieléctricas mayores que el mismo fluido sin las partículas magnéticas. La adición de estas partículas aumentaría la capacidad del transformador de evitar sobretensiones y degradaciones del material.

Para su experimento se utiliza un modelo de transformador monofásico TMOF2-36-40 (36/0.4 kV y 40 kVA) que será refrigerado en convección natural por el aceite mineral en un primer ensayo y con ferrofluido en el segundo.

Los resultados obtenidos muestran unos ciclos de convección internos, los cuales son mucho más pronunciados significativos en el ensayo con ferro fluido. Esto permite una mejor refrigeración del transformador.

En el año 2016 se publicaba en el “International Journal of Thermal Sciences” un trabajo de Jaykumar Patel acerca de la refrigeración de los transformadores empleando partículas magnéticas. Como punto de partida, pretende utilizar un fluido magnético a una temperatura de trabajo próxima a su temperatura de Curie, lo que permite la aparición de ciclos de convección próximos al devanado.

Para llevar a cabo el experimento, trabaja con un transformador TCF-56 a unas temperaturas cercanas a una sobrecarga del 160%, lo cual permite al fluido trabajar próximo a su temperatura de Curie.

Utilizando el refrigerante cargado con las partículas magnéticas obtiene que la vida útil del transformador trabajando con sobrecarga en torno al 160% (necesario para lograr temperaturas próximas a la temperatura de Curie) es 9 veces superior a las expectativas de ese transformador refrigerado por ese mismo fluido sin las partículas magnéticas.

Como conclusión expone que, necesariamente se debe de evacuar mayor calor en los ciclos de convección en torno al núcleo de la máquina, lo que explicaría el incremento de vida útil de esta.

Ambos artículos aparecen al completo y en su versión original en los anexos del proyecto. Más adelante se explicará más concretamente los puntos a destacar y las ideas de partida que se han tomado para realizar nuestro ensayo y comparar resultados.



4. TRANSFORMADORES, ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

4.1 DEFINICIÓN

El transformador eléctrico es una máquina electromagnética que se usa para aumentar o disminuir una fuerza electromotriz (Potencial, tensión eléctrica o voltaje); también se puede usar para aislar eléctricamente un circuito. Está compuesto de dos embobinados independientes (devanados) en un núcleo de aire o material electromagnético. Su principio de funcionamiento es la inducción electromagnética.

Se utilizan principalmente para el transporte de energía eléctrica, ya que nos permiten elevar la tensión de la línea y, por lo tanto, reducir la sección de los conductores y minimizar pérdidas por efecto Joule en dichos conductores. Como su rendimiento es cercano al 100% (aumenta con el tamaño del transformador) se utiliza también en otros campos, como la electrónica.

4.2 ESQUEMA DE UN TRANSFORMADOR

Un transformador sencillo está compuesto de dos conductores arrollados en torno a un núcleo de material ferromagnético. Cuanto mayor sea la permeabilidad del material, mayor será el rendimiento del transformador. Cada uno de los devanados (arrollamientos) suponen la entrada o la salida del transformador.

En cuanto al núcleo del transformador, está constituido por chapas muy finas de hierro o acero apiladas y recubiertas de una capa de aislante, denominada carlita y de espesor ínfimo, que reduce las pérdidas magnéticas (en el hierro). Estas chapas suelen tener de forma de doble U, de manera que los devanados se montan en torno a las columnas, dejando libre las secciones de unión entre columnas, denominadas culatas.

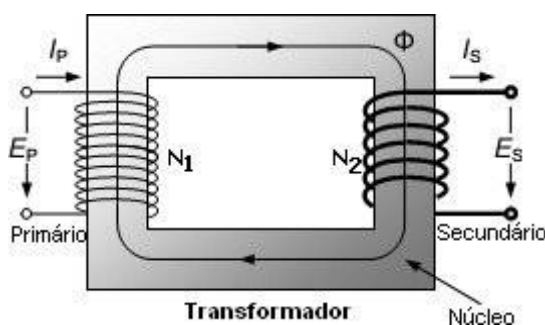


Figura 4.1. Esquema de un transformador de potencia.

Dependiendo de la posición relativa entre los devanados y el núcleo, podemos clasificar los transformadores en dos grandes grupos: acorazados, donde los devanados abrazan la sección central del núcleo, y de columnas, donde los arrollamientos se colocan en las partes exteriores del núcleo.

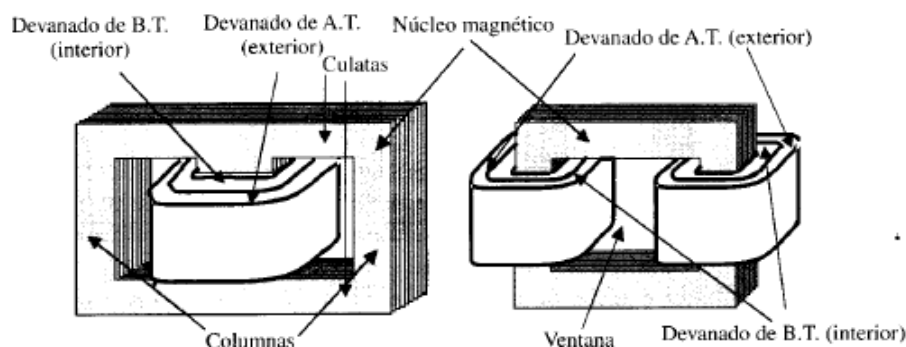


Figura 4.2. Tipos de transformador. a) Acorazado. b) De columnas

Otro tipo de clasificación es posible, si atendemos a la forma de la sección de las columnas. En transformadores pequeños es habitual trabajar con secciones rectangulares, mientras que en grandes transformadores se utilizan secciones cuasi-circulares para un mayor aprovechamiento del espacio.

Los devanados forman el circuito eléctrico del transformador. Están formados de hilos de cobre de sección circular en transformadores pequeños y de sección rectangular en grandes transformadores de potencia. Estos conductores están aislados, en el caso del transformador a estudiar posteriormente por un barniz que evita que los devanados de alta y baja tensión, entren en contacto entre sí. En el caso de transformadores acorazados, los devanados se colocan de forma concéntrica en torno al núcleo, quedando en la parte interna el devanado de baja tensión en el interior, ya que es más fácil de aislar que el devanado de alta tensión.

Para mejorar el rendimiento del transformador es necesario reducir la temperatura que alcanza al trabajar en régimen nominal. Para ello existen varias formas de extraer ese calor. Convección natural (caso a estudiar) o forzada (ventiladores) dependiendo de la velocidad del fluido y refrigeración al aire o sumergido en tanque de aceite. Para grandes transformadores se utilizan tanques de aceite con convección forzada que, además, sirven de aislante para mejorar la seguridad de este. En el caso a estudiar,

utilizaremos un transformador sumergido en aceite y en convección natural. En transformadores grandes se suelen añadir unos aisladores que previenen de la aparición de un fuerte campo eléctrico en los bornes del transformador que aparecen en el exterior del tanque.

4.3 FUNCIONAMIENTO

Basado en las leyes de inducción electromagnética. Aplicando una tensión alterna en los bornes del lado primario, circulará a través del devanado una corriente, también alterna, que producirá una variación periódica (forma sinusoidal de onda) de flujo en el núcleo del transformador. Esta variación de flujo genera una fuerza electromotriz en los devanados de acuerdo con la ley de Faraday. Esta f.e.m. inducida se opone a la variación de flujo (ley de Lenz) y es proporcional tanto a la variación instantánea de flujo como el número de espiras (vueltas) del devanado. Esto da lugar a dos f.e.m. distintas en cada devanado cuya relación es idéntica a la relación de espiras entre el primario y el secundario, ya que los flujos que atraviesan ambos devanados son iguales (esto se consigue de manera sencilla haciendo que la sección de núcleo que es abrazado por cada devanado sea idéntica).

En el devanado secundario no se generará corriente (sí tensión) a menos que conectemos una carga en sus bornes. Al conectar la carga aparece una corriente en el secundario que genera una f.e.m. que tiende a cambiar el flujo del núcleo. Como la tensión de alimentación no varía si no cambiamos la fuente, el flujo circulante no puede cambiar, es decir, debe aparecer otra fuerza que compense la anterior, y, por tanto, una corriente en el primario del transformador. Estas corrientes están relacionadas de manera inversa a la relación de transformación y de las tensiones (la potencia debe permanecer constante).

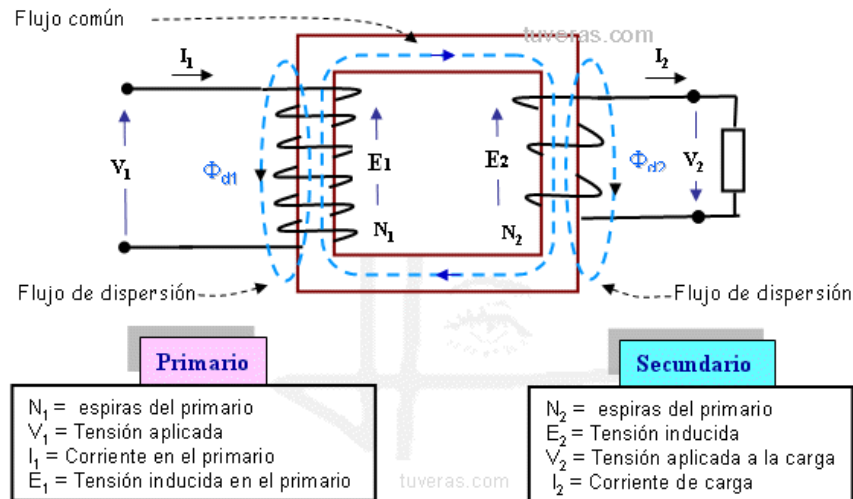


Figura 4.3. Flujo en un transformador de potencia.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = n$$

4.4 PÉRDIDAS EN UN TRANSFORMADOR

Hasta ahora hemos analizado el funcionamiento de un transformador ideal, sin pérdidas, pero como cualquier máquina eléctrica, hay unas pérdidas a tener en cuenta. Estas pérdidas son las debidas al calentamiento por efecto Joule en el cobre de los devanados, las pérdidas en el núcleo del transformador (en el hierro) y las pérdidas en los soportes metálicos y uniones debidas a los flujos de dispersión en los devanados (pérdidas parásitas).

Las pérdidas en el cobre son proporcionales a la resistividad del conductor y cuadráticas respecto a la intensidad que circula por el conductor.

Las pérdidas en el hierro se pueden reducir prescindiendo del núcleo macizo de la máquina y colocando a su vez chapas delgadas y aisladas entre sí. Esto disminuye la corriente en el núcleo y, por tanto, sus pérdidas.

4.5 RENDIMIENTO

Una vez analizadas las pérdidas en cada zona del transformador, podemos hablar de su rendimiento. Por definición, el rendimiento es la relación entre la potencia útil o

disponible para su uso entre la potencia de entrada o total utilizada. También puede expresarse como relación de la potencia disponible en el secundario entre esa misma potencia más la suma de las pérdidas totales en el transformador.

Como ya se ha dicho anteriormente el rendimiento en un transformador es altísimo, rondando valores en torno al 98%, dependiendo el tamaño de la máquina. Este rendimiento permanece casi constante, variando ligeramente si aumentamos la carga. Esto es debido a que las pérdidas magnéticas son constantes pero las pérdidas en el cobre aumentan con la carga.

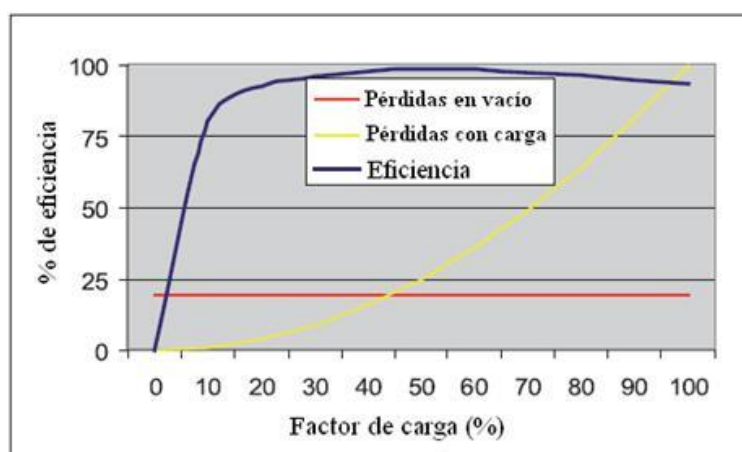


Figura 4.4. Pérdidas y rendimiento en función del índice de carga (%).

4.6 CALENTAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR

Una vez explicados los conceptos de las pérdidas y rendimiento del transformador, veremos cómo afectan al funcionamiento físico de este.

Las pérdidas aparecen en la máquina en forma de calor, un calor que a efectos prácticos aumenta la temperatura y disminuye el rendimiento. También afecta a la vida útil de la máquina, teniendo que cambiar partes o piezas en periodos más corto de tiempo.

El calor se genera en el núcleo y los devanados y se transmite al exterior mediante mecanismos de transmisión de calor de convección, conducción y radiación.

Partiendo de la temperatura ambiente en el arranque del transformador vemos como se incrementa progresivamente hasta alcanzar el régimen nominal, donde la temperatura permanece constante. Todos los materiales de la máquina, tanto del transformador propiamente dicho como elementos de aislamiento y protección deben

seleccionarse de acuerdo con esta temperatura, más un margen de seguridad por posibles sobrecargas puntuales.

Para mantener la temperatura del transformador en niveles aceptables debemos controlar las pérdidas generadas. Esto se consigue regulando la tensión de entrada a la máquina (controlamos de esta manera las pérdidas en el hierro) y manteniendo las corrientes de los devanados por debajo de ciertos límites (limitamos de esta forma las pérdidas en el cobre).

Llegamos de esta manera a unos valores de tensión e intensidad máximos, que fijan la capacidad de nuestro transformador.

Si queremos mejorar el rendimiento de nuestro transformador será imprescindible reducir la temperatura de trabajo de la máquina. En este punto intervienen los métodos de refrigeración mencionados antes. Aplicando una refrigeración eficiente podremos mejorar la vida útil de la máquina, así como su rendimiento y la seguridad a la hora de posibles fallos o averías. Analizar los ciclos de convección y la temperatura y comportamiento de los aceites y refrigerantes en transformadores de laboratorio es el paso previo a implantar esas conclusiones y avances en los transformadores industriales de mayor potencia, en los que realizar esos ensayos conllevaría un coste mucho mayor que el realizado con transformador de menor tamaño.

5. REFRIGERACIÓN DE TRANSFORMADORES

5.1 INTRODUCCIÓN

Dependiendo del refrigerante utilizado nos podremos encontrar con transformadores refrigerados en seco (aire) o por aceite (en baño de aceite). Como ya se he dicho, el objetivo de esta refrigeración es reducir la temperatura de trabajo y mantener la vida de los aislantes y demás elementos de la máquina.

Es necesario un estudio previo para la elección más adecuada del método de refrigeración del transformador. Se debe tener en cuenta principalmente la potencia del transformador y la vida útil mínima necesaria. Por lo general en transformadores pequeños se utiliza una refrigeración en seco, ya que su superficie física es suficiente para evacuar el calor generado. En este tipo de refrigeración el transformador se encuentra encerrado en una caja con una rejilla de ventilación que permite la circulación de aire en torno a él. Si aumentamos el tamaño del transformador ya sería necesario introducir un sistema de ventiladores que aporten una convección forzada de aire por el transformador, en vez de la convección natural utilizada en el caso anterior.

Para los transformadores de distribución de baja potencia se utiliza el sistema de refrigeración de baño en aceite. La máquina se sumerge en aceite mineral y se encierra en un tanque de acero que absorbe el calor generado por el núcleo y los devanados. Conforme aumenta la potencia del transformador se añaden aletas (radiadores externos) para incrementar la superficie de intercambio con el aire. Si necesitamos una mayor refrigeración será necesario agregar un sistema de ventilación forzada de aire, que es impulsado sobre los radiadores del tanque.

Para transformadores de alta potencia se suele realizar un intercambio de calor aceite-agua. Este método es más efectivo, pero también es más caro, ya que será necesario instalar un intercambiador de calor y posteriormente enfriar el agua a la salida y mantener su circulación.

5.2 NOMENCLATURA

A la hora de caracterizar y definir un transformador es necesario indicar una serie de datos en su placa de características. Capacidad nominal, tensiones nominales y una serie de letras que nos indican el método de refrigeración utilizado. Este sistema de etiquetado viene dado por la norma IEC60076-2. El código se compone de 4 letras que nos indican:

- Medio refrigerante en contacto con los devanados:

LETRA	SIGNIFICADO
O	Líquido aislante con punto de inflamación < 300°C
K	Líquido aislante con punto de inflamación > 300°C
L	Líquido aislante con punto de inflamación no medible.

Figura 5.1. Primera letra del código de refrigeración.

- Mecanismo de refrigeración/circulación del fluido interno.

LETRA	SIGNIFICADO
N	Circulación natural por termosifón a través del sistema de refrigeración y los devanados.
F	Circulación forzada a través del sistema de refrigeración. Flujo de termosifón en devanados.
D	Circulación forzada a través del sistema de refrigeración, bajo la dirección de los equipos de refrigeración en, al menos los devanados principales.

Figura 5.2. Segunda letra del código de refrigeración.

- Medio de refrigeración externo.

LETRA	SIGNIFICADO
A	Refrigeración por aire
W	Refrigeración por agua.

Figura 5.3. Tercera letra del código de refrigeración.

- Mecanismo de refrigeración/circulación del fluido externo.

LETRA	SIGNIFICADO
N	Convección natural.
F	Convección forzada.

Figura 5.4. Cuarta letra del código de refrigeración.

De esta manera, definiremos un sistema de refrigeración del tipo ONAN/ONAF de manera que significará que la refrigeración se realiza mediante un aceite mineral o sintético con un punto de inflamación menor de 300°C y método de circulación natural. En lo referente al medio de circulación externo, tenemos aire pudiendo ser circulado de manera natural o forzada.

5.3 MÉTODOS DE CONSERVACIÓN DEL LÍQUIDO DIELECTRICO

Aunque no es el caso de nuestro estudio, que se realiza con un transformador de baja potencia, en los transformadores de elevada potencia se genera una gran cantidad de calor, por lo que para la refrigeración se utiliza un líquido dieléctrico. Es fundamental poder mantener y conservar de forma adecuada las propiedades del líquido para evitar posibles accidentes y mal funcionamiento debido a la degradación de estas propiedades.

Debido al tamaño de estos transformadores, el volumen de líquido utilizado es considerable, por lo que la parada del transformador por avería, sustitución o fallo conlleva un gran coste de mantenimiento y reposición de líquido, un inconveniente que es necesario evitar cuanto sea posible.

Es necesario tener en cuenta a la hora de renovar el aceite mineral su nocividad para el medioambiente. También es necesario prestar atención a la degradación del líquido

a lo largo de su vida útil, podría provocar incendios a causa de su mal funcionamiento o de una negligencia en cuanto al periodo de recambio de este.

La degradación de estos refrigerantes consiste en la oxidación y formación de lodos que alteran la composición inicial del fluido y merman sus características aislantes y refrigerantes. Esta oxidación es debido al aumento de la temperatura hasta la temperatura de trabajo (y posibles sobrecargas) y por la presencia de humedad y oxígeno en contacto con el fluido.

Para preservar las propiedades del líquido y de los aislantes que están en contacto con él hay varios métodos a considerar. El más utilizado es el diseño de la cuba y el Relé Buchholz.

Los diseños de la cuba más utilizados son los siguientes:

- **Sistemas de tanque sellado:** Este tipo de sistemas tiene el tanque interior hermético de la atmosfera y mantienen una capa de gas, un espacio o colchón de gas que se asienta sobre el líquido. Este volumen del conjunto se mantiene constante. En estos tanques podemos encontrarnos presiones negativas a baja carga y presiones positivas si aumentamos carga o temperatura.
- **Sistemas con depósito de expansión:** Poseen un deposito auxiliar en la parte superior del transformador. El tanque principal está totalmente lleno de líquido y el auxiliar parcialmente de modo que puede variar el volumen de líquido en este último según sea necesario.
- **Sistema de presión positiva:** Es necesario el uso de gases inertes para mantener la presión positiva en el espacio del gas. Un gas inerte (nitrógeno, habitualmente) es comprimido e inyectado progresivamente en el espacio de gas cuando la presión interna es inferior al límite fijado.

El Relé de Buchholz es un dispositivo que pertenece a la protección principal del transformador. Hay varias causas que inician su puesta en marcha: Falta de aceite, cortocircuitos o gases acumulados dentro del tanque. Este Relé protege al transformador contra todo efecto en el interior en la cuba. Está basado en el hecho de que cualquier anomalía en el transformador produce calentamientos locales en los devanados con su consiguiente producción de gases en el aceite.

Estos gases producidos ascienden por el conducto donde está situado el relé hasta una caja con dos flotadores móviles, los gases ocupan la parte alta de la caja desplazando al aceite hacia abajo. Si el nivel de aceite llega a un límite fijado el flotador cierra un circuito que produce la alarma.

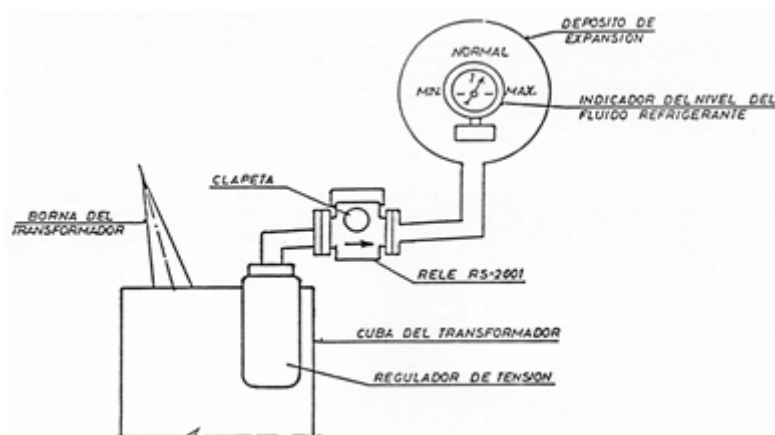


Figura 5.5. Esquema de Relé Buchholz.

En caso de ignorar esta alarma y el gas se sigue acumulando, el segundo flotador cierra un contacto que desconecta el transformador de manera que evitamos la sobrecarga y avería.

La gran ventaja de este dispositivo es su elevada sensibilidad para detectar fallos o deterioros que los demás sistemas de protección pasarían por alto.

6. ENSAYOS EN UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA

Los ensayos en un transformador representan las diversas pruebas que deben prepararse para verificar el comportamiento de la máquina. En la práctica resulta difícil la realización de ensayos reales directos debido a la gran cantidad de energía que se disipa en las pruebas y la dificultad de disponer resistencias lo suficientemente elevadas en casos de transformadores de potencia elevada.

Ahora bien, el comportamiento de un transformador bajo cualquier condición de trabajo puede predecirse con suficiente exactitud si se conocen los parámetros de circuito equivalente. Tanto el fabricante como el usuario del transformador necesitan conocer esta información. Sin embargo, no es fiable obtener estos datos del diseño o proyecto. Por suerte los elementos que intervienen en el circuito equivalente se pueden obtener por medio de ensayos muy simples y que acarrear un coste de energía relativamente bajo. Estos son los ensayos de cortocircuito y de vacío.

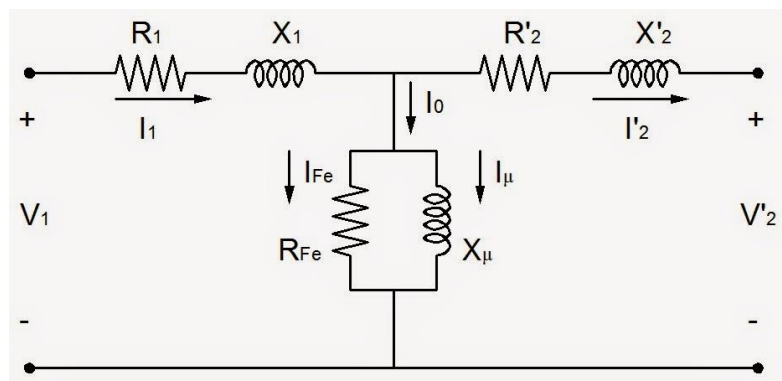


Figura 6.1. Circuito equivalente de un transformador visto desde el lado del primario.

6.1 ENSAYO DE VACÍO

Consiste en aplicar la tensión nominal al primario del transformador (en la práctica al lado de baja tensión, por cuestiones lógicas), estando el secundario en circuito abierto. Al mismo tiempo debe medirse la potencia absorbida P_0 , la corriente de vacío I_0 y la tensión secundaria, de acuerdo con el esquema de conexión de la figura [] y siendo los valores P_0 e I_0 las medidas tomadas por el vatímetro W y el amperímetro A. Como las pérdidas en el cobre del primario son despreciables (I_0 muy baja) la potencia de vacío P_0 coincide prácticamente con las pérdidas en el hierro.

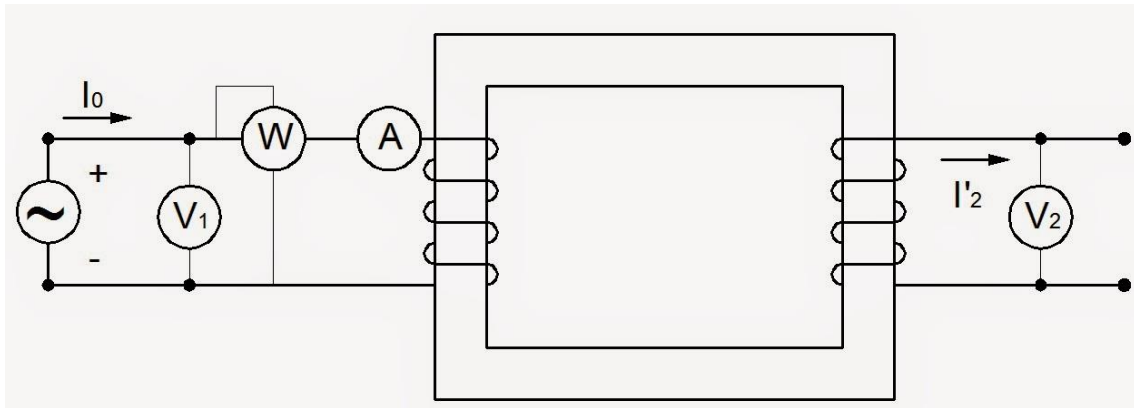


Figura 6.2. Esquema de ensayo de vacío.

Con estas medidas podemos obtener el factor de potencia en vacío de acuerdo con la ecuación:

$$P_0 = V_1 I_0 \cos \varphi_0 = P_{Fe}$$

Por otra parte, debido al pequeño valor de la caída de tensión primaria, se puede considerar que el valor V_{1n} coincide prácticamente con E_1 pudiendo obtener las componentes de I_0 y, a partir de estas últimas los valores R_{Fe} y x_μ . Estas resistencias R_{Fe} y x_μ hacen referencia a las pérdidas en el núcleo del transformador (la rama de vacío).

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 ; I_\mu = I_0 \sin \varphi_0$$

$$R_{Fe} = \frac{V_1}{I_{Fe}} ; X_\mu = \frac{V_1}{I_\mu}$$

Es decir, el ensayo de vacío nos permite determinar las pérdidas en el hierro del transformador y los parámetros en la rama en paralelo del circuito equivalente. De este ensayo también podemos obtener la relación de transformación, ya que, la caída de tensión en el cobre es prácticamente despreciable.

6.2 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

En este ensayo se cortocircuita el devanado secundario y se aplica en el primario una tensión que varía gradualmente desde 0 hasta que circule la corriente nominal a plena

carga por los devanados (en la práctica se realiza siempre en el lado de alta tensión). La disposición de los instrumentos de medida se realiza según el siguiente esquema:

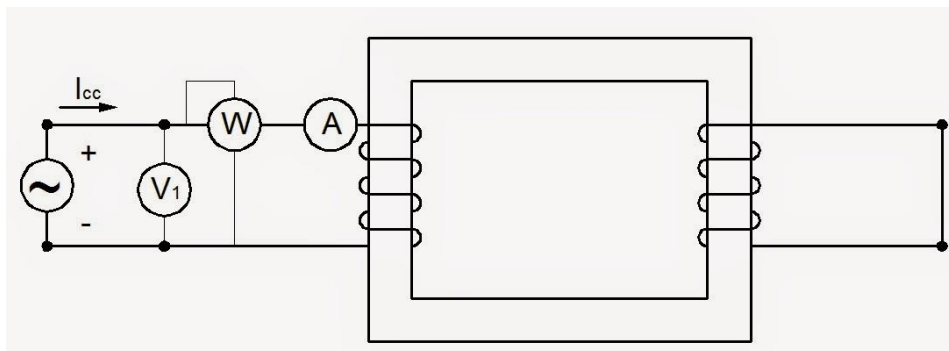


Figura 6.3. Esquema de ensayo de cortocircuito.

Las lecturas obtenidas con el vatímetro y el amperímetro se denominarán ahora como P_{cc} e I_1 mientras que la lectura del voltímetro será V_{1cc} .

La tensión aplicada en esta prueba representa un pequeño porcentaje respecto a la nominal, por lo que el flujo circulante por el núcleo es prácticamente nulo. Debido a esto la potencia medida por el vatímetro coincide con las pérdidas en el cobre de los devanados y podemos despreciar el valor de la rama en vacío.

De las medidas efectuadas podemos obtener el factor de potencia en cortocircuito:

$$P_{cc} = V_{1cc} I_1 \cos \varphi_{cc}$$

Y los valores de resistencia e inductancia de los devanados:

$$R_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_1} \cos \varphi_{cc} ; x_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_1} \sin \varphi_{cc}$$

Es decir, en el ensayo de cortocircuito determinamos los parámetros de la rama en serie del circuito equivalente obteniendo los valores totales de la resistencia en los devanados. Cabe destacar que las pérdidas en este ensayo solo serán las pérdidas nominales si la tensión aplicada coincide con la nominal.

En nuestro modelo a analizar realizaremos estos dos ensayos para obtener las pérdidas totales de transformador funcionando a plena carga y que desglosaremos en: pérdidas en el núcleo y en los devanados.

Estos datos serán uno de los puntos de partida a la hora de simular el modelo para analizar su comportamiento.

7. MODELO FÍSICO DEL TRANSFORMADOR

7.1 AUTODESK INVENTOR

Para poder llevar a cabo la simulación del transformador en las mismas condiciones que el modelo real es necesario un despiece minucioso de este. En la sección correspondiente se adjuntan los planos de cada una de las piezas que componen el transformador además de la vista explosionada del montaje que se lleva a cabo. Este modelo del transformador está realizado con el programa de diseño mecánico Autodesk Inventor.

Autodesk Inventor es un paquete de modelado paramétrico de sólidos en 3D similar a CATIA o SolidWorks. Como modelador paramétrico, no debe ser confundido con los programas tradicionales de CAD. Inventor se utiliza en diseño de ingeniería para producir y perfeccionar productos nuevos, mientras que en programas como Autocad se conducen solo las dimensiones. Un modelador paramétrico permite modelar la geometría, dimensión y material de manera que, si se alteran las dimensiones, la geometría actualiza automáticamente basándose en las nuevas dimensiones.

7.2 DISEÑO DE ELEMENTOS

Los bloques de construcción en Autodesk Inventor son las piezas. A partir de bocetos simples, en dos dimensiones, se pueden crear modelos en el espacio a través de operación básicas en 3 dimensiones (extrusiones, barridos, revoluciones...). Estos archivos de piezas con extensión de trabajo .ipt pueden unirse entre ellas mediante ensamblajes (.iam).

En la interfaz del boceto podemos ayudarnos de las herramientas de dibujo similares a AutoCad para conformar nuestro diseño. Autodesk nos da la opción de crear los bocetos en planos predefinidos del espacio o planos definidos por el usuario que cumplan unas condiciones necesarias (tres puntos, paralelismo, tangente a, etc).

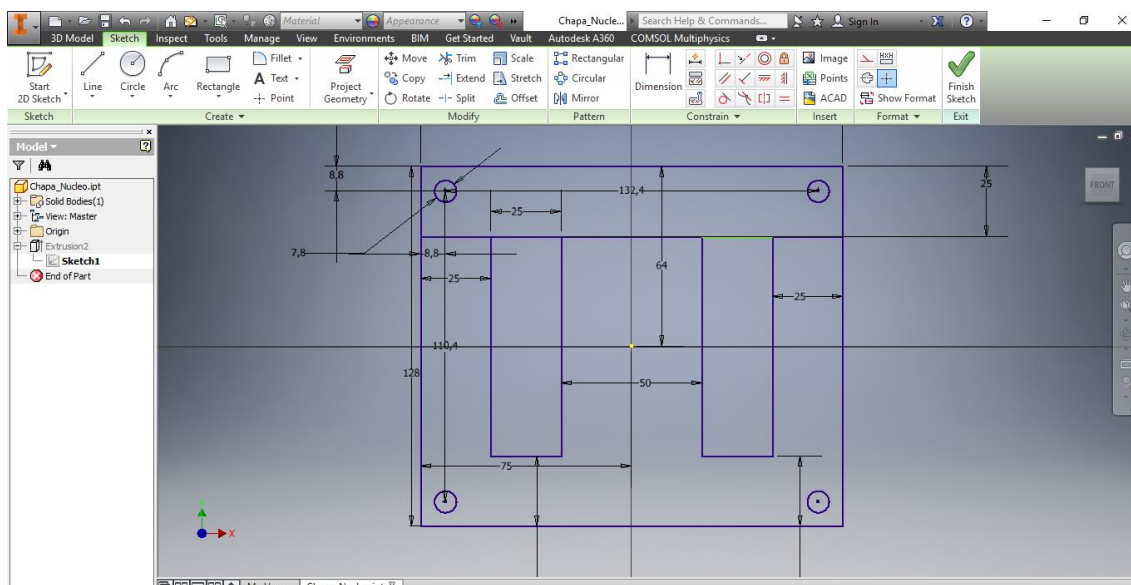


Figura 7.1. Ejemplo de la creación de una pieza a través de su boceto en Autodesk Inventor

Para realizar una operación en 3D será necesario siempre un boceto a consumir o utilizar de base para realizar la operación, si bien es posible utilizar el mismo boceto repetidas veces si es necesario. Las operaciones básicas como la extrusión o los agujeros consumirán un solo boceto, sin embargo, cierto tipo de operaciones necesitarán el aporte de dos bocetos independientes para su creación, como por ejemplo la operación barrido, donde es necesario indicar la base de la operación y también la guía o recorrido del barrido.

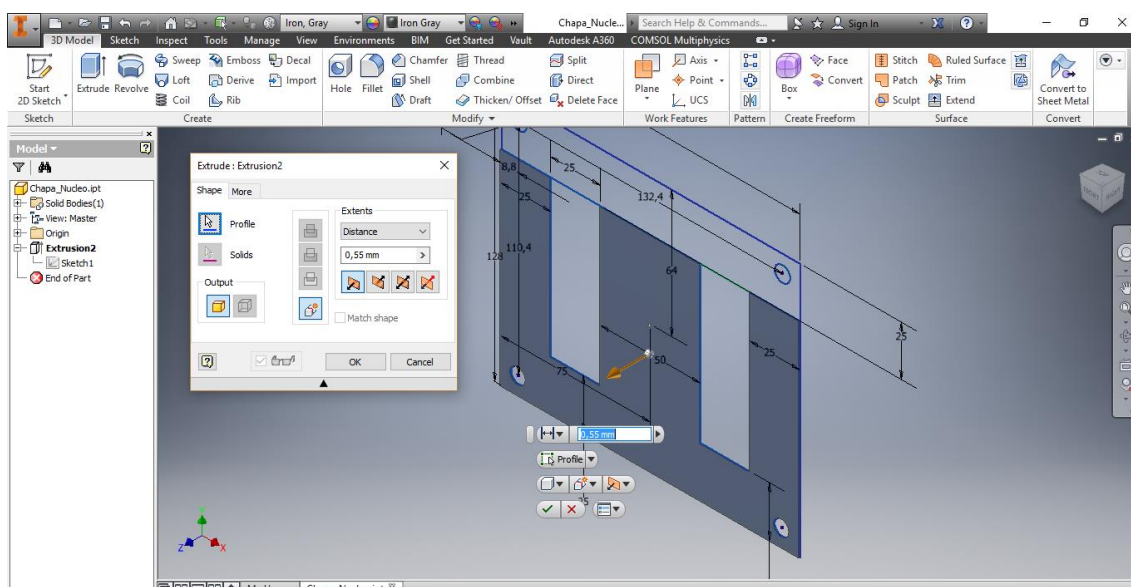


Figura 7.2. Ejemplo de operación donde se consume el boceto original para crear la estructura 3D.

7.3 CREACIÓN DE ENSAMBLAJES

Los ensamblajes son archivos independientes de las piezas originales donde se insertan tanto las piezas base como otras piezas predefinidas o conjuntos. Los elementos importados se unen entre sí mediante restricción totales o parciales en torno a caras, aristas, ejes etc.

La ventaja de este método radica en que cualquier modificación o corrección en una de las partes nos modifica todo el ensamblaje y las operaciones correspondientes dotando al usuario de una capacidad de corrección de errores bastante rápida y amplia. En un mismo ensamblaje podemos insertar varias piezas del mismo tipo si es necesario, de manera que es posible ensamblar una serie de elementos iguales para crear una pieza concreta compuesta de las piezas anteriores.

Para definir la posición relativa entre las piezas de un ensamblaje es necesario dotar de una serie de restricciones a los componentes. Estas restricciones vienen dadas en función de elementos o partes significativas de cada pieza, ya sean aristas, contornos más complejos, ejes o simetrías.

Si fuera necesario, Autodesk nos da la opción de insertar en un ensamblaje otros más pequeños creados anteriormente. De esta manera, gracias a estos sub-ensamblajes podemos crear piezas complejas de manera rápida, agregando cada parte de forma independiente.

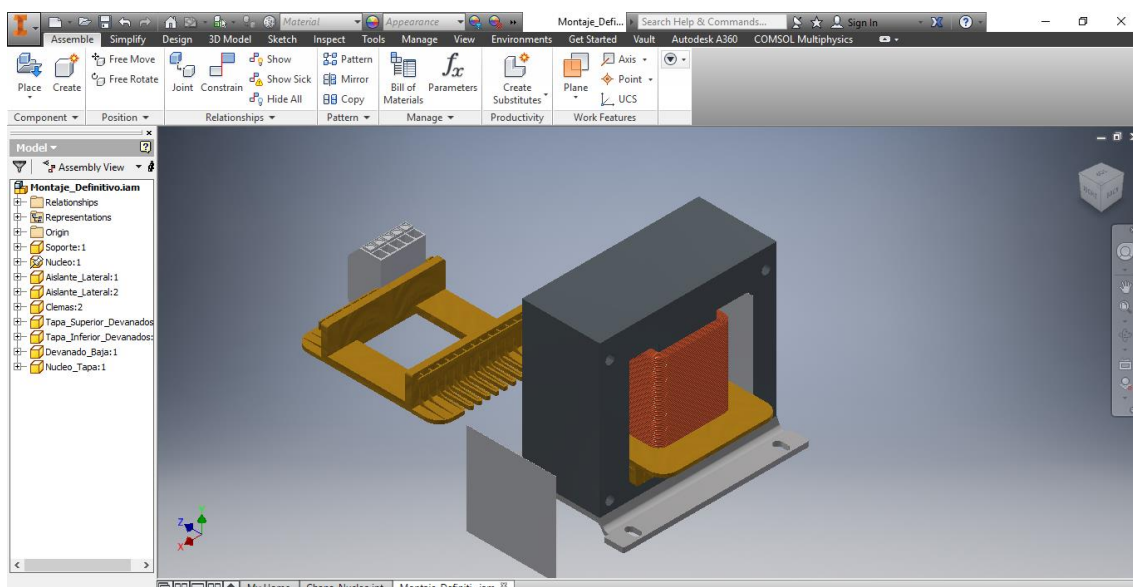


Figura 7.3.: Ejemplo de ensamblaje de diferentes piezas creadas anteriormente.

7.4 PLANOS Y VISTAS DE PIEZAS Y ENSAMBLAJES

Por último, Autodesk Inventor nos da la opción de exportar esas piezas y ensamblajes a formato .dwg donde seleccionamos las piezas requeridas y la vista que nos interese para realizar los planos de esta. En este apartado tendremos todos los elementos de acotación y anotación normalizados para acotar nuestras piezas y ensamblajes.

En nuestro caso, al tratarse de un modelo de transformador, es decir, una máquina estática no hemos necesitado insertar ni modelar uniones móviles ni pares cinemáticos. Se han tomado medidas físicas de cada parte del transformador y se han modelado esas piezas de manera separada. Posteriormente se han realizado un ensamblaje de todas ellas insertando las restricciones correspondientes.

En los anexos a este proyecto se aportan los planos del transformador creados con el programa Inventor con la extensión antes descrita. Se detalla las dimensiones estructurales de cada pieza, con sus vistas de detalle en caso de necesitarla, del transformador además una vista en explosión del montaje realizado y la vista final de la máquina.

Las medidas y dimensiones de los planos serán las utilizadas como base a la hora de realizar las aproximaciones y simplificaciones pertinentes para lograr un análisis del comportamiento térmico y magnético tanto de la máquina en régimen nominal, como del líquido refrigerante que lo rodea.

8. MODELO DE SIMULACIÓN

8.1 INTRODUCCIÓN

Una vez que tenemos el modelo físico del transformador con sus características definidas necesitamos realizar una serie de aproximaciones y simplificaciones para poder convertir ese modelo real en uno equivalente y apto para realizar cálculos y estudios de manera efectiva y en simulaciones con tiempos de cálculo factibles.

En este apartado describiremos la geometría utilizada y justificaremos las simplificaciones realizadas para pasar del modelo físico y real del transformador (realizado en Autodesk Inventor) a un modelo simplificado para realizar el análisis fluido-térmico-magnético en Comsol Multiphysics.

8.2 INTERPRETACION DEL MODELO

A la hora de realizar estudios del comportamiento en carga nominal de un transformador (ya sean de distribución o de potencia), los parámetros más interesantes desde el punto de vista industrial y comercial es el análisis del comportamiento térmico del transformador seguido del estado del fluido. Es decir, en la mayoría de los casos únicamente se tienen en cuenta las físicas de transferencias de calor en sólidos y fluidos.

En el estudio a realizar se acopla a estas dos físicas una tercera, referente al comportamiento magnético del transformador y el campo magnético que se crea en torno al núcleo y los devanados. A la hora de simular debemos acoplar las físicas en torno al valor que las relaciona, en este caso la temperatura, ya que esta nos hará variar el comportamiento del fluido tanto en la refrigeración y transmisión de calor como en su comportamiento respecto al campo magnético creado por el transformador.

En el modelo a estudiar consideramos convección natural del aceite mineral que circulará debido a diferencias de temperatura del fluido en distintos puntos del tanque. Esta diferencia de temperatura variará la densidad del fluido y se producirán los ciclos convección, que hacen que el fluido caliente ascienda respecto al líquido más frío.

8.3 GEOMETRÍA DEL TRANSFORMADOR

El transformador a analizar se trata de un transformador monofásico de baja capacidad (0.8 kVA) con el núcleo en columnas como ya se ha explicado en capítulos anteriores para su despiece físico. El tanque del ensayo, el cual no se ha modelado en Autodesk Inventor se aproxima a un cubo de 200x200 mm. con dos tuberías cilíndricas (radiadores) en una de sus caras laterales y otras dos en la cara opuesta. El punto de partida es el diseño en Autodesk Inventor.

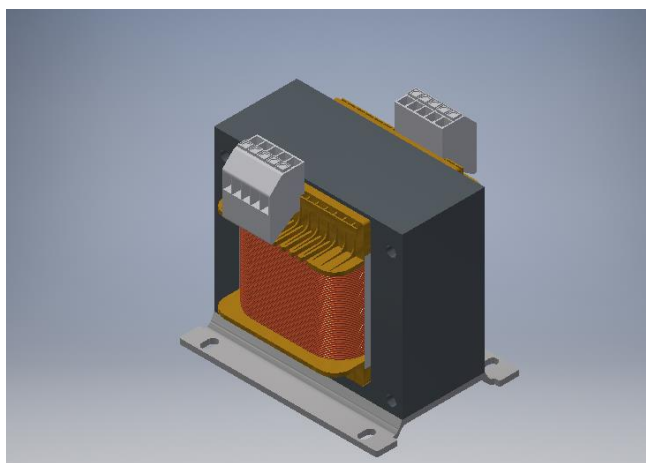


Figura 8.1. Punto de partida para las simplificaciones geométricas del transformador.

8.4 SIMPLIFICACIONES DEL MODELO GEOMETRICO

- La primera simplificación a realizar será prescindir de las clemas de ambos lados del transformador. El motivo principal es que, dado que están fabricadas en material plástico, dado que su función es servir de unión entre los arrollamientos del transformador y las tomas eléctricas de salida del tanque, su conductividad eléctrica es nula y su permeabilidad relativa es prácticamente la del aire (despreciable frente al núcleo y devanados).

En cuanto a valores de conducción térmica podemos despreciar su aportación al conjunto total, ya que tiene valores muy pequeños en comparación con el material del transformador. Influye también en esta aproximación la colocación de las clemas respecto a la entrada y salida del fluido refrigerante de los radiadores del ensayo, quedando a la misma distancia de estos y respecto del eje de simetría. Esto implica que, como la velocidad de entrada y salida es la

misma en ambas partes de la cuba, en la zona mitad nos encontraremos con dos velocidades de igual magnitud y sentidos opuestos, lo que origina una zona de estancamiento en la zona del eje simétrico del transformador.

- Para el modelo de simulación de los devanados se considera que las pérdidas por efecto Joule se generan de manera constante en todo el devanado, tanto el de baja tensión, como el de alta tensión. Además, se ha aproximado la geometría de los conductores con el fin de reducir el tamaño del mallado a utilizar.

Las tapas que cubren el devanado por la parte superior e inferior se han simplificado a dos láminas de material plástico con el fin de observar cómo afectan a la transmisión de calor y a la circulación del fluido en los puntos cercanos a los arrollamientos. De igual modo procederemos con el soporte del transformador, será simplificada su geometría a una lámina de dimensiones generales similares a la inicial.

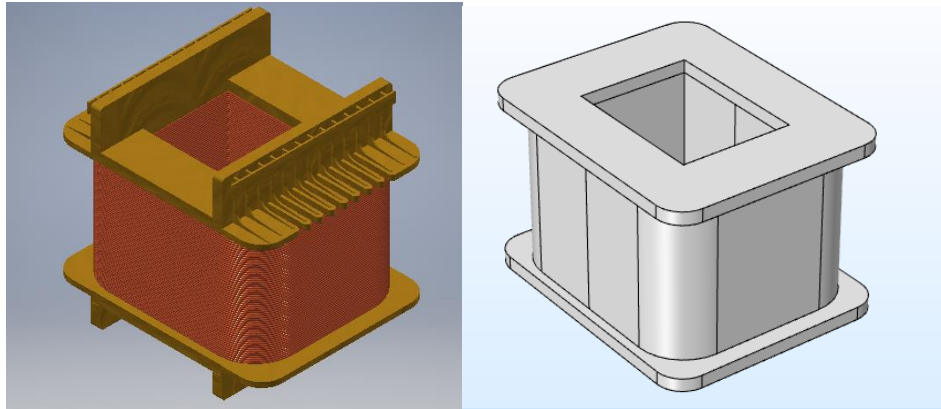


Figura 8.2. Geometría de los devanados antes y después de la simplificación.

En la imagen observamos que los devanados conservan sus medidas generales. Únicamente se han eliminado los huecos entre los conductores y se ha establecido una generación de calor uniforme en toda la geometría referente a los arrollamientos.

- En lo referente al núcleo, simplificaremos la geometría reduciendo el número de chapas o laminas utilizadas en la conformación del núcleo, es decir, aumentaremos el espesor de cada lamina lo suficiente para reducir el tiempo de computación y tamaño de mallado y trabajaremos con las láminas suficientes como para ver el efecto que producen en la generación del campo magnético el carlite aplicado entre lamina y lamina. También se considera que la generación de calor del núcleo se distribuye uniformemente por todo el volumen de la geometría.

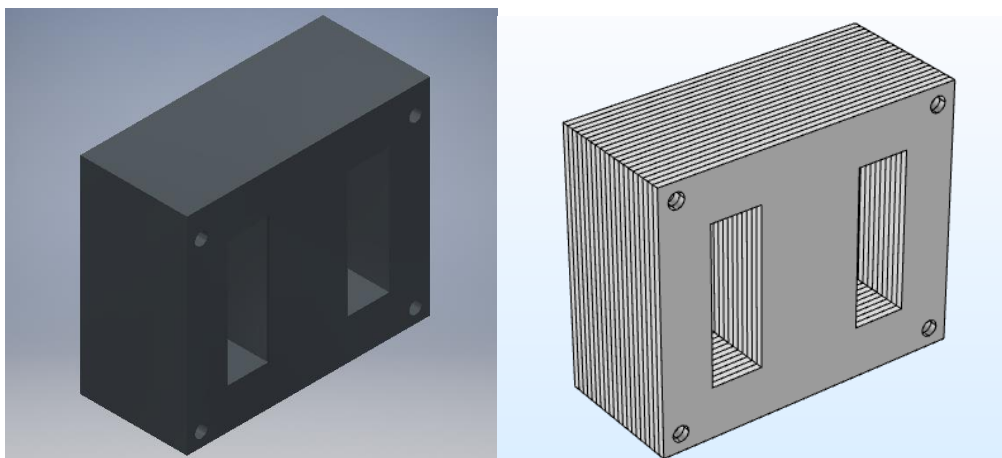


Figura 8.3. a) Núcleo formado por 120 láminas. b) Núcleo simplificado formado por 20 láminas.

El carlite utilizado como aislante entre láminas tiene un espesor despreciable (valores de 0.001 mm.) por lo que no se considerará geoméricamente (solamente a la hora de realizar los cálculos en la simulación). En la simulación se introducirá el carlite como condición de contorno interior del sistema.

El conjunto del transformador a analizar en Comsol Multiphysics quedaría de la siguiente manera:

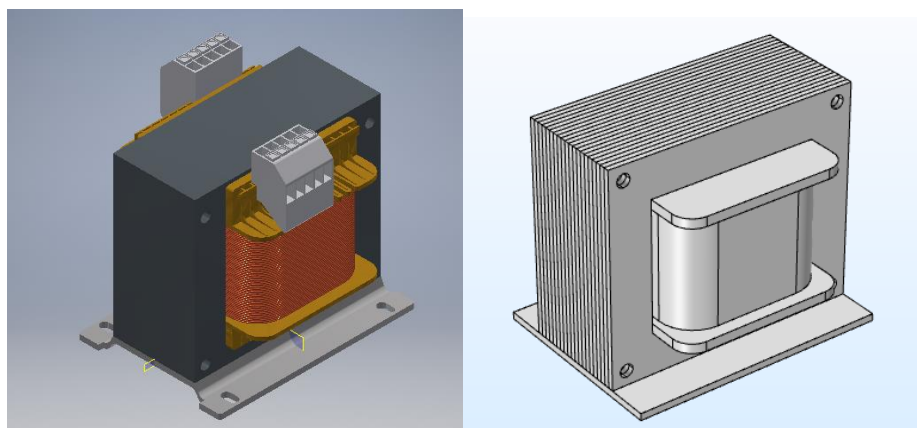


Figura 8.4. Comparación de la geometría simplificada con el montaje realizado con Autodesk Inventor.

Dado que es necesario estudiar el comportamiento del fluido refrigerante es necesario construir la geometría aproximada del tanque contenedor. En nuestro caso generaremos un cubo contenedor de medidas 200x 200 mm. en el que introduciremos las entradas y salidas de fluido, así como las condiciones de contorno pertinentes. El grosor de las paredes del tanque no será necesario definirlo ya que se considerará la condición de Resistencia Térmica Interna Despreciable (RTID). Esta aproximación es válida ya que el material de la cuba tiene un valor de conductividad térmica muy elevado, por lo que la temperatura de la pared externa del tanque será la misma que la de la pared interna. En conclusión, podemos considerar que la convección natural producida por el aire exterior se produce sobre la cara interna del tanque. El modelo completo para la simulación quedaría de la siguiente forma:

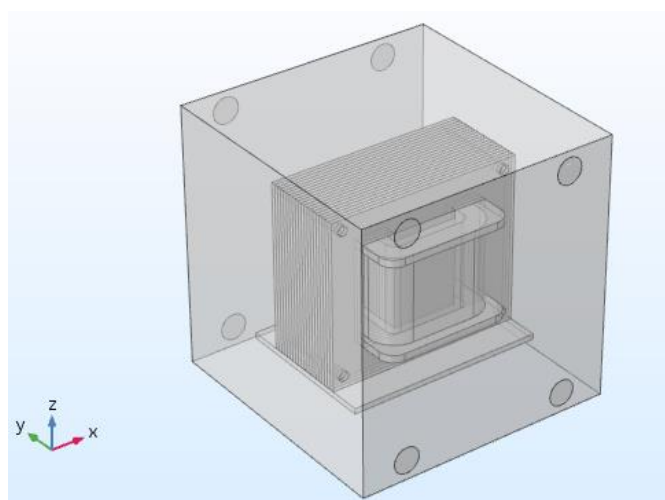


Figura 8.5.: Modelo completo de la geometría a simular.

En la figura anterior se muestran las entradas y salidas de fluido en las caras opuestas del tanque de manera que tenemos 4 entradas de fluido refrigerante en la parte inferior y 4 salidas en la parte superior.

Una vez obtenido este modelo podemos realizar una simplificación debido a la simetría presente respecto a los ejes YZ y XZ. Aplicando estas condiciones de contorno de simetría podemos trabajar con un cuarto de transformador extrapolando el comportamiento de ese sector al transformador completo. Esto es posible debido a las condiciones de entrada. Estas son idénticas en los cuatro radiadores (orificios de entrada en la imagen) y la generación de calor uniformemente distribuida en los devanados y núcleo.

Por lo tanto, el modelo final con el que se trabajará será:

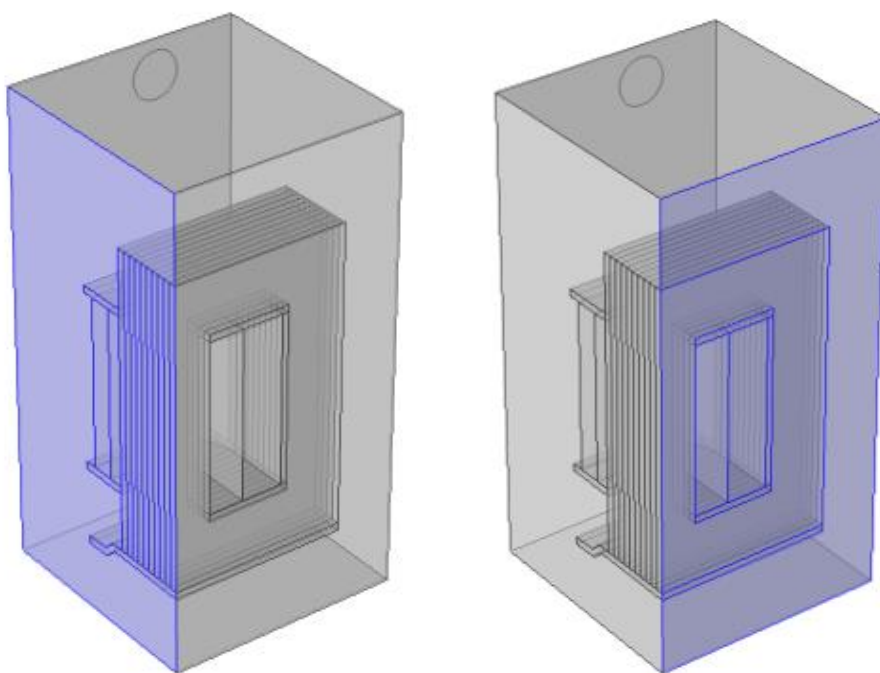


Figura 8.6. Planos de simetría aplicados al modelo.

8.5 PRINCIPIOS FÍSICOS

En la simulación del modelo geométrico se consideran tres físicas diferentes en la geometría. La primera es la transferencia de calor, mediante la que se calcula la distribución de las temperaturas en todos los dominios del modelo. La segunda es la dinámica de fluidos, mediante la cual determinamos el campo de velocidades y el



comportamiento del fluido refrigerante dentro del tanque. La última física hace referencia a cálculo de campos magnéticos y flujos generados, en este caso, por la presencia de los devanados y el núcleo del transformador. Como veremos más adelante, estas tres físicas interactúan entre ellas mediante la variable temperatura, ya que las propiedades de los materiales presentes en la geometría varían en función de los valores de la temperatura en ese punto o instante. Es necesario acoplar correctamente los cálculos entre estas tres físicas para obtener resultados lógicos y comparables con los obtenidos en el ensayo real del transformador.

En cuanto a los fenómenos de transferencia de calor, se tienen en cuenta los mecanismos de transmisión de calor por convección y por conducción. El mecanismo de conducción solo se produce entre dos sólidos en contacto mutuo y a diferente temperatura. Esa gradiente de temperaturas genera un flujo de calor del sólido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura. En el caso a estudiar se produce intercambio de calor entre sólidos en los devanados, núcleo, tapas protectoras y soporte o base del transformador.

La transferencia de calor entre sólidos y fluidos se denomina convección. Ocurre cuando un sólido y un fluido entran en contacto a diferente temperatura. Si el movimiento del fluido se debe a variaciones de su densidad (como en el caso a estudiar) se denomina convección natural, si el fluido es impulsado por un mecanismo externo estaremos hablando de convección forzada.

La física referente a campos magnéticos se utiliza para resolver variaciones de intensidad inducida en bobinas y los campos magnéticos que se crean. En nuestro estudio utilizaremos esta física para obtener la distribución del campo magnético creado por la intensidad circulante en los devanados y el flujo creado por esa intensidad.

8.6 MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO

Para realizar los cálculos, el programa Comsol se rige por un balance general de flujos de energía que cumple la siguiente expresión:

$$\nabla(-k * \Delta T) = Q - \rho C_p * \Delta T * u$$

Siendo “k” la conductividad térmica del material, “ C_p ” el calor específico, “ ρ ” la densidad del material y “Q” el calor generado por el sólido, en nuestro caso, los devanados y el núcleo. Estas variables (ρ , C_p y k) depende de la temperatura. Será necesario indicar esos valores (ecuaciones) como condiciones de entrada.

En el análisis del comportamiento del fluido utilizaremos la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento para fluidos incompresibles de Navier-Stokes. Como ecuación complementaria utilizaremos la ecuación de conservación de masa en un elemento diferencial.

$$\nabla(\rho \mathbf{U} \times \mathbf{U}) + \frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} = -\nabla p + \mu(\nabla^2 \mathbf{U}) + g(\rho - \rho_o)$$

$$\nabla(\rho \mathbf{U}) + \frac{\partial p}{\partial t} = 0$$

En estas ecuaciones se debe de tener en cuenta que los parámetros de viscosidad (μ) y densidad (ρ) son dependientes de la temperatura, es decir, necesitaremos aportar estas ecuaciones como dato de entrada de simulación.

Para la resolución de los campos magnéticos nos apoyaremos en las ecuaciones de Maxwell referentes al concepto de campo electromagnético.

La ley de Ampère hace referencia a la relación entre un campo magnético inmóvil y una corriente que no varía en el tiempo. Maxwell completó la ecuación para hacer referencia a campos no estacionarios:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Donde “ μ_0 ” es la permeabilidad magnética en el vacío y depende de la susceptibilidad magnética del material, mientras que “ ϵ_0 ” es la permitividad eléctrica en el vacío y depende de la susceptibilidad eléctrica.

La ley de Gauss indica que las líneas de los campos magnéticos deben ser cerradas. En otras palabras, se dice que, sobre una superficie cerrada, sea cual sea ésta, no seremos capaces de encerrar una fuente o sumidero de campo, esto expresa la inexistencia del monopol magnético.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

8.7 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES

En este apartado se definirán las propiedades de los materiales de los que se compone el modelo. Es necesario definir tanto los parámetros de los materiales sólidos como el cobre de los devanados o el acero del núcleo, como las propiedades del fluido refrigerante, en nuestro caso, aceite mineral.

Para una correcta resolución será necesario introducir expresiones matemáticas en aquellos parámetros que varíen en función de variables a estudiar en el modelo, por ejemplo, la temperatura. No podemos definir como constante una densidad para una temperatura concreta si en la posterior simulación esa temperatura variará en el tiempo. Los datos y resultados serán incorrectos.

8.7.1 Propiedades del aceite mineral

El programa Comsol Multiphysics cuenta con una librería interna de materiales con sus propiedades predefinidas. Así todo definiremos los parámetros de nuestro aceite mineral de acuerdo a datos concreto de este aceite. Mediante interpolaciones obtendremos una función sencilla que se aproxime de forma eficaz a los valores obtenidos experimentalmente.

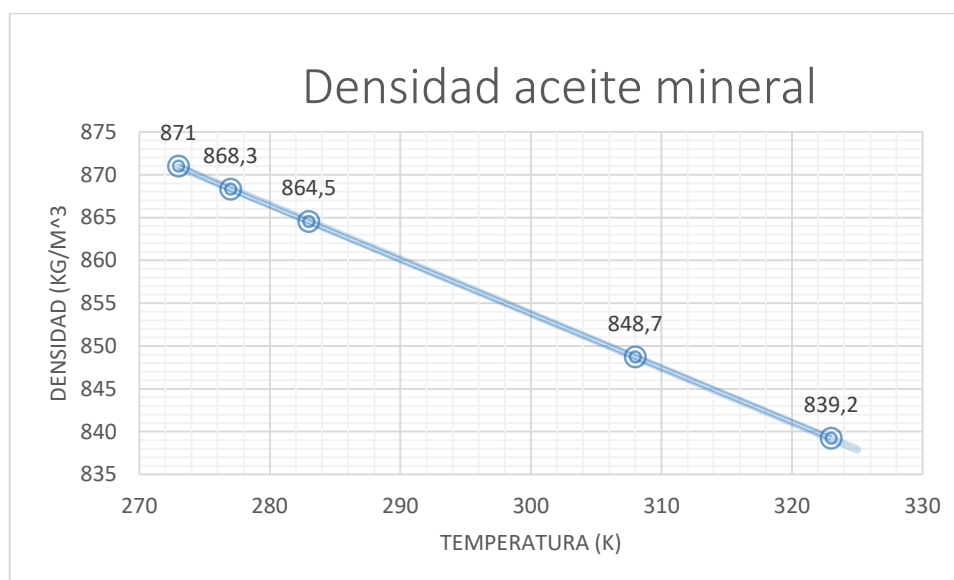


Figura 8.7. Densidad aceite mineral.

Ecuación obtenida: *Densidad*: $\rho = -0.5859 T + 1048.9$

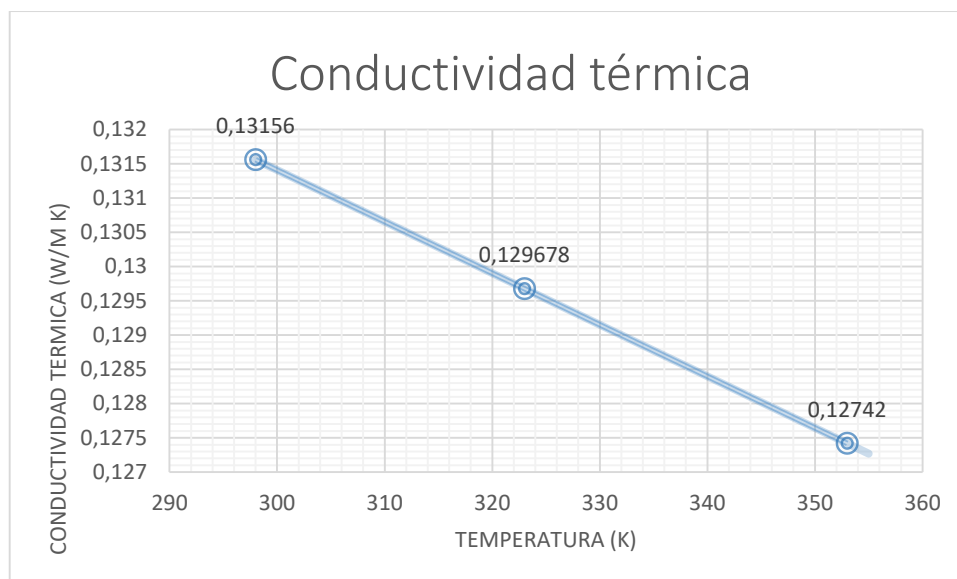


Figura 8.8. Conductividad térmica del aceite mineral.

Ecuación obtenida: *Conductividad*: $k = -7.53 \times 10^{-5} T + 0.154$

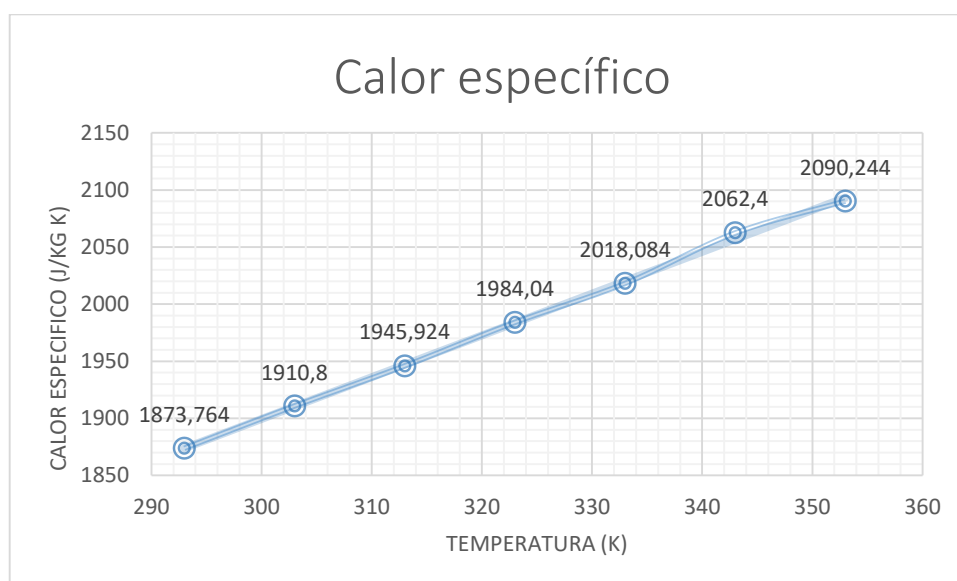


Figura 8.9. Calor específico del aceite mineral.

Ecuación obtenida: *Calor específico*: $C_p = 3.6080 T + 816.62$

A la hora de trabajar con el programa de análisis se ha aproximado la viscosidad cinemática del aceite a una ecuación de segundo grado (parábola) en vez de una exponencial, la cual sería una mejor aproximación, para reducir el tiempo de computación en la simulación y análisis de resultados. La ecuación viene aproximada en la siguiente gráfica.



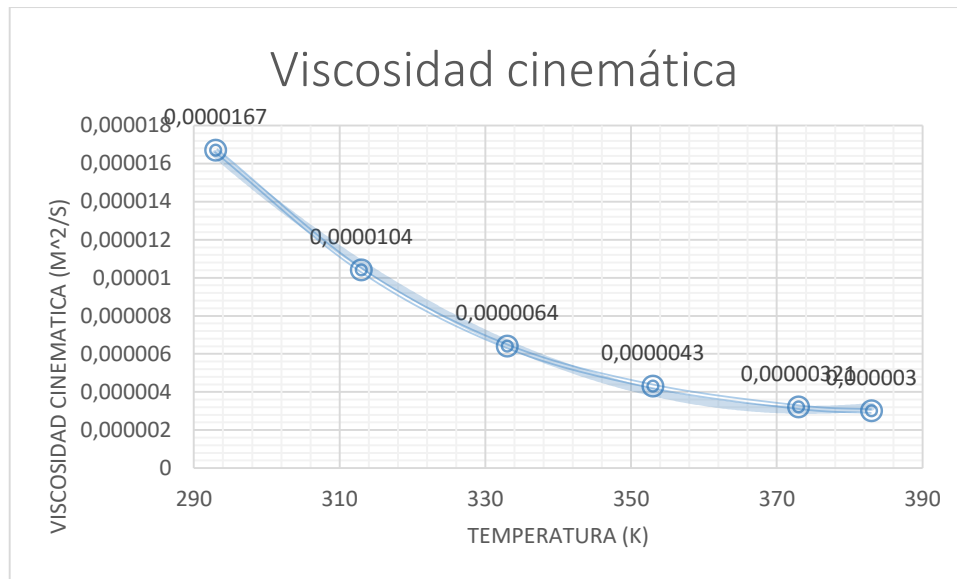


Figura 8.10. Viscosidad cinemática del aceite mineral.

Ecuación obtenida: $Viscosidad\ cinemática = 2.44 \times 10^{-9} * T^2 - 1.77 \times 10^{-6} * T + 3.25 \times 10^{-4}$

8.7.2 Propiedades de los materiales sólidos

Para definir las condiciones de partida y las condiciones de contorno en el análisis numérico necesitamos definir las propiedades físicas de los materiales sólidos. Estos materiales a definir son: el material del núcleo, los devanados, el soporte que sostiene el núcleo del transformador, las tapas de protección de los devanados y el tanque que contiene el transformador. Las propiedades a continuación descritas se han extraído de la librería interna del programa de análisis numérico con el que realizaremos la simulación.

- Para el material del núcleo se ha cargado el material de la librería de materiales que nos proporciona Comsol Multiphysics. El núcleo está compuesto de láminas de acero al silicio (3%) de grano orientado. La particularidad de estos aceros se basa en que son procesados de tal manera que las propiedades óptimas se desarrollan en la dirección de la laminación, debido a un control estricto de la orientación de los cristales con respecto a la lámina. Debido a la orientación especial, la densidad de flujo magnético se incrementa en un 30% en la dirección de laminación, aunque su punto de saturación magnética se

reduce en un 5%. Es el material más utilizado en el diseño de transformadores. Las propiedades físicas utilizadas son:

»	Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
☒	Conductividad eléctrica	sigma	1.72117[MS/m]	S/m
☒	Permitividad relativa	epsilon _r	1[1]	1
☒	Conductividad térmica	k	400	W/(m·K)
☒	Densidad	rho	8700	kg/m ³
☒	Capacidad térmica a presión constante	C _p	385	J/(kg·K)
☒	Campo magnético tangencial, norma	normHeff	HBeff(normBeff)	A/m
	Campo magnético, norma	normH	HBCurve1(normB[1/(T)])[A/m]	A/m
	normB	normB	$\sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2}$	T
	Densidad de flujo magnético, norma	normB	BHCurve1(normH[1/(A/m)])[T]	T
	normH	normH	$\sqrt{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2}$	A/m
	normBeff	normBeff	$\sqrt{\text{realdot}(B_1, B_1) + \text{realdot}(B_2, B_2) + \text{realdot}(B_3, B_3)}$	T

Figura 8.11. Propiedades predefinidas del núcleo del transformador (SILICON STEEL GO 3%)

En el programa, una vez seleccionado el material aparecerán marcadas aquellas propiedades que serán utilizadas en las físicas seleccionadas. En nuestro caso, las explicadas en los capítulos “Principios Físicos” y “Modelo Físico-matemático”.

- Los arrollamientos del transformador son de cobre, posee una gran conductividad térmica y eléctrica. Las propiedades de este material son las predefinidas por la librería de Comsol, y son las siguientes:

»	Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
☒	Permeabilidad relativa	mur	1	1
☒	Capacidad térmica a presión constante	C _p	385[J/(kg·K)]	J/(kg·K)
☒	Permitividad relativa	epsilon _r	1	1
☒	Densidad	rho	8960[kg/m ³]	kg/m ³
☒	Conductividad térmica	k	400[W/(m·K)]	W/(m·K)
	Conductividad eléctrica	sigma	5.998e7[S/m]	S/m
	Coefficiente de expansión térmica	alpha	17e-6[1/K]	1/K
	Módulo de Young	E	110e9[Pa]	Pa
	Coefficiente de Poisson	nu	0.35	1
	Resistividad de referencia	rho0	1.72e-8[ohm·m]	Ω·m
	Resistividad, coeficiente de temperatura	alpha	0.0039[1/K]	1/K
	Temperatura de referencia	Tref	298[K]	K

Figura 8.12. Propiedades del cobre de los devanados (COPPER).

- El contenedor del ensayo está fabricado de acero al cromo, níquel y molibdeno. Este acero está catalogado como AISI 4340 y pertenece a la librería de materiales cuyas propiedades están recogidas en la tabla siguiente.



»	Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
✓	Permeabilidad relativa	mur	1	1
✓	Conductividad eléctrica	sigma	4.032e6[S/m]	S/m
✓	Permitividad relativa	epsilon _r	1	1
	Coefficiente de expansión térmica	alpha	12.3e-6[1/K]	1/K
	Capacidad térmica a presión constante	C _p	475[J/(kg·K)]	J/(kg·K)
	Densidad	rho	7850[kg/m ³]	kg/m ³
	Conductividad térmica	k	44.5[W/(m·K)]	W/(m·K)
	Módulo de Young	E	205e9[Pa]	Pa
	Coefficiente de Poisson	nu	0.28	1

Figura 8.13. Propiedades físicas del tanque (STEEL AISI 4340).

Este acero es el mismo utilizado para la conformación del soporte del transformador.

- Las protecciones en la parte superior e inferior de los devanados son de un material plástico elegido por su baja conductividad térmica y aislamiento electromagnético.

»	Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
✓	Capacidad térmica a presión constante	C _p	1470[J/(kg·K)]	J/(kg·K)
✓	Densidad	rho	1190[kg/m ³]	kg/m ³
✓	Conductividad térmica	k	0.18[W/(m·K)]	W/(m·K)
✓	Permeabilidad relativa	mur	1	1
✓	Conductividad eléctrica	sigma	5	S/m
✓	Permitividad relativa	epsilon _r	1	1
	Coefficiente de expansión térmica	alpha	7.0e-5[1/K]	1/K
	Módulo de Young	E	3.2e9[Pa]	Pa
	Coefficiente de Poisson	nu	0.35	1

Figura 8.14. Propiedades físicas del plástico protector (ACRYLIC PLASTIC).

9. COMSOL MULTIPHYSICS

9.1 INTRODUCCIÓN

Para poder resolver las ecuaciones planteadas en los apartados anteriores aplicadas a la geometría y materiales descritos con una exactitud moderada necesitamos utilizar una potente herramienta de cálculo. Esta herramienta es un software informático capaz de realizar cálculos ligados a resolución de ecuaciones diferenciales referentes a movimientos de partículas, cambios de temperaturas y flujos magnéticos.

Comsol Multiphysics utiliza una técnica numérica para la resolución de las ecuaciones basada en elementos finitos (MEF). A continuación, explicaremos básicamente en que consiste este método.

9.2 METODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Este método nos permite obtener soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales parciales mediante técnicas numéricas estándar como el método de Euler o de Runge-Kutta.

El elemento continuo a analizar será dividido en pequeños elementos finitos conectados entre sí por una serie de puntos denominados nodos. Las ecuaciones iniciales a aplicar al elemento continuo se aplicarán de igual forma a los elementos finitos.

Con esta fórmula se consigue pasar de un elemento continuo, con infinitos grados de libertad, a un sistema con un numero de grados de libertad igual a la cantidad de elementos en los que hemos dividido el elemento continuo inicial. Las ecuaciones diferenciales a aplicar al sistema continuo pasaran a ser un conjunto de ecuaciones (lineales o no lineales) proporcional a los elementos finitos creados.

El sistema a analizar se puede clasificar según lo siguiente:

- Dominios: Espacio geométrico donde se va a llevar a cabo el análisis. A su vez se puede clasificar según la geometría y las dimensiones que lo conforman.
- Condiciones de contorno: Variables de partida (conocidas) necesarias para poder resolver el problema y que condicionan el comportamiento del sistema.

- Incógnitas: Variables del sistema que desconocemos y queremos calcular su valor. Dependerán de las condiciones de contorno añadidas y de las ecuaciones utilizadas para su resolución.

El método de los elementos finitos lleva a cabo una discretización de cada dominio continuo en elementos más pequeños. Este mallado aplicado puede tener unas características variables, dependiendo de la geometría local de cada zona del dominio y de las físicas a aplicar sobre él. Condiciona en gran medida la resolución del problema, ya que a cada nodo o elemento del mallado se le aplicaran las ecuaciones elegidas para el modelo.

Este método no deja de ser un método aproximado a la solución real del sistema siendo mayor la precisión alcanzada cuanto más fina es la malla, es decir, mayor cantidad de elementos (y ecuaciones) y mayor el tiempo de computación necesario para su resolución.

9.3 COMSOL MULTIPHYSICS

El programa elegido para realizar los cálculos y aplicar el mallado necesario es Comsol Multiphysics versión 5.2a. Se trata de un programa especializado en los campos de ingeniería, física y matemática aplicada. Otros programas equivalentes a este simulador son Catia, Cosmos, SolidWorks. Estos programas, junto con Comsol, son utilizados para pre análisis con el objetivo de llegar a una serie de resultados que verifiquen o no las suposiciones e ideas iniciales con la posterior construcción y diseño de un prototipo. De esta manera el prototipo será mucho más exacto de forma inicial, ya que los datos de partida son más fiables gracias a esta resolución numérica.

El programa Comsol nos permite trabajar con una geometría creada desde cero en el mismo programa (a través de herramientas de CAD) o importada desde ficheros externos. A esta geometría se añadirán las condiciones de contorno pertinentes y las ecuaciones (físicas) que necesitamos en cada geometría. Aplicando un mallado a la estructura procederemos a la simulación (resolución de las ecuaciones).

Comsol nos permite realizar estas acciones a través de una interfaz simple e intuitiva. Además se podrá trabajar en modelos multidimensional según convenga (1D, 2D, 3D,...) e insertar gran variedad de físicas a los modelos, siendo posible el acoplamiento de estas cuando sea necesario.

La generación automática y adaptativa del mallado y la biblioteca de materiales permiten una maniobrabilidad sobre los cálculos muy extensa.

Entre las físicas disponibles para su aplicación a la geometría nos encontramos:

- Mecánica de estructuras.
- Modelización de componentes.
- Matemática aplicada.
- Física, mecánica cuántica.
- Reacciones químicas, transferencia de calor, mecánica de fluidos.
- Electromagnetismo.

9.4 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

A continuación, se explicarán los pasos a seguir a la hora de trabajar con este tipo de programas. Esta metodología utilizada se puede dividir u ordenar en 3 etapas generales: preproceso, proceso y postproceso.

El preproceso constituye todos los cálculos previos a realizar antes de la solución del problema. Esto incluye la selección del modelo, el diseño de la geometría y la introducción y elección de las condiciones de contorno.

Una vez definidas estas condiciones debemos seleccionar las físicas que trabajaran en la geometría y sobre que partes de ella, siendo posible la asignación de diferentes físicas en distintos subdominios de la geometría completa.

El último paso del preproceso es definir el mallado, Comsol nos da la opción de crear un mallado por defecto en función del tipo de físicas seleccionadas para el análisis. Así todo el diseñador puede variar y modificar el mallado creado según crea conveniente.

En la etapa de proceso se determinan las condiciones en que deben obtenerse los resultados, es decir, el tipo de solver (solucionador) que utilizaremos para realizar los cálculos de las físicas propuestas sobre el mallado elegido. Comsol dispone de varios tipos de solucionadores según qué solución necesitemos obtener, por ejemplo, estudio estacionario, en el dominio de la frecuencia, respuesta transitoria etc.

En el postproceso se seleccionarán los resultados que interesen al diseñador y los diferentes gráficos o conjuntos de datos obtenidos que respondan a las incógnitas planteadas al inicio de la simulación.

9.5 MODELO FÍSICO A UTILIZAR

En este apartado hemos seleccionaremos el modelo físico que utilizaremos durante la simulación. Nada más ejecutar Comsol Multiphysics nos dará la opción de seleccionar el tipo de dimensión sobre la que queremos trabajar. En nuestro caso realizamos un estudio de una geometría en tres dimensiones, por lo que seleccionamos 3D.

El siguiente paso es definir las físicas a utilizar. Como se ha explicado en capítulos anteriores vamos a realizar estudios referentes al comportamiento fluido-térmico-magnético. Añadiremos las siguientes físicas: transferencia de calor en sólidos, mecánica de fluidos en régimen laminar y campos magnéticos.

Una vez seleccionado el espacio físico donde vamos a trabajar modelaremos la geometría mediante operación similares a las utilizadas por Autodesk Inventor. Sobre esta geometría hemos aplicado las simplificaciones anteriormente consideradas y justificadas sobre el diseño realizado en Autodesk Inventor cuyas medidas aparecen en los planos adjuntados “PLANOS DEL TRANSFORMADOR”. La geometría simplificada (y justificada en el Capítulo 8.4 Simplificaciones del Modelo Geométrico) con la que vamos a trabajar:

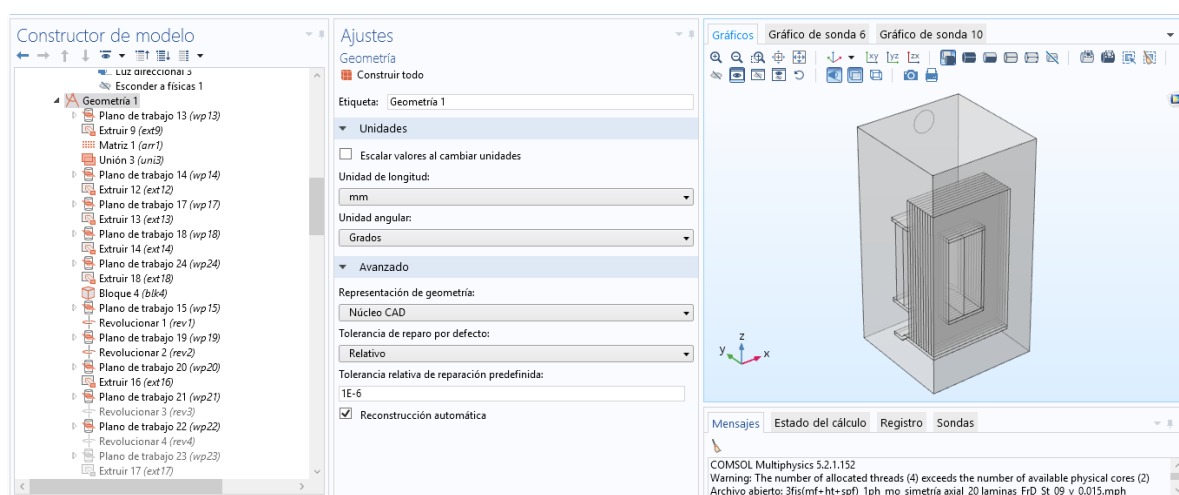


Figura 9.1. Geometría prevista para la simulación.

Los dominios generados con las operaciones de dibujo necesitan unas propiedades y unos valores iniciales. Para ello seleccionamos “Parámetros” en la pestaña de “Definiciones globales” y completaremos la tabla con los valores siguientes.

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
Vol_nucleo	243800.0 [mm ³]	2.438E-4 m ³	Volumen de un cuarto de núcleo (m ³)
Perd_nucl...	(34/4) [W]	8.5 W	Pérdidas nominales en un cuarto de núcleo (W)
Vol_prima...	31330.0 [mm ³]	3.133E-5 m ³	Volumen de un cuarto de primario (m ³)
Pn_primar...	(11/4) [W]	2.75 W	Pérdidas nominales en un cuarto de primario (W)
Vol_secun...	111200.0 [mm ³]	1.112E-4 m ³	Volumen de un cuarto de secundario (m ³)
Pn_secun...	(9/4) [W]	2.25 W	Pérdidas en un cuarto de secundario (W)
Np	322	322	Espiras del primario
Ns	644	644	Espiras del secundario
v_in	15[mm/s]	0.015 m/s	Velocidad de entrada
T_in	50[degC]	323.15 K	Temperatura de entrada
T_init	50[degC]	323.15 K	Temperatura inicial
nu	50[Hz]	50 Hz	Frecuencia de la señal
C	1.5	1.5	Índice de carga
Pc_primario	C ² *Pn_primario	6.1875 W	Pérdidas en el primario
Pc_secun...	C ² *Pn_secundario	5.0625 W	Pérdidas en el secundario
T_aire	24[degC]	297.15 K	Temperatura del aire

Figura 9.2. Tabla con los valores iniciales del modelo.

En la tabla se han añadido los valores conocidos del transformador como son: el volumen tanto del núcleo como de los devanados (este volumen es la cuarta parte del total ya que estamos aplicando dos planos de simetría), las pérdidas obtenidas en los ensayos de vacío y cortocircuito (también referentes a la cuarta parte del transformador), las velocidades y temperaturas iniciales de las que partimos, así como el índice de sobrecarga del transformador. Este índice de sobrecarga afectará a las tensiones y corrientes soportadas por los devanados y el núcleo y, por tanto, a las pérdidas que generarán.

Una vez definidos los datos generales de partida es necesario agrupar los diferentes dominios relativos a un mismo material. Distinguiremos entre el fluido que rodea el transformador, el núcleo compuesto de las láminas, los devanados de cobre, las tapas protectoras de estos, y las paredes de la cuba. Para definir estos dominios seleccionamos la pestaña Componente y añadir Selección explícita. Sobre la geometría se nos permitirá seleccionar los diferentes subdominios o contornos de los que se compone el dominio principal. Esto facilita y simplifica el trabajo a la hora de



añadir condiciones de contorno o materiales sobre diferentes partes de la geometría que tengan estas mismas condiciones.

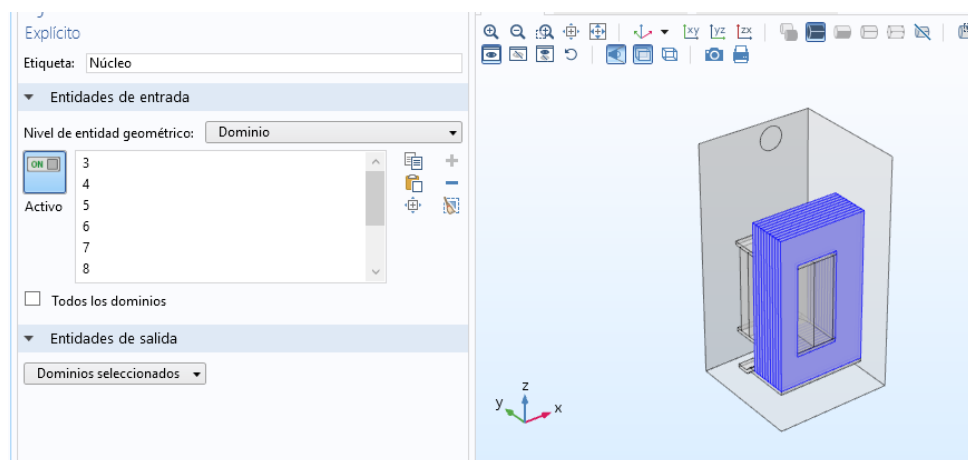


Figura 9.3. Agrupación de las láminas del núcleo en selección explícita.

En la figura observamos cómo hemos seleccionado las diferentes laminas que componen el núcleo bajo la etiqueta núcleo. Más adelante podremos utilizar esta etiqueta para seleccionar conjuntamente el material del núcleo o las condiciones de contorno. De igual modo hemos procedido a la hora de definir los devanados, las tapas, el soporte y las paredes de la cuba. Además, hemos definido los contornos físicos de los dos planos de simetría.

El siguiente paso es definir las propiedades de cada elemento. Esto se consigue asignando un material a cada uno de ellos. El material utilizado se obtiene de la biblioteca de materiales interna de Comsol para todos los materiales menos en el caso del fluido refrigerante, que hemos obtenido las propiedades necesarias de forma independiente. La elección de estos materiales esta explicada y justificada en el capítulo 10.7 (Propiedades físicas de los materiales).

Como las propiedades del fluido las hemos definido en función de las tablas de datos del capítulo 10.7 es necesario insertar dichas funciones y definirlas como propiedad perteneciente al dominio del fluido. En la pestaña “Definiciones globales” insertamos las funciones necesarias y definimos sus parámetros. Aplicaremos estos pasos para definir: densidad, capacidad calorífica, viscosidad cinemática y conductividad térmica.

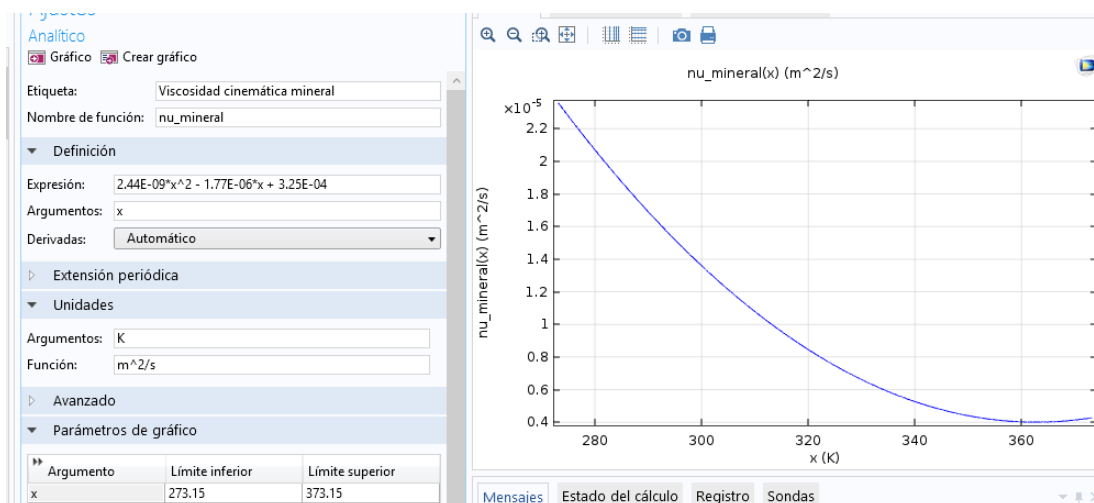


Figura 9.4. Viscosidad cinemática definida en Comsol Multiphysics.

Estas propiedades definidas serán añadidas al fluido en su tabla de características correspondiente. Además, se han añadido dos funciones sinusoidales que se corresponden con los valores nominales de las intensidades que circulan por los devanados.

9.6 Condiciones de contorno

Antes de aplicar el mallado a nuestra geometría necesitamos definir las condiciones de contorno. En este grupo englobamos tanto las condiciones de contorno exteriores, referidas a la convección exterior del tanque y las paredes, como las propiedades aplicadas a elementos interiores como la superficie entre láminas del núcleo. Estos dos tipos de condiciones son considerados de la misma forma ya que ambos hacen referencia al comportamiento de nuestro sistema en zonas donde los diferentes dominios y contornos entran en contacto, siendo necesario explicar el comportamiento en esa zona “conflictiva”.

Estas condiciones de contorno se aplicarán en torno a la física que actuará en ese caso concreto, siendo posible (como en nuestro caso) que en un mismo dominio o contorno actúen varias físicas a la vez. En este caso debemos añadir tantas condiciones de contorno sean necesarias en un mismo dominio, quedando ordenadas estas condiciones definidas en torno a las diferentes físicas presentes.

En la simulación intervienen tres físicas diferentes acopladas por la variable temperatura por lo que, a continuación, definiremos las condiciones de contorno de cada una de ellas. Para seleccionar la condición correspondiente activaremos la

pestaña “Física” en el panel superior y a continuación, dependiendo de la geometría a definir, seleccionaremos “Dominios”, “Contornos” o la opción que se ajuste a cada caso.

9.6.1 Campos magnéticos

En esta física será necesario añadir y definir los comportamientos del núcleo, los devanados y el fluido respecto al campo magnético que se generará en la simulación.

Tenemos los siguientes tipos de condición de contorno en dominios:

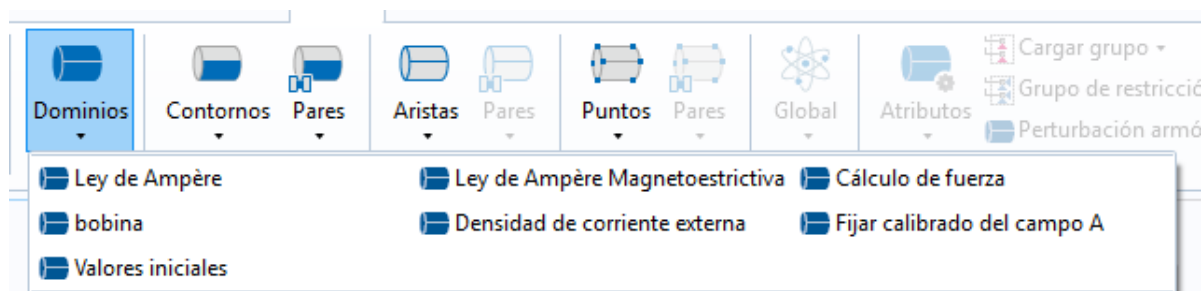


Figura 9.5. Dominios disponibles en la física de campos magnéticos.

Y referidas a contornos (caras):

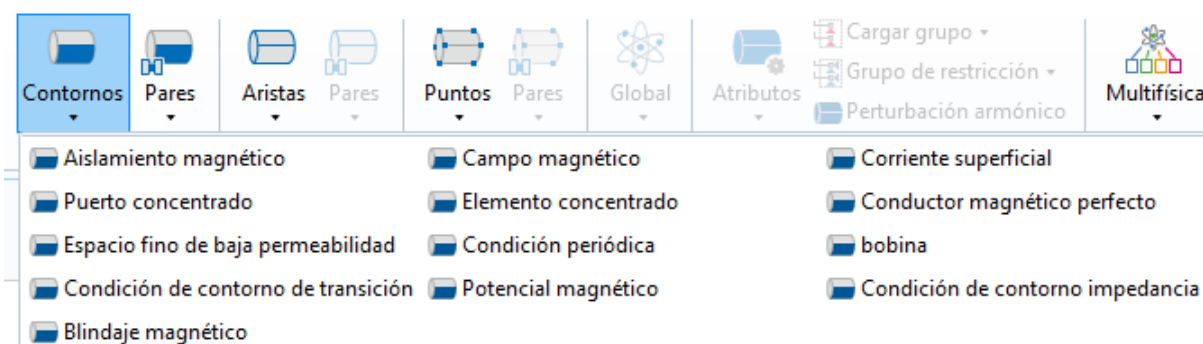


Figura 9.6. Contornos disponibles en la física de campos magnéticos.

Necesitamos definir los dominios en donde se va a general el campo magnético creado por los devanados. En nuestro modelo el campo circulará por el núcleo del transformador y en torno a él. Por ello los dominios afectados serán el fluido y el núcleo del transformador. Para definir esta condición seleccionaremos en los dominios disponibles en la imagen “Ley de Ampère”. Seleccionaremos esta opción dos veces, una haciendo referencia al dominio del fluido (aceite mineral, con unas propiedades) y otra al núcleo del transformador.

Hemos realizado esta selección por separado ya que en núcleo del transformador interviene la curva de magnetización del material. Esta curva registra el nivel de saturación del núcleo en función del campo magnético que circula a través de él. Comsol nos da la opción de en vez de utilizar esta curva (mayor tiempo de computación en la simulación), trabajar con otra curva aproximada a esta, llamada Curva Efectiva HB. Por esta razón hemos definido por separado el núcleo del transformador del fluido.

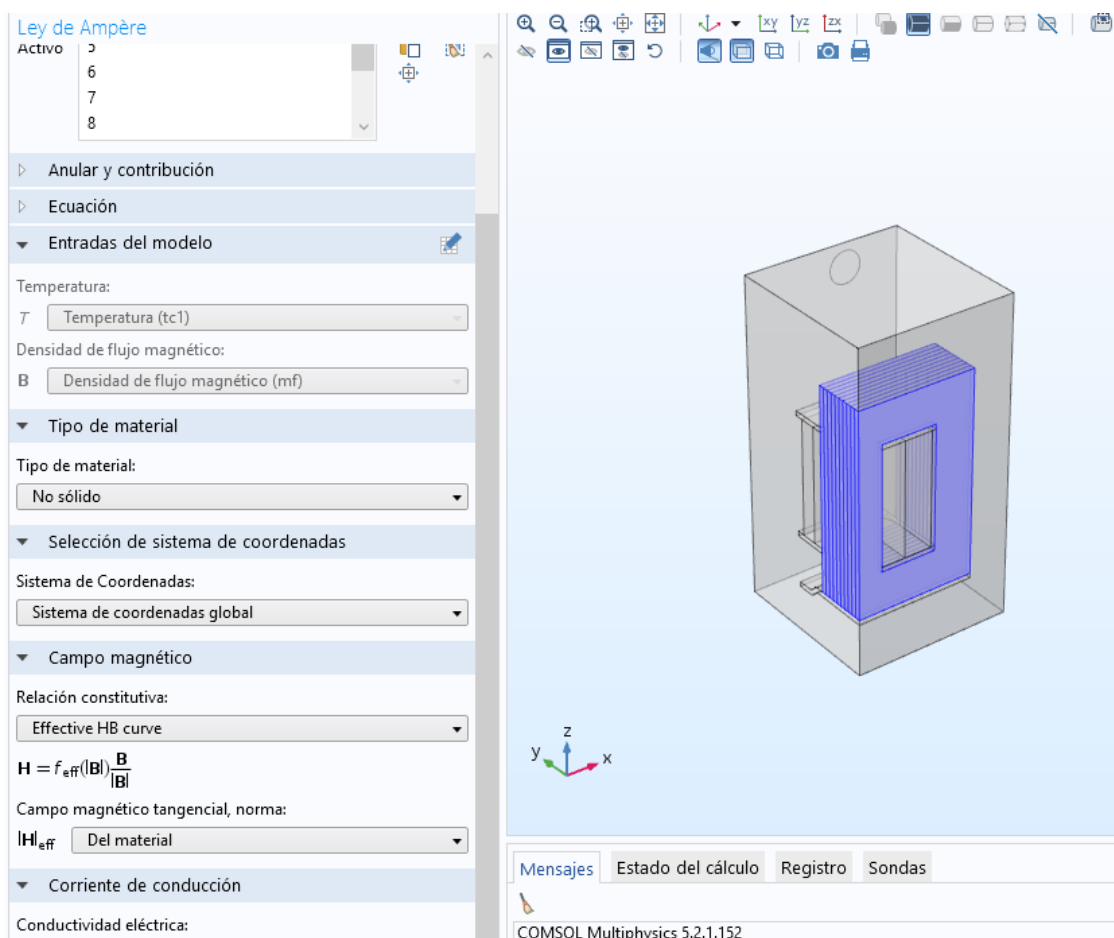


Figura 9.7. Curva efectiva HB asignada al núcleo del transformador.

En la imagen vemos seleccionada esa opción de curva efectiva aplicada al dominio del núcleo.

Para definir los dominios pertenecientes a los devanados utilizaremos la condición de “bobina”, que nos permite definir por separado cada arrollamiento y definir sus parámetros de entrada. Entre estos parámetros a definir se encuentra el tipo de

arrollamiento, el área de la sección de ese devanado, así como el número de espiras y el modo de excitación (tensión o corriente en su valor de pico). Todos los parámetros están enfocados a definir el campo magnético que generarán los devanados del transformador.

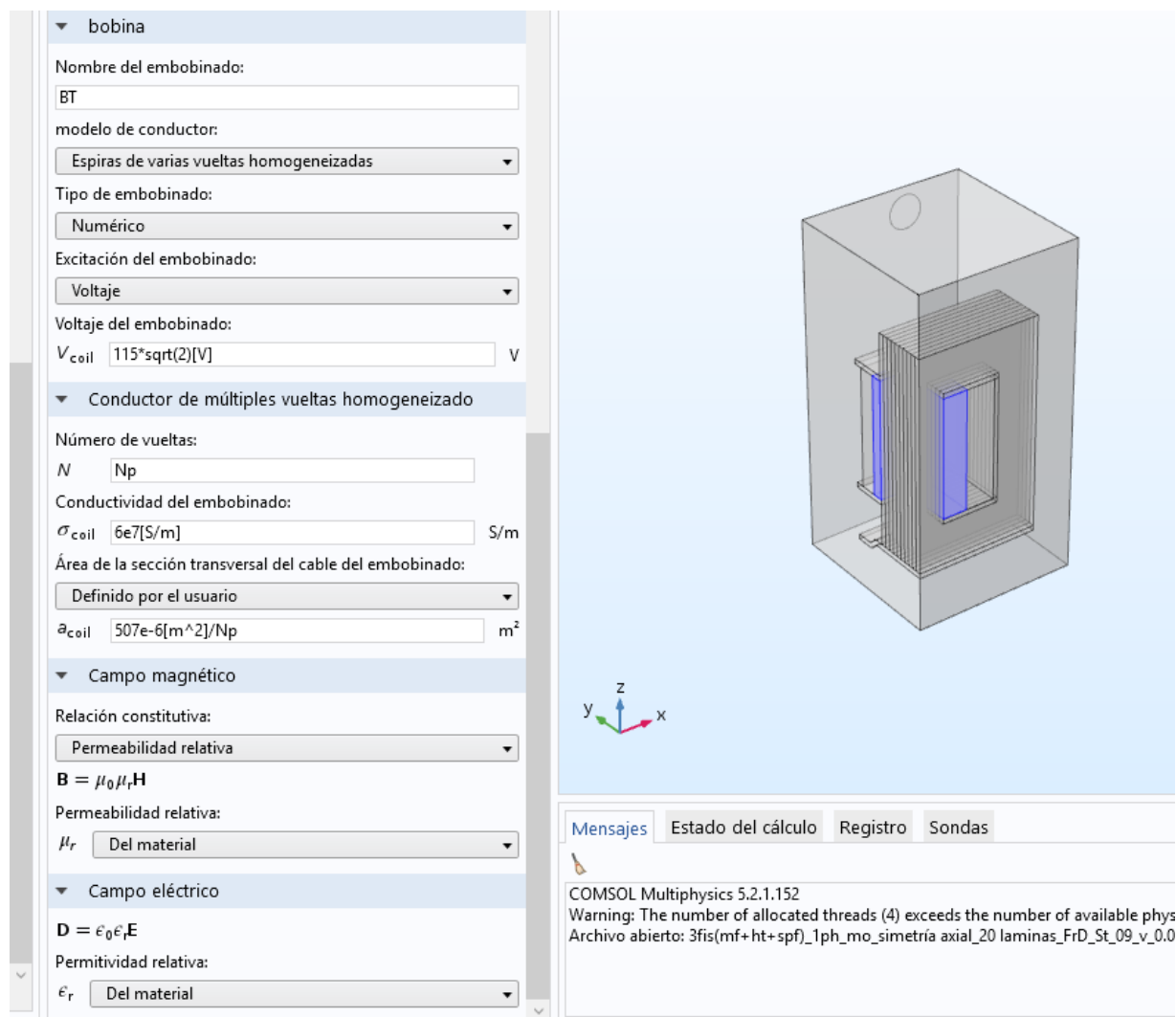


Figura 9.8. Definición del arrollamiento de baja tensión.

En la imagen están definidos los parámetros del devanado de baja tensión. Con el devanado de alta tensión se repite el procedimiento respetando los valores propios de este, (distinta tensión de alimentación, área correspondiente...).

Por último, se añadirá una condición para mejorar la estabilidad y conseguir una única solución al resolver los sistemas de ecuaciones referentes al campo magnético. Seleccionamos "Fijar calibrado de campo A" asignando todos los dominios al campo y dando el valor de la unidad a la variable Ψ (A/m) que estará por definir.



Con los dominios definidos necesitamos ajustar los contornos de la geometría. Estas condiciones a definir son:

- El aislamiento magnético en los planos de simetría del transformador. Por la propia condición de simetría, ninguna línea de campo magnético atravesará el plano de la simetría ya que habrá otra línea de campo de igual forma en la parte simétrica de este. Debido a esto aplicamos condición de contorno “Aislamiento magnético” en los dos contornos del plano de simetría.
- El material de las paredes del tanque no impide que las líneas de flujo atraviesen el tanque debido a una relativa alta permeabilidad. La condición que se ajusta con este comportamiento es el “contorno de impedancia”. Esta condición nos permite definir el contorno seleccionado como una resistencia de valor la permeabilidad del material. Asignamos esta condición a las paredes laterales y a la tapa y fondo del tanque.
- El ultimo contorno a definir hace referencia al aislante añadido entre las láminas del núcleo. Este material se denomina carlite y tiene unos espesores en torno a la micra de metro, por lo que no ha sido necesario modelar esta geometría físicamente (valor despreciable). Sin embargo, es necesario añadir sus efectos ya que este aislamiento magnético entre laminas del núcleo ayudara a crear un campo magnético más uniforme. Con lo expuesto, la condición que mejor se ajusta a las características del carlite es el “espacio fino de baja permeabilidad”. Seleccionamos los contornos comprendidos entre lámina y lámina del núcleo y ajustamos el espesor de esta capa. Recordar que este espesor se tendrá en cuenta a la hora de resolver el sistema, aunque no se haya modelado físicamente. Se ha definido una permeabilidad relativa del carlite de valores muy próximos a la permeabilidad del aire (0.99 de permeabilidad relativa).

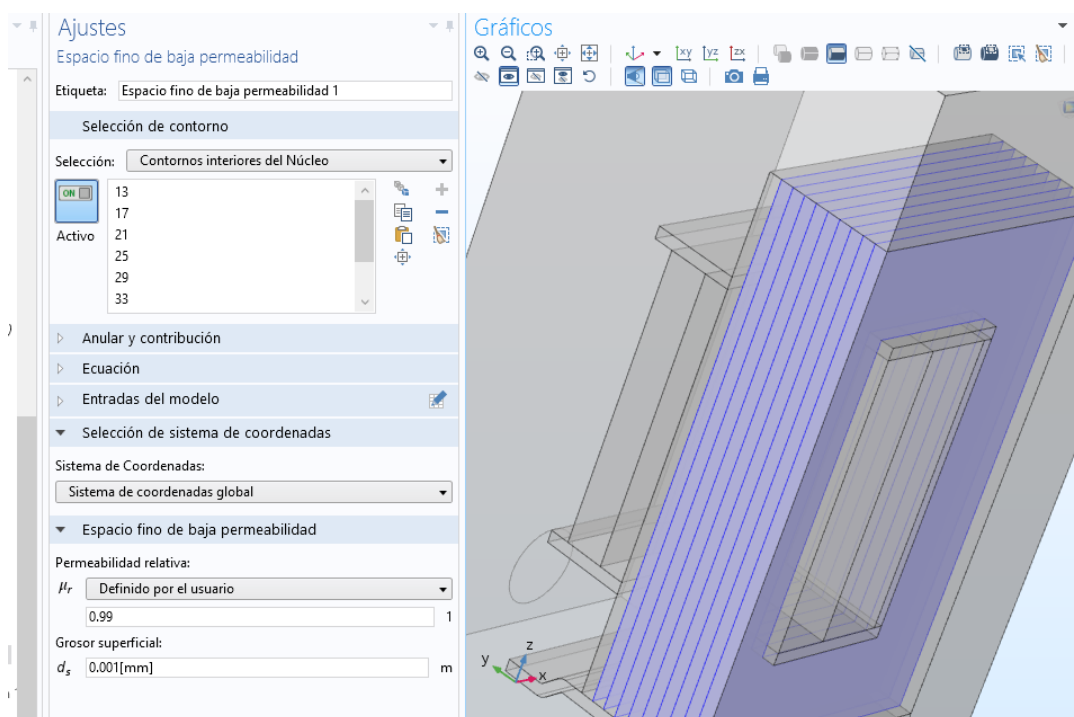


Figura 9.9. Definición del carlite en los contornos internos del núcleo.

9.6.2 Transferencia de calor en solidos

Con la transferencia de calor procederemos de manera similar a lo realizado con la física de campos magnéticos. Comenzaremos seleccionando las condiciones de contorno referentes de dominios y finalizaremos con los contornos.

El primer paso es diferenciar las zonas de intercambio de calor por conducción (sólido-sólido) de las zonas de intercambio por convección (fluido-sólido). En nuestro modelo agregaremos (de igual forma que la selección de condiciones de dominio en campos magnéticos) la condición de “sólido” a los dominios del núcleo, devanados, tapas protectoras, y patas del transformador. Al dominio de fluido se le asignará a su vez la condición de “fluido”. En estas dos condiciones no será necesario modificar ningún parámetro ya que las propiedades que actúan están definidas previamente en la selección del material.

El calor que se intercambiará en la simulación es generado por las pérdidas eléctricas y magnéticas del transformador. Estas pérdidas están explicadas en el capítulo 6. “ENSAYOS EN UN TRANSFORMADOR”. Este calor generado en el núcleo se supone es constante en régimen permanente y suponemos que se distribuye

homogéneamente en torno a la geometría de los devanados y núcleo. Para insertar estos valores definiremos tres “fuentes de calor” en condiciones de contorno de dominios y asignaremos cada una de ellas a los devanados de alta tensión, baja tensión y núcleo.

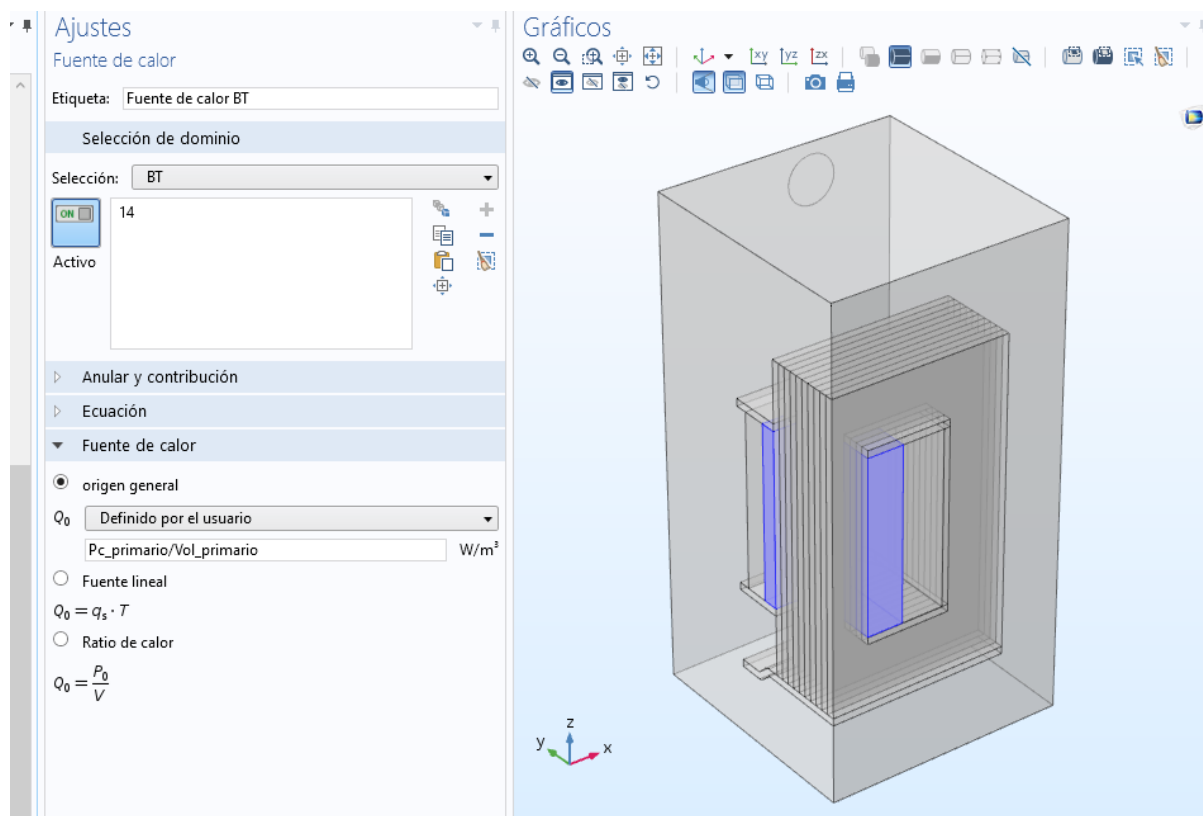


Figura 9.10. Asignación de la bobina de baja tensión a generación de calor debido a las pérdidas.

En la imagen observamos como enlazamos una de las fuentes de calor con el devanado de baja tensión y definimos el flujo de calor según los parámetros iniciales. Una vez definidos los dominios introducimos las siguientes condiciones en los contornos.

- Simetría de flujos de calor en cada una de los planos de simetría. Esto es equivalente a indicar que esos contornos poseen condición adiabática (flujo de calor nulo a través de ellas).
- El intercambio de calor entre las paredes, el fondo de la cuba y la tapa superior se realizará por el mecanismo de convección natural externa. Seleccionamos

la opción “flujo de calor” y definimos tres diferentes: las paredes verticales, la tapa y la base. Se deberá definir el fluido exterior (aire) y la relación entre el área y el perímetro de la pieza.

- Será necesario indicar mediante una condición de contorno la temperatura a la que entra el aceite del transformador por el orificio inferior. Esta temperatura se explicará más adelante el valor que se tomará.
- Indicaremos que en el orificio superior se produce una salida de flujo térmico (el aceite al acabar su ciclo de convección) de valores a determinar en la resolución.

9.6.3 Flujo laminar

A la hora de definir el comportamiento del fluido será necesario añadir las fuerzas que soportan las partículas en el ciclo que realizan desde la entrada a la salida. Estas fuerzas que experimentan son las fuerzas de flotabilidad y dependen de la gravedad y la densidad del fluido en cuestión. Será necesario introducir esta fuerza añadiendo en la pestaña de condiciones de contorno de dominios la condición de “fuerza volumétrica”. Aparecerá un campo de fuerzas a rellenar. En nuestro caso, la única fuerza presente es la descrita anteriormente cuya única componente es en el eje “z”.

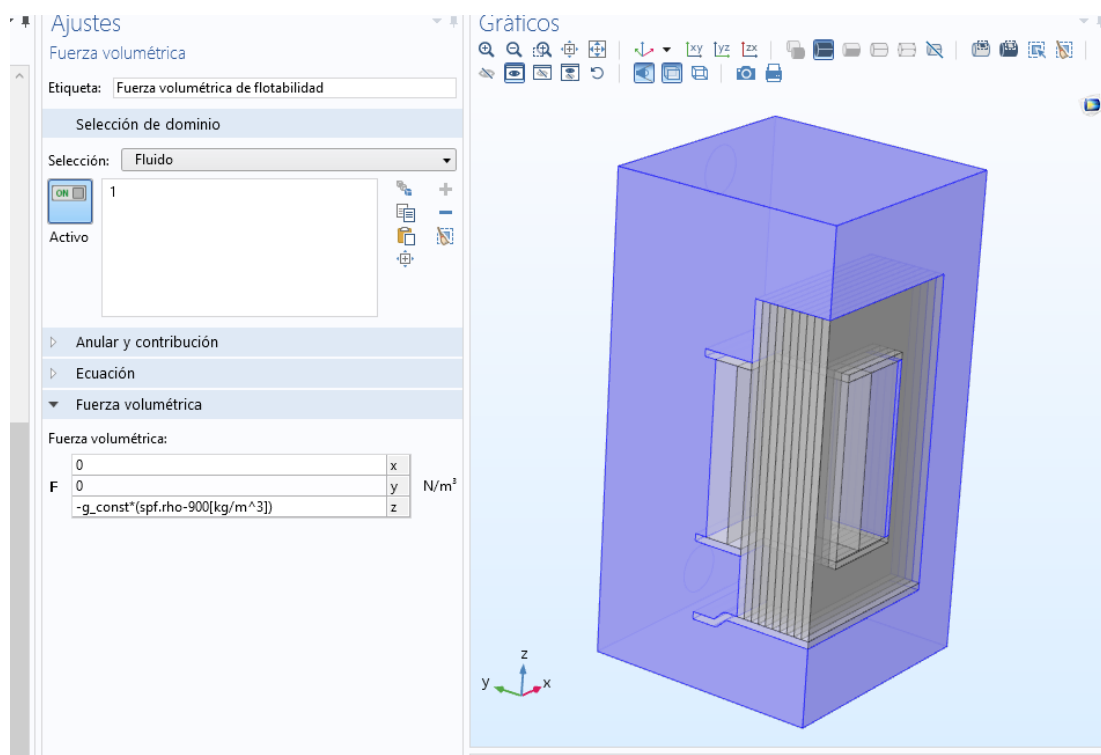


Figura 9.11. Selección de los dominios de la física de fluidos.



En lo referente a los contornos necesitaremos definir:

- Contornos de simetría en los planos de simetría del transformador. Equivale a justificar que en el plano simétrico circula un flujo de idéntico valor y sentido contrario.
- Se definirán los límites de circulación del fluido mediante el comando “pared”. Se seleccionarán los contornos que limitan con el fluido y especificará el tipo de contorno de la pared: sin deslizamiento (caso aplicado), con deslizamiento, con fugas...
- Por último, es necesario indicar en que conducto entra el aceite y en cual sale. Indicamos con la opción de “flujo entrante” y “flujo saliente” los contornos indicados para tal función (entrante el conducto inferior y saliente el superior).

9.7 ACOPLAMIENTO DE FÍSICAS

Ya hemos definido las físicas a utilizar, los parámetros iniciales, los materiales que intervienen y las condiciones de contorno que afectan a las tres físicas que aparecen. El siguiente paso es acoplar las variables que intervengan en más de una física. Es decir, ligar los cálculos de temperaturas y flujos magnéticos con los flujos másicos que circulan por el tanque.

Este acoplamiento de físicas se realizará en torno a la variable temperatura, que está presente en las tres físicas utilizadas.

Comsol nos la opción de acoplar diferentes físicas a través de la interfaz “Multifísica”. La multifísica permite acoplar físicas diferentes en torno a dominios o contornos comunes. En esta simulación serán necesarias dos multifísicas diferentes: La primera ligara la temperatura obtenida en la transmisión de calor con el comportamiento del fluido mientras que la segunda enlaza la distribución de temperaturas con los campos magnéticos generados en el bobinado.

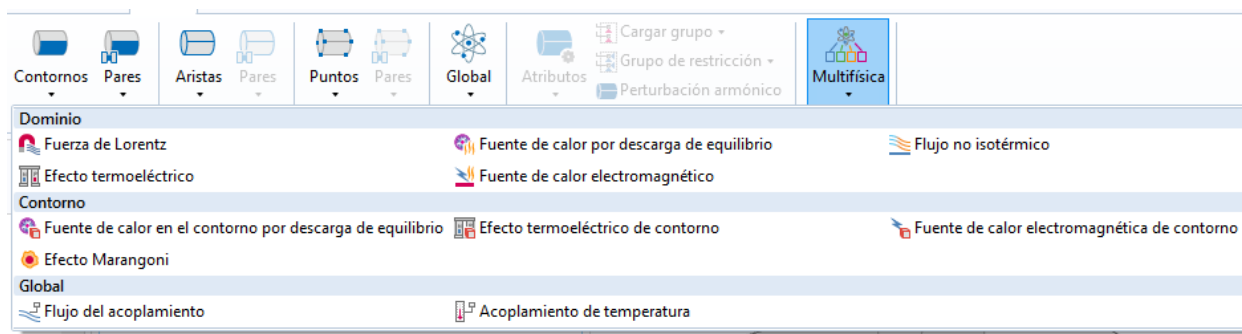


Figura 9.12. Opciones de multifísicas disponibles en Comsol.

Las dos multifísicas utilizadas son:

Flujo no isotérmico, indica que la temperatura del fluido está ligada a la calculada en el intercambio de calor. Basta con definir el dominio del fluido, los dos campos que necesitas acoplar, en este caso “Flujo laminar (spf)” y “Transferencia de calor en solidos (ht)”.

Acoplamientos de temperatura, que permiten utilizar los datos obtenidos en el campo origen, como base y punto de partida para resolver las ecuaciones del campo destino. Acoplaremos la temperatura calculada en la transferencia de calor en solidos como campo origen y la física referente a campos magnéticos como campo destino.

9.8 COLOCACION DE SONDAS DE MEDICIÓN

Antes de realizar el mallado previo a la simulación es necesario colocar una serie de sondas en puntos críticos e interesantes del sistema. Estas sondas recogerán los datos asignados a cada sonda. Al finalizar la simulación podremos acceder a estos datos recogidos además de aquellos generados por defecto al resolver las ecuaciones de las diferentes físicas.

En la resolución de esta simulación la colocación de las sondas nos permite monitorizar los mismos puntos que en el ensayo físico cuyos datos tomamos de partida. Estos datos fueron recogidos por 4 sondas repartidas en el interior del tanque de aceite y tomaron datos de la temperatura del aceite en la parte superior del tanque (a media distancia entre el núcleo y la tapa), de la parte inferior del aceite (a media distancia entre el núcleo y la base), de los devanados en un punto de contacto con el fluido y del núcleo en otro punto en contacto con el fluido.

Estas cuatro sondas serán colocadas en los puntos descritos utilizando el comando “sonda” que nos proporciona Comsol. Dentro de la función sondas, podemos colocar sondas de dominio, de contorno y puntuales. Estas últimas son las que utilizaremos para comparar la simulación con los datos obtenidos del ensayo físico.

Además de las sondas puntual, se colocarán sondas que recogerán los valores de temperatura media y máxima en los arrollamientos y el núcleo del transformador. También obtendremos datos de la temperatura media del aceite, la tapa de la cuba, la potencia disipada por el sólido (núcleo) y la velocidad promedio de salida del fluido de la cuba.

La forma de colocación de las sondas es similar a la adición de condiciones de contorno: seleccionamos el tipo de sonda que necesitamos (dominio, contorno, puntual) y asignamos esa sonda al dominio o contorno que necesitamos monitorizar.

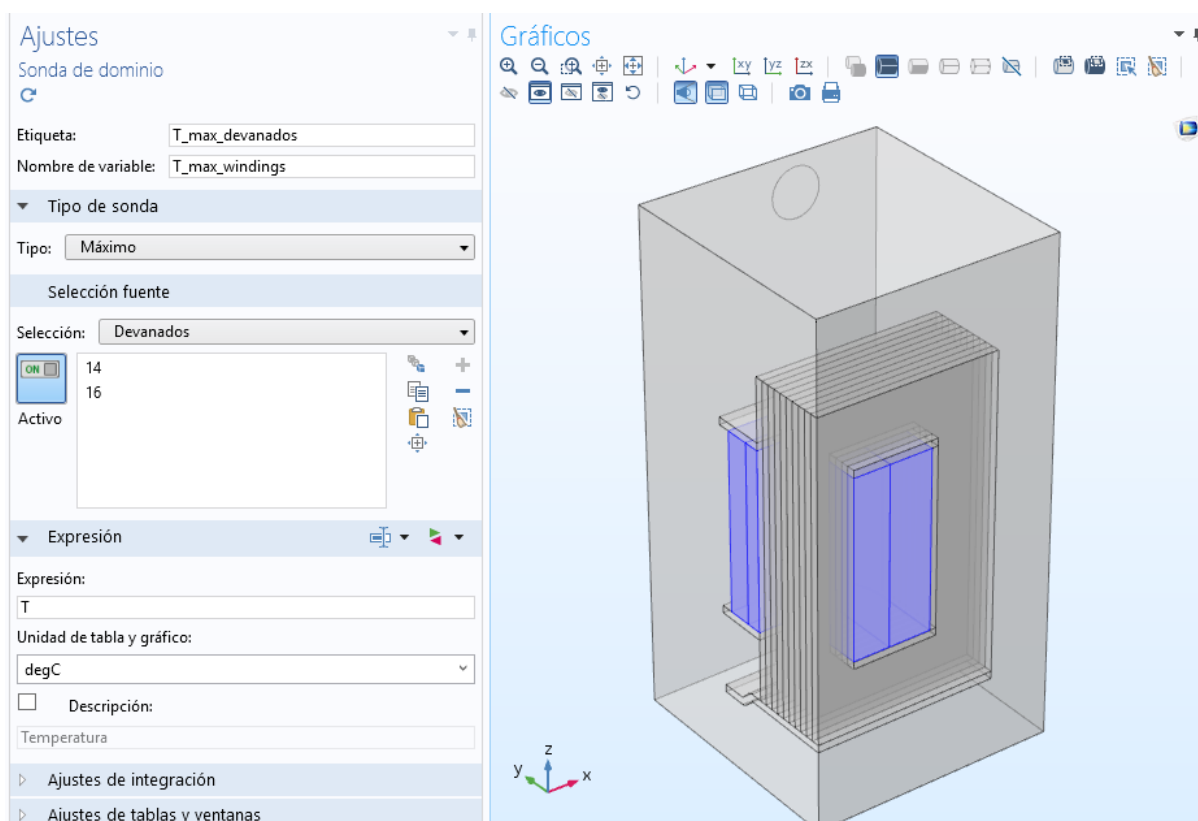


Figura 9.13. Sonda de contorno localizada en los devanados,

En la imagen observamos como definimos el dominio perteneciente a los devanados y asignamos la sonda a ese dominio. Además, indicamos el tipo de valor que debe de almacenar (máximo o promedio) y la variable que tiene que medir (temperatura, velocidad...).

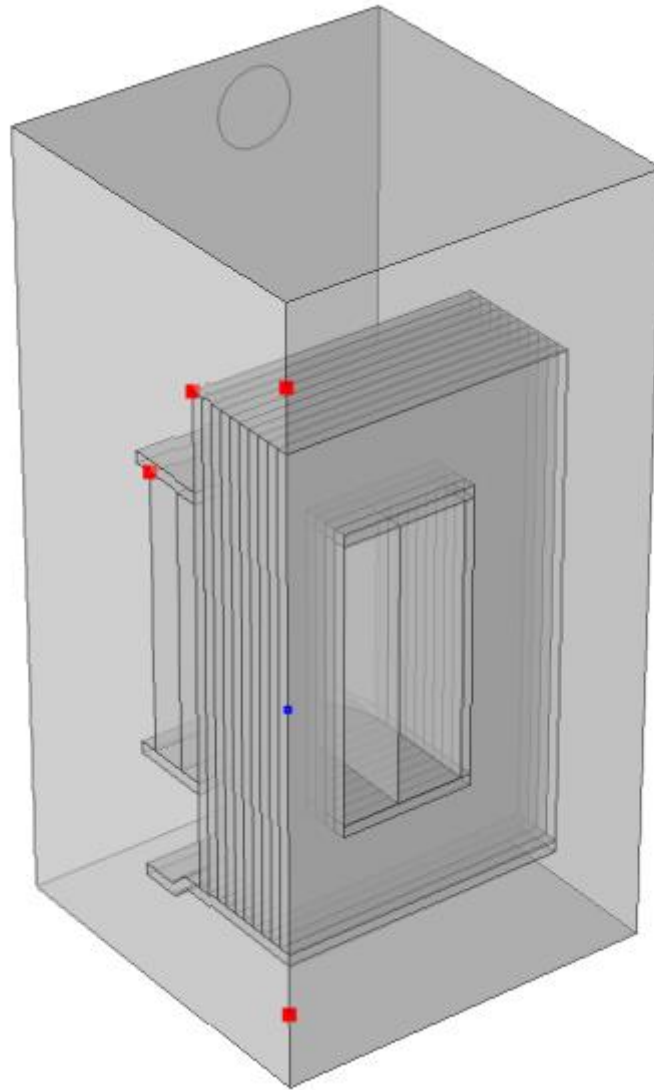


Figura 9.14. Sondas puntuales colocadas para replicar las sondas del ensayo.

9.9 MALLADO

La última etapa previa a la resolución del modelo consiste en la elaboración del mallado. El mallado consiste en dividir la geometría en pequeños elementos donde se supone que todas las propiedades en ese elemento son las mismas. De este modo pasamos de un sistema continuo a un sistema discreto.

La forma de los elementos del mallado puede ser muy variada, siendo diferente el resultado de elegir un tipo de elemento u otro. Un mayor número de elementos no tiene porqué implicar un mejor resultado si los elementos elegidos no son los más adecuados. En nuestro modelo utilizaremos elementos tetraédricos, ya que estos se adaptan mejor a elementos irregulares, además de ser la forma predefinida por Comsol.

En el caso a simular se ha utilizado un tamaño de malla bastante grosero, de calidad media, ya que uno de los factores limitantes era la memoria necesaria para realizar los cálculos (con un mallado más fino se necesita mayor cantidad de memoria y mayor tiempo de computación).

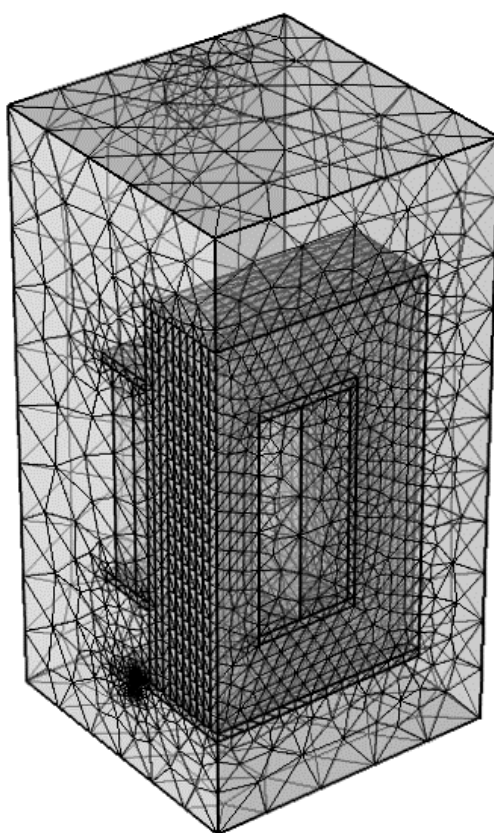


Figura 9.15. Mallado creado en la geometría del transformador.

Observamos que la malla utilizada ajusta su tamaño dependiendo de la geometría que tiene que discretizar. Nos encontramos un mallado más fino en las zonas del núcleo del transformador y un mallado más grosero en las paredes de la cuba.

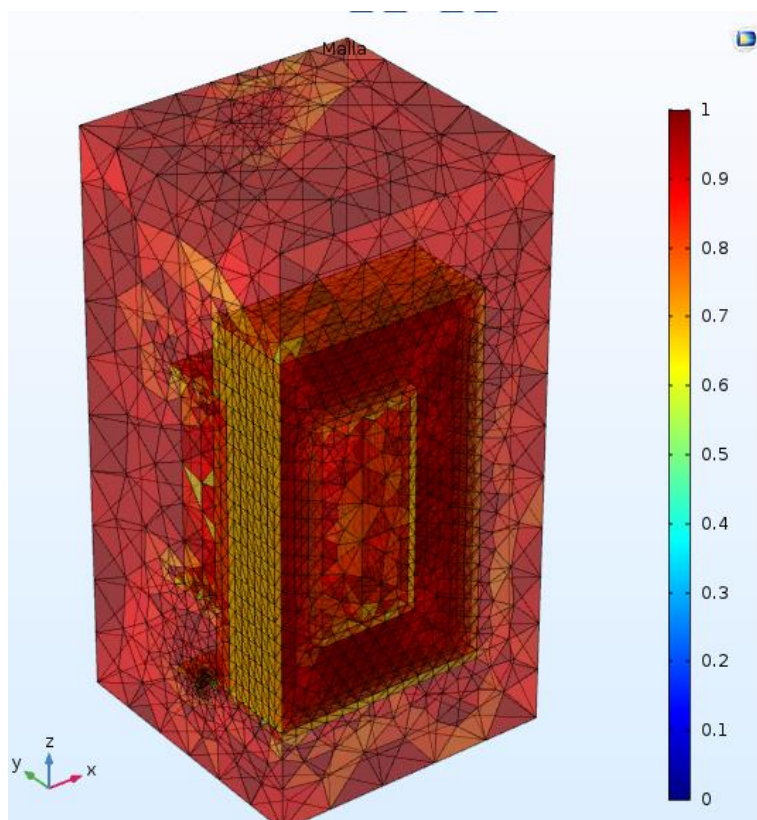


Figura 9.16. Calidad del mallado.

A la hora de valorar la calidad del mallado utilizado Comsol valora la distorsión que sufre cada elemento de malla respecto al triángulo ideal (equilátero) al adaptarse a la geometría correspondiente. Por lo tanto, un mallado fino ajustará mucho mejor y sufrirá menor distorsión de sus elementos y su calidad será mayor. La calidad del mallado utilizado se muestra a continuación.

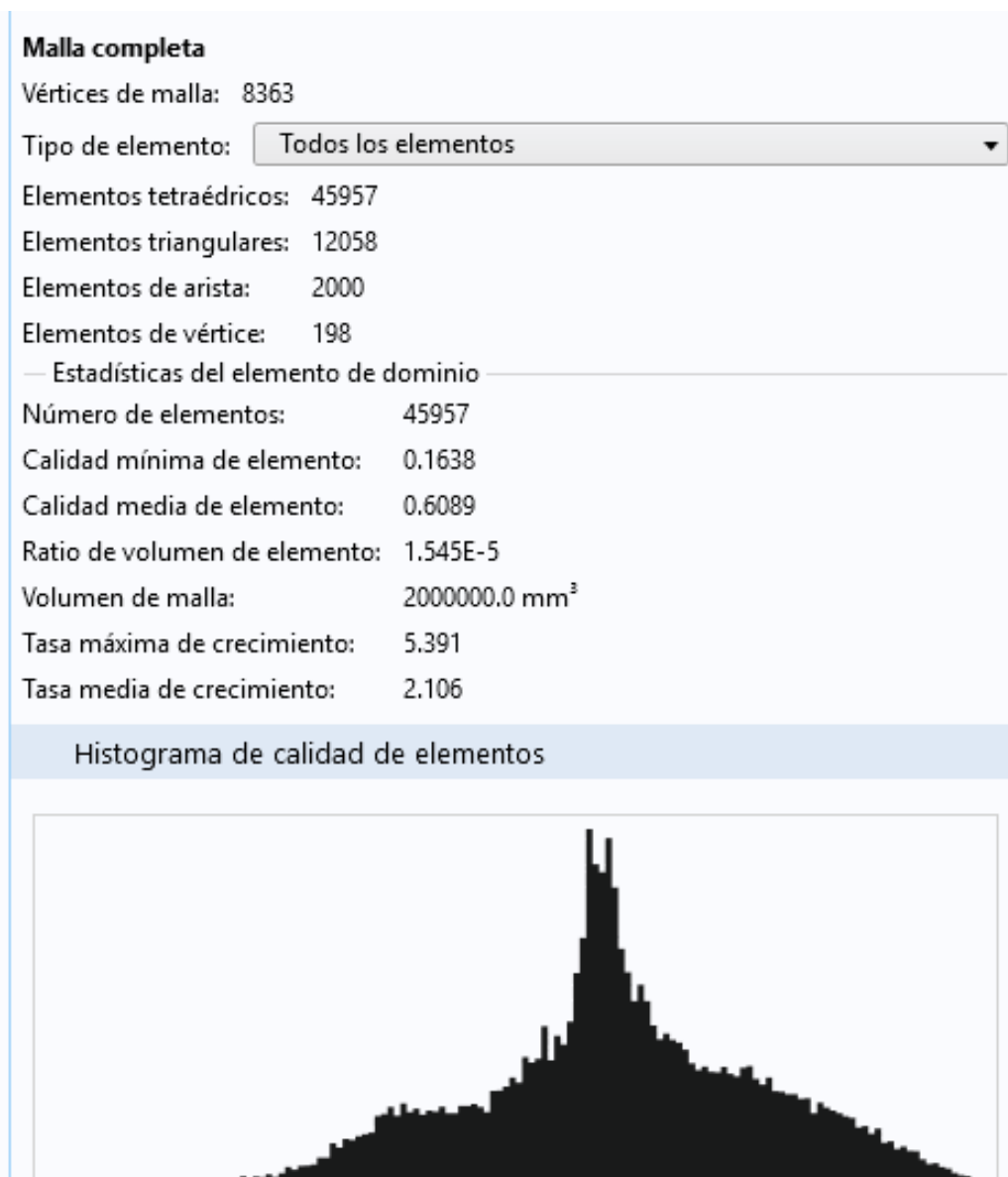


Figura 9.17. Resumen y características del mallado,

9.10 TIPO DE ESTUDIO

En este apartado se indican tanto el tipo de estudio realizado como los resolvedores utilizados para obtener los resultados finales. Para realizar el análisis se emplea un barrido paramétrico en el cual se altera la temperatura inicial de los elementos y se mantiene fija la velocidad de entrada del fluido refrigerante por el conducto inferior. Se realizará un estudio en régimen permanente del comportamiento del transformador bajo estas condiciones iniciales con un índice de carga del 150%. Las sondas colocadas en los puntos de medida correspondientes al ensayo físico deben de



ligarse al estudio paramétrico. De esta manera recibiremos valores de cada estudio realizado por el barrido paramétrico.

El comportamiento en régimen permanente se evaluará con el estudio denominado “Frecuencia-estacionario”. El estudio en frecuencia-estacionario es una variante del estudio estacionario que nos permite obtener valores de temperaturas de la geometría en el equilibrio térmico (régimen permanente) y calcular la distribución de campos magnéticos.

Ajustes

Frecuencia-Estacionario

= Calcular **↻** Actualizar solución

Etiqueta: Frecuencia-Estacionario

▼ Configuración del estudio

Frecuencia: 50[Hz]

▼ Selección de físicas y variables

☐ Modificar árbol de física y variables para paso de estudio

»	Interfaz física	Resuelve para	Discretización
	Campos magnéticos (mf)	☒	Ajustes de la física ▼
	Transferencia de calor en sólidos (...)	☒	Ajustes de la física ▼
	Flujo laminar (spf)	☒	Ajustes de la física ▼

»	Multifísica	Resuelve para
	Fuente de calor electromagnético devanados (emh1)	☐
	Fuente de calor electromagnética de contorno de devanado (be...)	☐
	Acoplamiento de temperatura 1 (tc1)	☒
	Flujo no isotérmico 1 (nitf1)	☒
	Fuente de calor electromagnético núcleo (emh2)	☐
	Fuente de calor electromagnética de contorno del núcleo (bemh...)	☐

▷ Valores de variables dependiente

▷ Selección de mallas

▷ Extensiones del estudio

Figura 9.18. Características del estudio frecuencia-estacionario.



Para la correcta resolución de las ecuaciones es necesario introducir dos pasos anteriores antes de aplicar este tipo de estudio. Es necesario realizar una resolución previa de cada devanado. Este estudio se denomina “Análisis de la geometría de la bobina” y calcula los flujos e intensidades que circulan en la bobina. Por definición es un cálculo auxiliar para trabajar conjuntamente con el estudio en el dominio de las frecuencias.

Estos dos estudios mostrados trabajarán de forma conjunta con el barrido paramétrico aplicado a las temperaturas iniciales de toda la geometría de manera que se resolverán las ecuaciones para cada valor de temperatura inicial introducido en el barrido paramétrico.

Las temperaturas iniciales de la geometría utilizadas son las siguientes:

- 313.15 K: 40 °C
- 318.15 K: 45 °C
- 323.15 K: 50 °C
- 328.15 K: 55 °C

Con estos datos ya estaría definido todo lo necesario para resolver los cálculos necesarios en nuestra geometría. En un primer paso se compilarán las ecuaciones de la geometría de cada bobinado seguido del estudio frecuencia-estacionario.



10. RESULTADOS

En esta capítulo se mostrarán las distribuciones obtenidas por medio de la simulación en Comsol Multiphysics. Se analizarán los valores obtenidos y se compararán con los datos de partida del ensayo físico del transformador. En un último apartado se considerarán posible mejoras y aproximaciones a introducir en el modelo de simulación con el fin de obtener resultados más precisos si fuera necesario.

10.1 DISTRIBUCION DEL CAMPO MAGNETICO

En la distribución de las líneas de campo se observa como la gran mayoría de ellas circulan por el núcleo de material ferromagnético. Parte de las líneas fluyen fuera del núcleo hasta las paredes del tanque que contiene el aceite.

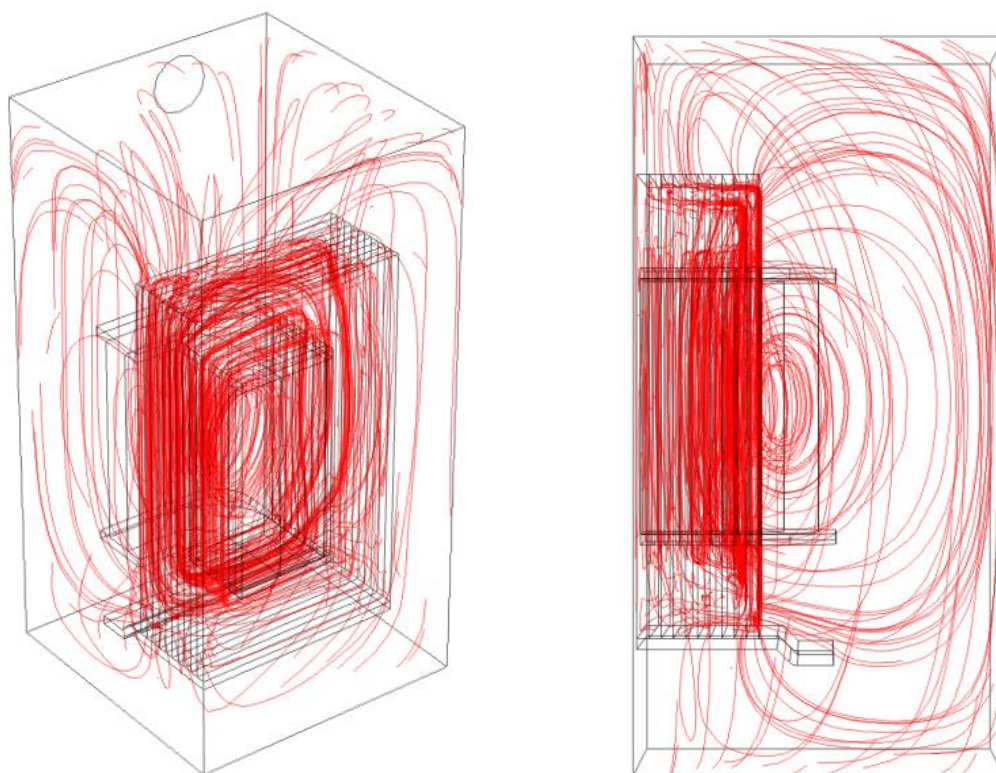


Figura 10.1. Distribución del campo magnético.

Se puede observar el efecto produce el carlite utilizado como aislante entre las chapas del núcleo. Estas laminas consiguen una distribución más uniforme del flujo que

circula por el núcleo, siendo más importante conforme nos acercamos a los bordes. Esto es debido a la presencia de los arrollamientos, si hubiéramos considerado el núcleo como una única lamina gruesa y maciza nos hubiéramos encontrado con que la gran mayoría de líneas de flujo se encontrarán en los bordes del núcleo.

Un aspecto importante a considerar sería la posibilidad de introducir tantas láminas de acero como en el transformador real (seis veces más de láminas) pero esta modificación precisaría de un mallado mucho más fino y por lo tanto tiempos de computación y resolución mucho mayores.

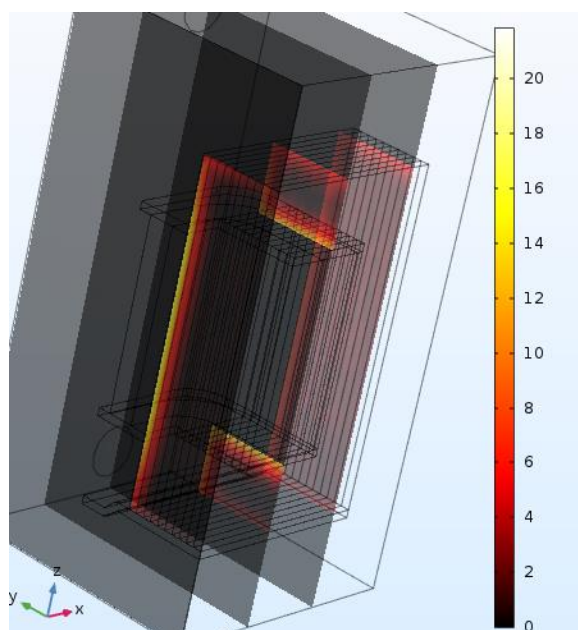


Figura 10.2. Distribución de flujo magnético en el núcleo.

En la imagen se vuelve a comprobar como el campo magnético (medido en Teslas) aumenta conforma nos aproximamos a los devanados de cobre.

10.2 DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS

La distribución de temperaturas en régimen permanente y con un índice carga del 150% muestra valores en torno a los 80 °C en el núcleo y los devanados. Esta

temperatura es prácticamente homogénea en estos materiales debido a su elevada conductividad térmica.

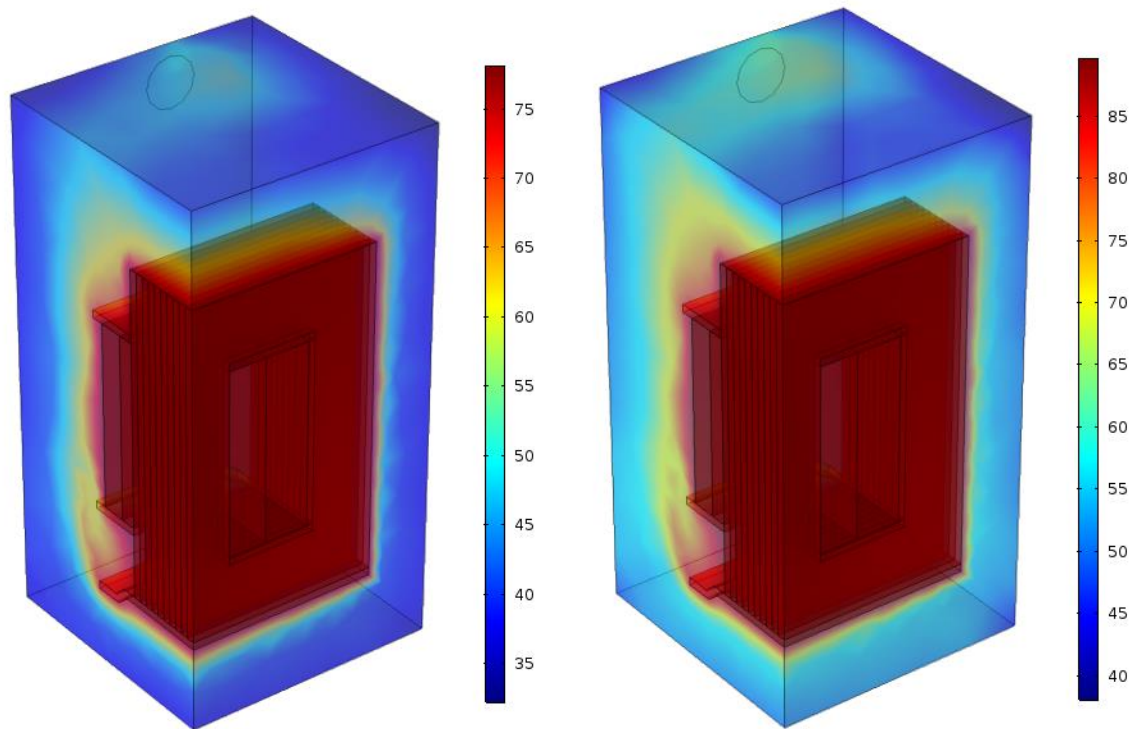


Figura 10.3.a) Distribución de T. con $T_{inicial}: 40^{\circ}\text{C}$. B) Distribución de T. con $T_{inicial}: 55^{\circ}\text{C}$

Se observa claramente como el fluido se calienta a medida que entra en contacto con el soporte del transformador y los devanados.

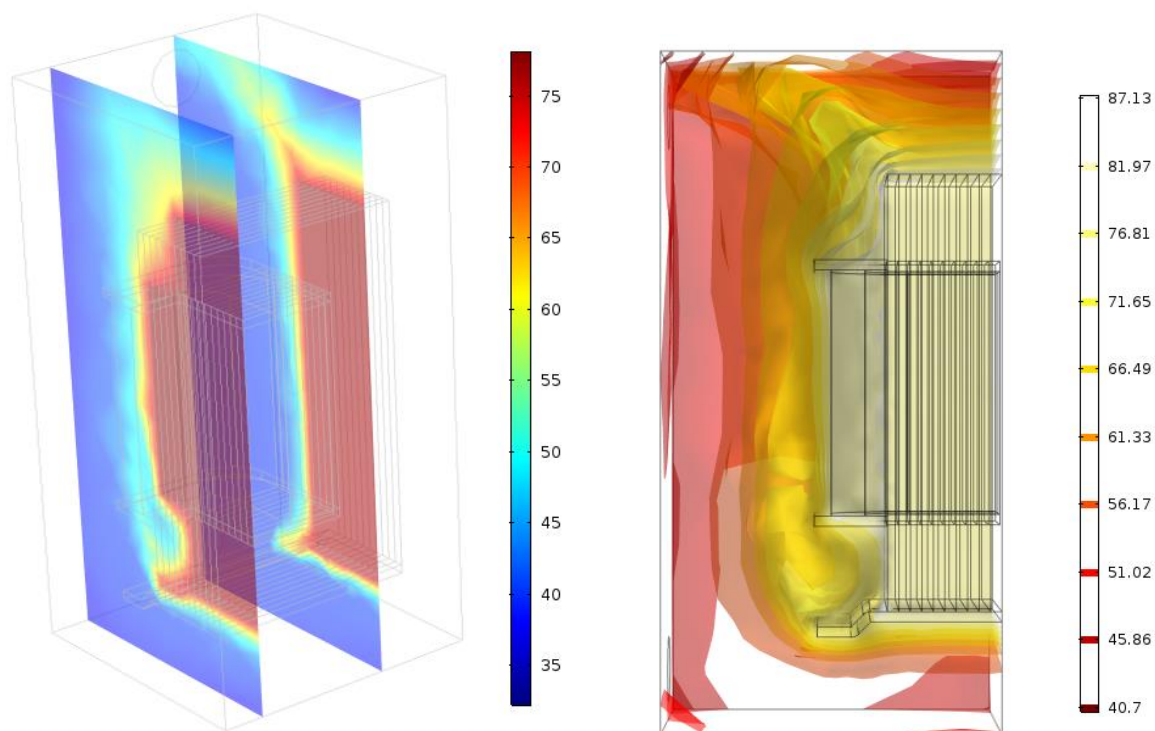


Figura 10.4. a) Distribución de temperaturas en planos de corte. b) Contornos isotérmicos.

Si observamos los datos obtenidos en función de los contornos isotérmicos que alcanza el fluido a su paso por el tanque vemos como las isosuperficies marcan la tendencia del flujo a circular en torno a las paredes del transformador, ascendiendo a medida que absorbe calor y disminuye su densidad (aumenta el volumen).

10.3 CICLOS DE CONVECCION

En cuanto al comportamiento del fluido, se muestra una captura del movimiento del aceite a lo largo del tanque. Las líneas mostradas corresponden a los diferentes desplazamientos que realiza el aceite desde su entrada por el conducto inferior, a su salida por el superior.

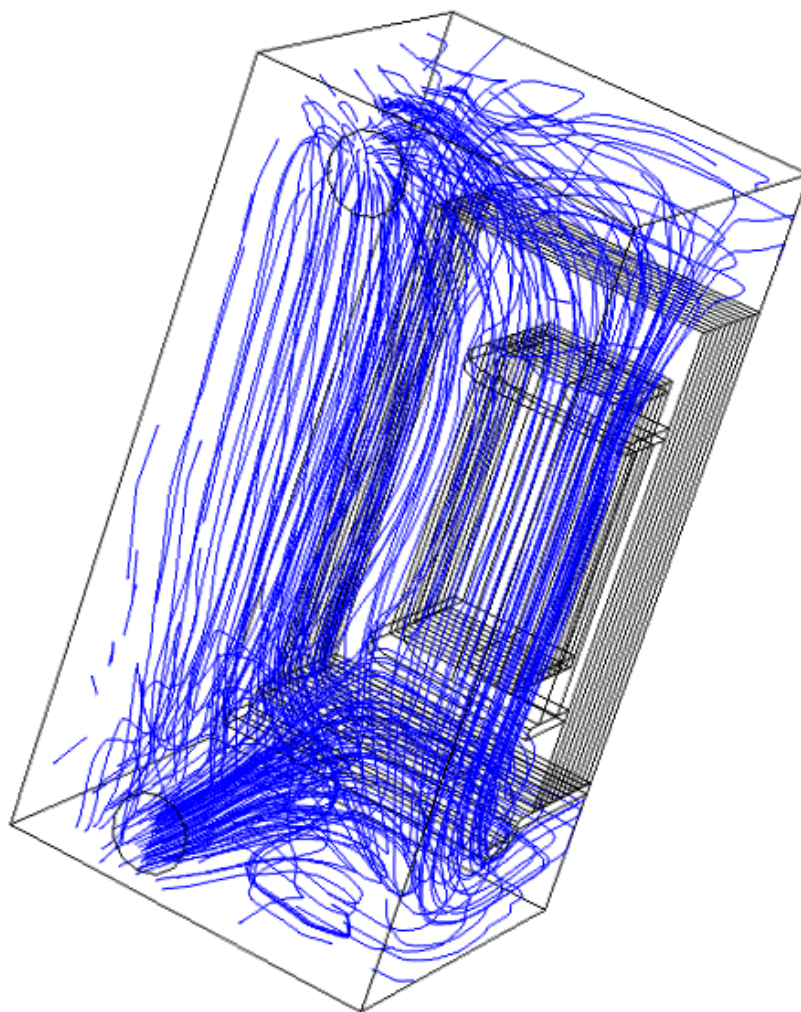


Figura 10.5. Líneas de flujo del aceite a su paso por el transformador.

El comportamiento del fluido es muy similar para las cuatro temperaturas de entrada simuladas. El fluido se divide en dos caminos principales. El primer flujo choca con el transformador absorbiendo parte del calor generado por este y asciende describiendo una espiral. Esto ocurre de esta manera debido a que el fluido es incapaz de progresar hacia la zona central del transformador ya que es la zona intermedia a dos flujos iguales y de sentidos contrarios (simetría aplicada).

El segundo flujo se desplaza hacia la zona del borde del tanque, refrigerando en menor medida y ascendiendo a medida que aumenta su temperatura.

En cuanto a velocidades, no hay grandes variaciones en el tanque salvo en las zonas próximas a los orificios de entrada y salida. A continuación, se muestra un corte en la sección media de los conductos.

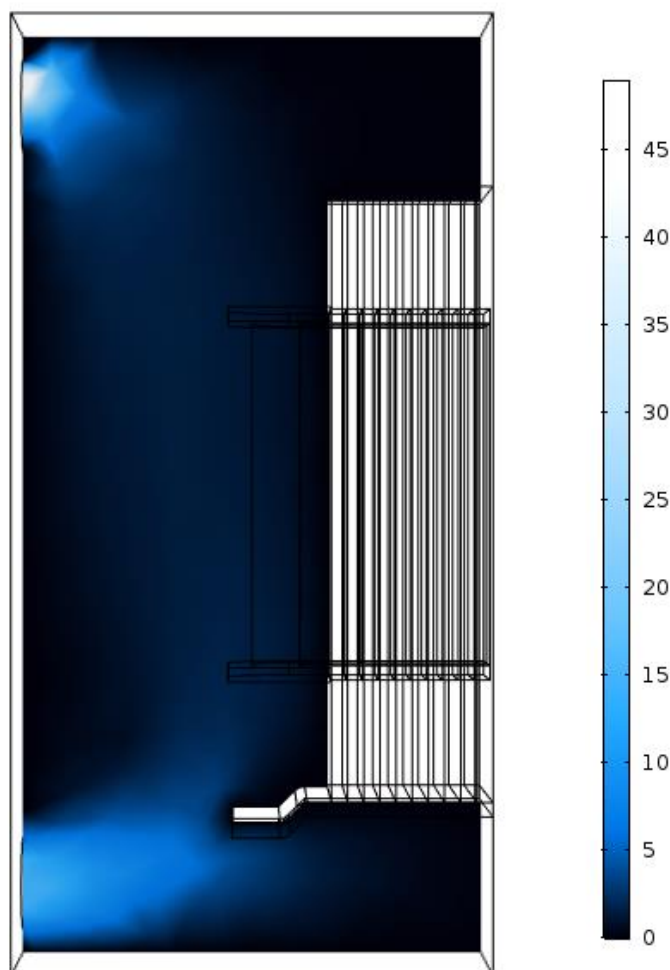


Figura 10.6. Corte el plano medio de la entrada y salida del fluido.

Las zonas con velocidades más altas son ambos conductos, siendo la huella de entrada más pronunciada en la entrada de fluido, pero dándose mayores velocidades en la salida del fluido.

10.4 VALORES RECOGIDOS POR LAS SONDAS

En este apartado analizaremos y compararemos los valores obtenidos con las sondas reales (en el ensayo físico) con los datos almacenados en la simulación. Dividiremos los resultados en dos grupos: el primero haciendo referencia las temperaturas medias del fluido, devanados y demás componentes, y el segundo comparando las sondas colocadas en los mismos puntos que las colocadas en el ensayo de laboratorio.

10.4.1 Sonatas de valores máximos y promedios

Los resultados de estas sondas en el barrido paramétrico realizado: Velocidad de entrada 10 mm/s.

*Esta sonda marca la temperatura media de todo el aceite en contacto con la tapa del tanque.

Observamos como las temperaturas de equilibrio aumentan al aumentar la temperatura inicial de la simulación. La potencia disipada permanece constante ya que la geometría y las propiedades de los materiales no se modifican.

T_in (degC)	V. salida aceite (mm/s)	T. media Aceite	T. media Devanados	T. media tapa*
40	20.171	44.640	78.095	42.506
45	20.247	49.272	81.879	45.825
50	20.317	53.906	85.703	49.108
55	20.374	58.548	89.625	52.381

T_in (degC)	T. Max. Devanados	T. media Núcleo	T. Max. Núcleo	Potencia total disipada (W)
40	78.176	77.328	78.149	20.945
45	81.960	81.097	81.932	20.945
50	85.784	84.905	85.755	20.945
55	89.705	88.812	89.676	20.945

10.4.2 Sonatas pertenecientes al ensayo físico.

T_in (degC)	T. Superior	T. Inferior	T. Devanados	T. Núcleo
40	58.889	45.857	78.111	77.840
45	62.611	49.510	81.896	81.622
50	66.325	53.301	85.721	85.444
55	70.084	57.299	89.644	89.363



Estas sondas monitorizan la temperatura del fluido en estos puntos concretos. Compararemos estos resultados con los obtenidos en el ensayo de laboratorio.

DATOS EXPERIMENTALES			
T. Superior	T. Inferior	T. Devanados	T. Núcleo
68,10	58,30	70,50	71,50

En la tabla se muestran los datos obtenidos con las sondas en el barrido paramétrico. Debajo del valor de temperatura se muestra el porcentaje de error en comparación con los datos experimentales.

DATOS DE LA SIMULACION					
v _{in} (mm/s)	T _{in} (°C)	T. Superior	T. Inferior	T. Devanados	T. Núcleo
15	40	58,9	45,9	78,1	77,8
		13,5%	21,3%	-10,8%	-8,8%
15	45	62,6	49,5	81,9	81,6
		8,1%	15,1%	-16,2%	-14,1%
15	50	66,6	53,3	85,7	85,4
		2,2%	8,6%	-21,6%	-19,4%
15	55	70,1	57,3	89,6	89,3
		-2,9%	1,7%	-27,1%	-24,9%

Se han considerado aceptables los datos de las sondas con errores por debajo del 5% del valor experimental. Observamos que con temperaturas iniciales mayores logramos ajustarnos bastante a los valores de temperatura del fluido pero las temperaturas en el cobre y el hierro son mucho mayores de lo que debieran ser.

En el apartado de conclusiones se sintetizarán los resultados satisfactorios de la simulación y se propondrán posibles mejoras para ajustar mejor los resultados a los datos experimentales.



11 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

11.1 CONCLUSIONES

- Estudio satisfactorio del comportamiento de un transformador monofásico acoplando con éxito tres físicas diferentes a la hora de realizar la simulación.
- Resultados bastantes aproximados del campo magnético en torno al núcleo del transformador.
- Se ha conseguido aproximar satisfactoriamente dos de las cuatro sondas del ensayo físico. Será necesario introducir cambios para ajustar mejor los valores de las sondas.
- Ciclos de convección internos del aceite con similitudes respecto a los artículos de partida.

11.2 MEJORAS APLICABLES

- Es necesario aproximar mejor el modelo de simulación al real para obtener resultados mas fiables.
- Aplicando un mallado con calidad superior permitirá obtener resultados mas fiables.
- Aplicando un mallado mas fino permitirá aproximar mejor la geometria al caso real del transformador.
- Realizar barridos parametricos multiples variando la velocidad de entrada del aceite y manteniendo constante la velocidad de entrada al tanque.
- Con el equipo de computación adecuado, realizar simulaciones de la geometría completa del transformador para observar posibles anomalías.

12.BIBLIOGRAFIA

- Lucian Pîslaru–Dănescu, Alexandru M. Morega, Mihaela Morega. (2013). Prototyping a Ferrofluid-Cooled Transformer.
- Jaykumar Patel, Kinnari Parekh, R.V. Upadhyay (2016). Prevention of hot spot temperature in a distribution transformer using magnetic fluid as a coolant.
- Jesús Fraile Mora. (2003). *Máquinas eléctricas* (5ª ed.). Madrid: Mc Graw Hill.
- Pedro Fernández Díez. (1986). *Mecánica de fluidos*. Santander: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial.
- Fernández, A. Ortiz, F. Delgado, C. Renedo, S. Pérez. (2013). Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers.(98), 58-69.
- Agustín Santisteban Díaz (2015). Estudio fluido-térmico de aceites biodegradables en un transformador de potencia.
- Miguel Ángel Rodríguez Pozueta. (2014). Materiales y circuitos magnéticos.

DOCUMENTO N°2. ANEXOS

Índice documento nº2:

ANEXO N°1.

Prototyping a Ferrofluid-Cooled Transformer. Lucian Pîslaru-Dănescu, Alexandru M. Morega, Mihaela Morega. (2013).

ANEXO N°2.

Prevention of hot spot temperature in a distribution transformer using magnetic fluid as a coolant. Jaykumar Patel, Kinnari Parekh, R.V. Upadhyay (2016).

Prototyping a Ferrofluid-Cooled Transformer

Lucian Pîslaru-Dănescu, Alexandru M. Morega, *Senior Member, IEEE*, Mihaela Morega, *Member, IEEE*, Victor Stoica, Oana Maria Marinică, Florica Nourăș, Nicolae Păduraru, István Borbáth, and Tünde Borbáth

Abstract—This paper presents the work conducted on prototyping a step-up/step-down, single-phased, low-power, and medium-voltage electrical transformer cooled by a fluid with colloidal magnetic nanoparticles. The magnetic and fluid dynamic properties and the heat capacities of the ferrofluid (magnetic nanofluid) and that of the regular coolant (UTR-40 transformer oil) were experimentally determined and comparatively evaluated. Mathematical models for the electromagnetic field and the heat transfer were defined and numerically solved to assess the capacity of the transformer to sustain the working conditions. The simulation results were utilized to improve the design of a prototype, where the UTR-40 regular coolant is replaced by ferrofluid. The numerical simulation results and the experiments evidence the superior performance of the prototype.

Index Terms—Electromagnetic analysis, magnetic liquids, numerical simulation, power transformers prototype, thermal analysis.

I. INTRODUCTION

RECENTLY, a growing interest has been noticed in the usage of high-power devices for electrical engineering, particularly in transformers with colloidal ferrofluids [1], which adds to their important but more classical industrial applications (e.g., sensors, sealing systems, and different types of contacts [2]). The ferrofluids possess heat transfer and dielectric properties that are superior compared to their classical counterparts (e.g., transformer oils) and may be utilized in improving the heat flow within the aggregate active part, thus contributing to increasing their withstanding capacity to faults such as electromagnetic impulses. The ferrofluids may be driven by external magnetic fields, and the magnetization body forces

within the ferrofluids may be controlled by adequately adjusting the incident magnetic field [3], [4].

This paper is concerned with the utilization of a magnetic nanofluid type of ferrofluid as coolant and insulating medium in a prototype electrical transformer. The magnetic fluid (MF) is a colloidal dispersion of magnetite nanoparticles in transformer oil UTR-40, with oleic acid as surfactant. The idea of using a magnetic nanofluid based on transformer oil (NFM/UTR) as an insulating media, with same or better dielectric properties and better thermal conductivity (in an external magnetic field) against pure oil [5], [6], contributes to the solution of these problems, thus decreasing the construction expenses and the operation costs of transformers.

The expected results resided in the preparation of the NFM/UTR magnetic nanofluid based on transformer oil with satisfactory dielectric and magnetic properties in prototyping a small power transformer filled with NFM/UTR with better operational condition against its counterpart filled with pure transformer oil. The monodomain magnetic nanoparticles (1–15 nm) are ultrastably dispersed in the nonpolar basis environment [4], [5]. Each magnetic nanoparticle is coated with a monomolecular layer of chemisorbed organic stabilizer, usually oleic acid.

Ferrofluids also increase the transformer's capacity to resist overvoltages and exhibit better resistance to degradation in time because of humidity in comparison with classic oils [6]. High-efficiency and smaller size transformers may thus be built, with longer lifetime and higher loading capacity. These beneficial effects of the magnetic nanofluids are now exploited by the realization of the prototype transformer "TMOF2-36-40." Other detailed information is available by numerical simulation (e.g., the heat transfer in the spaces between the windings and between the windings and the core).

II. MAGNETIC AND HEAT TRANSFER PROPERTIES OF THE FERROFLUID

A. Magnetic Properties

The magnetization curve (Fig. 1) of the UTR-40-based MF was drawn by using a vibrating sample magnetometer (VSM 880, DMS/ADE Technologies, USA). The experiments were conducted at room temperature ($\sim 25^\circ\text{C}$). The magnetization curve provides information on the magnetic saturation ($M_s \cong 3.979\text{ kA/m}$). A more accurate value ($M_s \cong 4.130\text{ kA/m}$) may be obtained from the linear region of the magnetization curve for high values of magnetic field using the magnetization vs. magnetic field strength representation $M = M(1/H)$. The initial susceptibility of the sample was determined out of the slope of the linear region of the magnetization curve

Manuscript received November 1, 2011; revised March 26, 2012 and August 7, 2012; accepted August 13, 2012. Date of publication March 14, 2013; date of current version May 15, 2013. Paper 2011-EMC-581.R2, presented at the 2010 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brasov, Romania, May 20–22, and approved for publication in the IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS by the Electric Machines Committee of the IEEE Industry Applications Society. This work was supported by the National Research Authority under Grant 21-043/2007.

L. Pîslaru-Dănescu and V. Stoica are with the National Institute for Research and Development of Electrical Engineering (INC DIE ICPE-CA), 030138 Bucharest, Romania (e-mail: paslaru@icpe-ca.ro; vstoica@icpe-ca.ro).

A. M. Morega and M. Morega are with the University Politehnica of Bucharest, 060042 Bucharest, Romania (e-mail: amm@iem.pub.ro; mihaela@iem.pub.ro).

O. M. Marinică is with the Romanian Academy—Timisoara Division, 300223 Timisoara, Romania (e-mail: marinica.oana@gmail.com).

F. Nourăș and N. Păduraru are with the Research, Development and Testing National Institute for Electrical Engineering, 200746 Craiova, Romania (e-mail: micro@icmet.ro).

I. Borbáth and T. Borbáth are with Roseal Corporation S.A., 535600 Odorheiu Secuiesc, Romania (e-mail: office@roseal.topnet.ro; borbath.tunde@gmail.com).

Digital Object Identifier 10.1109/TIA.2013.2252872

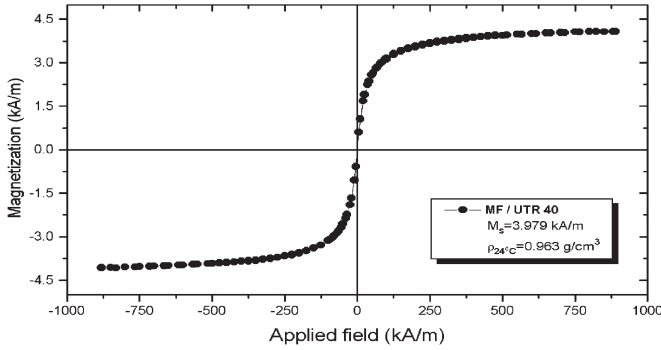


Fig. 1. Magnetization curve for the UTR-40-based MF. The curve of the first magnetization is practically undistinguishable.

($\chi_I = 0.08$) for lower values of magnetic field. Fig. 1 presents one of the fundamental properties of MFs, namely, the lack of hysteresis—a property specific to superparamagnetic materials.

Considering these experimental results and conveniently modeling the magnetization of the magnetic nanofluid in the numeric simulations reported later, the magnetization is approximated by the analytic formula

$$M = \alpha \arctan(\beta H) \quad (1)$$

where α and β are empiric constants [8]–[10]. However, under nominal working conditions for the transformer, the coercive magnetic field strength H_c (or the remanent magnetic flux density B_r) in the magnetic nanofluid is negligibly small, and its constitutive law is then

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2)$$

where μ_0 is the magnetic permeability of air (vacuum) and $\mathbf{B}$ is the magnetic flux density.

B. Heat Transfer Properties

The heat capacity of the MF sample was measured using a laboratory calorimeter, equipped with a data acquisition system (PCMCIA Card DAQ NI 6062E and signal conditioner NI SC 2345). The calorimeter constant was determined using distilled water. Several tests of heating and cooling to a prescribed temperature (40 to 80 °C) for both the carrier (transformer oil) and the MF sample were performed. The heat capacity of the sample was determined from the heat flux balance between the heater and the fluid inside the calorimeter.

The measured densities of the transformer oil and of the MF sample at 24 °C were 866 and 963 kg/m³, respectively. The specific heat capacities of the two fluids are compared in Fig. 2, where the error bars are within 3% error limit. These results show that the heat capacity of the MF is lower than that of the pure transformer oil. It increases with temperature, in agreement with the theoretical prediction of the mixture heat capacity equation [3].

C. Modeling the Experimental Apparatus

We first modeled an experimental apparatus previously used to characterize the MF dynamics and heat transfer properties

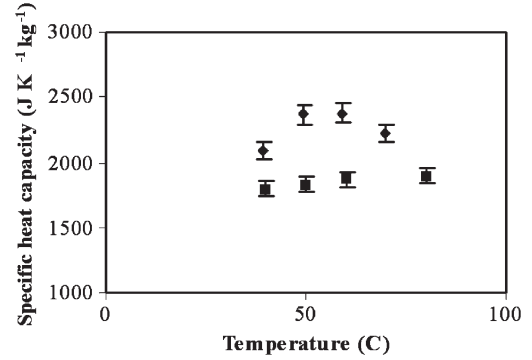


Fig. 2. Temperature dependence of the heat capacity for the UTR-40 (♦) and for the UTR-40-based magnetic nanofluid (■) samples.

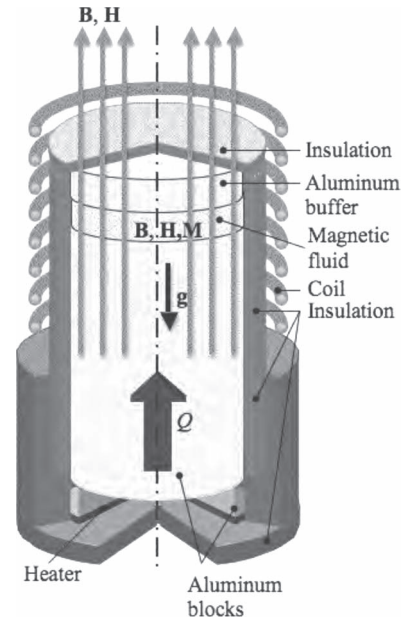


Fig. 3. Sketch of the simplified model for the experimental apparatus [8].

of the magnetic nanofluid. Fig. 3 shows a sketch that outlines the main features of the apparatus. Here, $\mathbf{B}$ (in tesla) is the magnetic flux density, $\mathbf{H}$ (in amperes per meter) is the magnetic field strength, $\mathbf{M}$ (in amperes per meter) is the magnetization, and Q (in joules) is the heat. This basic experimental arrangement was numerically simulated to validate the finite-element method (FEM) implementation of the mathematical model, later used for the heat transfer analysis. The mathematical model, simulation results, details, and conclusion are given in [8].

III. PROTOTYPE OF THE POWER TRANSFORMER

The single-phased, small-power (40 kVA), medium-voltage (36/0.4 kV), and step-up or step-down transformer built and analyzed in our study (TMOF2-36-40) is internally cooled by the natural circulation of either the transformer oil or the magnetic nanofluid; the exterior cooling is provided through the natural circulation of air.

The design of the transformer prototype (Fig. 4) relies on constructive solutions that comply with the aimed purpose. TMOF2-36-40 presents the advantage of reduced volume and

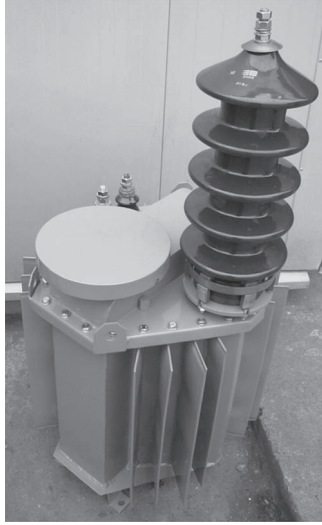


Fig. 4. Prototype transformer TMOF2-36-40.

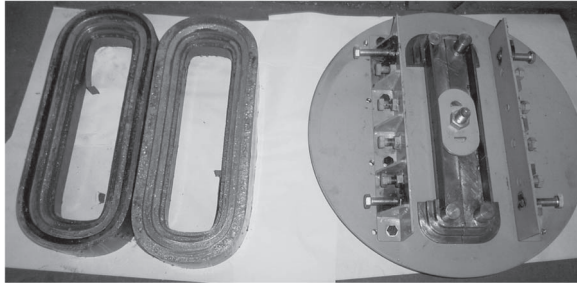


Fig. 5. Magnetic cores and the core-rolling device.

weight in comparison with oil-cooled power transformers that have the same rated voltage and rated power, due to the intensification of the cooling effect in the presence of the magnetic nanofluid. Due to the design of the magnetic circuit (wound magnetic core) and of the metallic frame (tank, bottom, and lid), the transformer is built with a lower consumption of the main materials: copper, magnetic steel, and coolant.

The active parts of TMOF2-36-40 (magnetic core and high- and low-voltage windings) are contained in a finned metallic tank made of two parts, bound by a soft solder that is capable of elastic deformation to adjust to the thermally induced variation of the cooling fluid volume. The magnetic core is made of two identical, wound, and rectangular parts (Fig. 5).

The active parts are fixed upright on a metallic lid (Fig. 6), the most convenient configuration for the enhancement of the natural heat transfer by the magnetic nanofluid in the presence of the magnetic field.

The HV and LV connections to the terminals are led outside the tank lid through standardized insulated crossings.

IV. MATHEMATICAL AND NUMERICAL MODELING

The mathematical model that describes the electromagnetic field and the natural convection heat transfer processes within the transformer is made of Maxwell's equations (electromagnetic field), the energy equation (for heat transfer), and the momentum equation balance and mass conservation (for

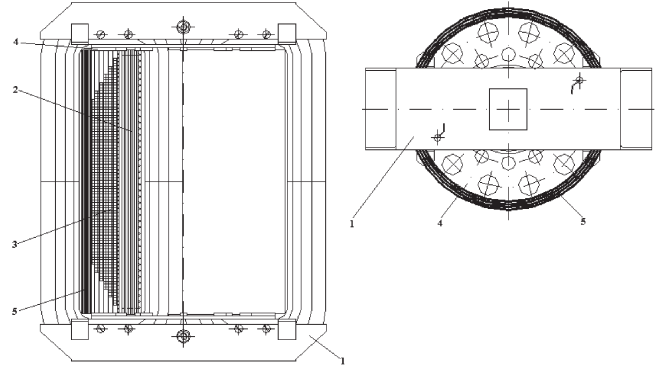


Fig. 6. Ensemble of active parts. 1—yoke. 2—LV winding. 3—HV winding. 4—top lid. 5—case.

TABLE I
PHYSICAL QUANTITIES USED IN THE MATHEMATICAL MODELS

Symbol	Quantity	Symbol	Quantity
A	magnetic vector potential [V·s/m]	μ_0	magnetic permeability of free space $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m
J^e	external current density [A/m ²]	μ_r	relative permeability of a material
V	electric potential [V]	μ	magnetic permeability [H/m]
E	electric field strength [V/m]	σ	electric conductivity [S/m]
B	magnetic flux density [T]	ϵ	electric permittivity [F/m]
H	magnetic field strength [A/m]	ω	angular frequency [Hz]
M	magnetization [A/m]	ρ	mass density [kg/m ³]
u	velocity [m/s ²]	c_p	specific heat [J/kg·K]
T	temperature [K]	k	thermal conductivity [W/m·K]
p	pressure [N/m ²]	η	dynamic viscosity [N·s/m ²]
f_T=ρg	thermal (buoyancy) body force [N/m ³]	h	convection heat transfer coefficient [W/m ² ·K]
f_{mg}	magnetic body force [N/m ³]	j	$\sqrt{-1}$

thermal motion within the coolant fluid). Constitutive equations are added to characterize the electromagnetic field, the magnetic nanofluid flow, and the heat transfer in different parts of the transformer. The physical quantities are listed in Table I. The mathematical model was solved by the Galerkin FEM technique [12]. The main simulation results, the messages they convey, and some design solutions that they suggest close this section. More details are available in [10] and [11].

A. Mathematical Model

The electromagnetic field (induction currents) is assumed quasi-steady and harmonic, as described by the partial differential equation (PDE) for the magnetic vector potential [10], [12]

$$(j\omega\sigma - \omega^2\epsilon) \mathbf{A} + \nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) - \sigma \mathbf{u} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}^e. \quad (3)$$

The $(\mathbf{A}, V)$ formulation ($V = 0$) is recommended when all source currents may be specified as external currents $\mathbf{J}^e$.

The steady-state heat transfer and the accompanying thermal (natural) flow in a magnetic nanofluid under magnetic and thermal fields are described by the following set of nonlinear coupled PDEs [11].

Energy equation

$$\rho c_p (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = k \nabla^2 T + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}^e. \quad (4)$$

Momentum balance (Navier–Stokes)

$$\rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}_{mg} + \mathbf{f}_T. \quad (5)$$

Mass conservation (incompressible flow)

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (6)$$

The magnetic body forces are [10]

$$\mathbf{f}_{mg} = \mu_0 (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{H}. \quad (7)$$

Design constraints, materials, and external conditions lead to temperature gradients that drive heat fluxes throughout the system, such that the mass density (a temperature-dependent intensive property) is nonuniform throughout the working fluid. Consequently, buoyancy (body) forces may emerge, entraining a convection motion aimed at restoring the local thermal equilibrium. The coolant then conveys the heat produced in the active parts of the transformer (iron core and windings) to the case, where it is transferred to the environment. Heat is carried by convection, in the working magnetic nanofluid, and by conduction, in the solid parts. As indicated by (5), the magnetic body forces add to buoyancy, such that—unlike the standard transformer oil—the convective flow is the result of their combined action.

Equation (7) shows that the magnetic body forces are important in the regions where the magnetic field gradients are large, e.g., by the end parts of the windings. Simulation results reported next are consistent with this observation.

The thermal properties of the model are assumed linear. For the natural gravitational flow of the coolant, we assume the Boussinesq model [11], where the mass density dependence on temperature occurs in the body force term only (5).

The boundary conditions that close the model are the following.

- 1) The magnetic insulation for the transformer case.
- 2) The stand on which the transformer is mounted is isothermal (a thermostat), at the ambient temperature ($T_\infty = 300$ K); all other parts of the case are cooled by moderate natural convection (the heat transfer coefficient by convection is $h = 2$ W/m²K).
- 3) The no-slip (zero contact velocity) boundary conditions are set for the coolant flow at the solid parts (core, windings, and case).

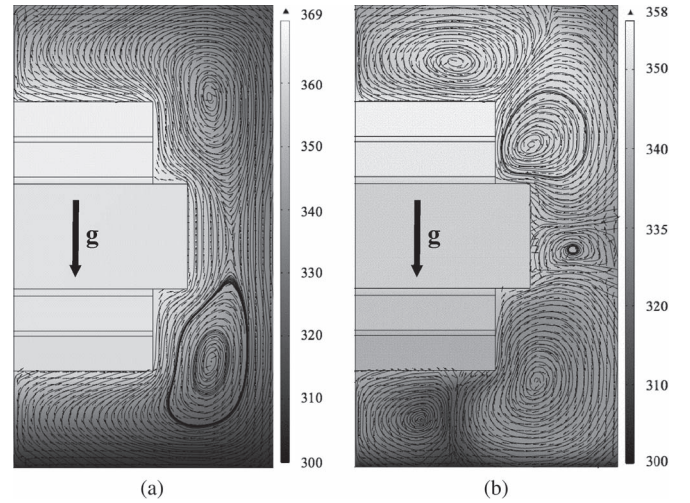


Fig. 7. Temperature (gray map, in kelvins) and flow (arrows, normalized)—horizontal design. Gravity acts vertically downwards. (a) Transformer oil. (b) Magnetic nanofluid.

B. Numerical Model and Solution Procedure

The magnetic nanofluid flow is mainly of a thermal nature; therefore, it is characterized by small velocity. Hence, we assume that this motion does not influence the incident magnetic field. Consequently, the electromagnetic field problem may be decoupled and solved in the first place. The resulting resistive power and body magnetic forces are inputted next, through their rms values, to the heat transfer and flow problems that are solved together because of the nonlinear coupling by buoyancy.

The mathematical model (3)–(7) is solved through Galerkin FEM, as implemented by Comsol Multiphysics [12].

V. NUMERICAL SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

The orientation of the magnetic forces versus the thermal forces is an important factor in providing an optimal design [9], [10]; simpler 2-D models were used to investigate this effect. Here, the computational models are only some relevant “slices” of the 3-D problem, and the heat sources are specified per unit length. Meshes of roughly 30 000–60 000 quadratic vector elements (for the magnetic field problem) and quadratic Lagrange elements (for the heat transfer problem) provide accurate numerical solutions.

A. Simplified 2-D Model

1) *Horizontal Configuration:* Fig. 7 shows the numerical simulation results for 1) oil and 2) magnetic nanofluid. In this plane, the buoyancy and magnetic forces act concurrently, and their combined effect is more important in the end regions. As seen, heat is transported from the active parts to the case in one step. When magnetic nanofluid is used [Fig. 7(b)], a larger number and more localized recirculation cells enhance the transfer efficiency.

This actually means a lower hot-spot temperature—by approximately 10 ° in this case—and a more uniform temperature distribution. These results suggest that the vertical design

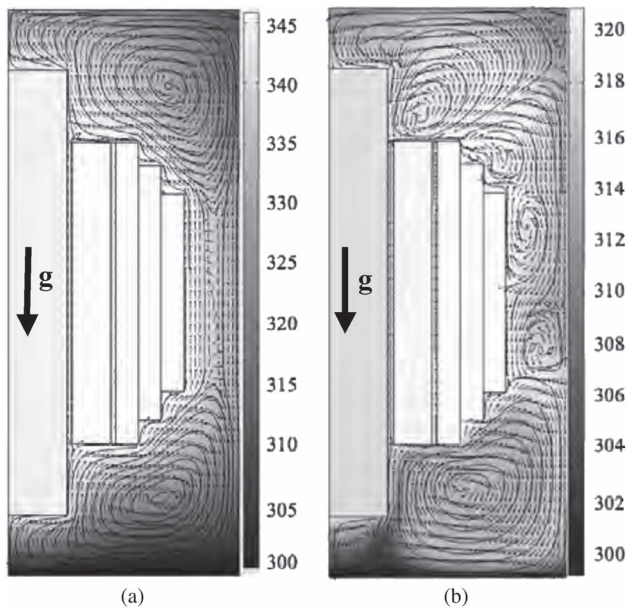


Fig. 8. Temperature (gray map, in kelvins) and flow (normalized arrows)—vertical design. Gravity acts vertically downwards. (a) Transformer oil. (b) Ferrofluid.

of the transformer may be advisable, and this indication is evaluated next.

2) *Vertical Configuration*: Fig. 8 shows the numerical simulation results for the vertical design. A more efficient heat transfer is observable when the magnetic nanofluid is used. This design is superior and leads to a more uniform temperature distribution; the usage of ferrofluid rather than the transformer oil leads to a decrease of 20–30° of the hot-spot temperature.

The 2-D models show that, for transformer oil, the vertical configuration is cooler than the horizontal configuration, and there is no significant improvement when MF is used instead of oil. However, when in the vertical configuration, MF is used instead of transformer oil, and the hot-spot temperature is significantly lower.

Under nominal working conditions (compensated amperturns), the magnetic field is mainly the leakage field—the channel between the high-voltage and low-voltage windings concentrates the field. Numerical simulation results indicate that the upper bounds of the magnetic flux density are 15.1 mT for transformer oil and 15.4 mT for magnetic nanofluid, respectively. These values are estimated for a primary winding equivalent current density of 2×10^6 A/m², and it is recorded in the channel by its mid-height.

This small discrepancy between the two cases suggests that the electrical parameters of the transformer do not significantly change when the transformer oil is replaced with the magnetic nanofluid (a diluted formula) used in our study. This fact is confirmed also by experimental measurements performed in the laboratory,¹ e.g., the short-circuit voltage (< 5%) and the open-circuit current (< 3%) remain unchanged.

It is mentioned again that, in view of (5), when magnetization body forces occur, although the amplitude of the magnetic

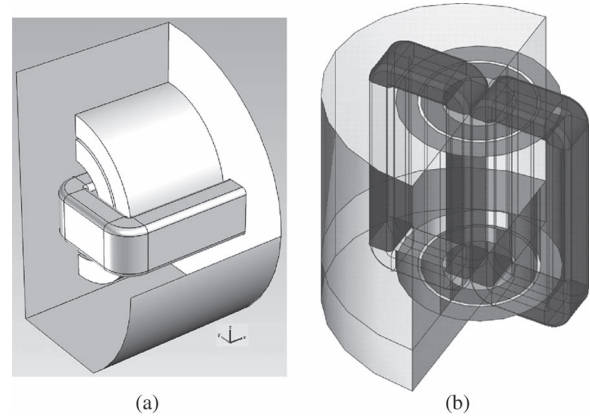


Fig. 9. Three-dimensional simplified models [10]. Symmetry is used to reduce their sizes. (a) Horizontal configuration. (b) Vertical configuration.

field is important, the magnetic field gradient plays the most important role: the more nonuniform the magnetic field, the larger the magnetization body forces.

B. 3-D Models

The two configurations were investigated by using notional 3-D models. Numerical simulation is now much more demanding in software and hardware resources.

1) *Horizontal Configuration, 3-D Model*: Symmetry was used to simplify the problem, and Fig. 9(a) shows the computational domain.

As before, the electromagnetic field is solved first (harmonic quasi-steady working conditions and balanced primary and secondary amperturns); the resistive (active) power in the windings is the heat source, and the magnetic field is the source for the (magnetization) body forces.

The magnetic field model leads to a nonlinear algebraic system of equations that was solved by using a parallel solver; the heat transfer model was solved using a segregated solver approach, combining a parallel solver for the energy equation and a direct solver for the hydrodynamic problem. The parallel solver greatly reduces the CPU time. Fig. 10 presents the flow fields by numerical simulation for the oil and ferrofluid.

The flow in Fig. 10(a) is purely thermal and evidences the regions of higher temperature gradients. Large convection cells, almost orthogonal to the Oy direction, are localized mainly in the end part. The coolant conveys the heat from the windings to the case wall, where it is discarded to the ambient by natural convection. The bottom wall contacts a thermostat.

The flow in Fig. 10(b) is more complex, localized in the regions of higher magnetic field gradient.

The two types of flows are different, but the efficiency of using MF rather than transformer oil is seen here as even more arguable than in the 2-D simulations since the difference in hot-spot temperatures is less than 10°. In both cases, the end parts (yoke regions) play an important role, and it is clear that the 3-D effects are more complex than evidenced in the 2-D models. As indicated by the 2-D analysis, the usage of ferrofluid in this design does not improve significantly the heat transfer. More details are given in [10].

¹Technical Bulletin FT348482, ICMET-Craiova, LCD-AEMEE, 2009.

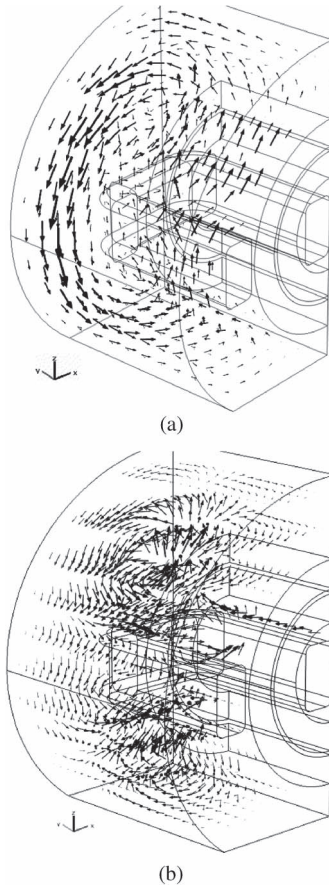


Fig. 10. Convection flow in the horizontal configuration. Gravity acts in negative Oz direction. (a) Transformer oil. (b) Magnetic nanofluid.

2) *Vertical Configuration, 3-D Model*: Fig. 9(b) shows the computational domain for the vertical configuration. Symmetry (with respect to the two vertical planes) is used to downsize and reduce the complexity of the model. The FEM mesh is made of approximately 120 000 tetrahedral elements: quadratic Lagrange elements for the heat transfer problem, Lagrange P2–P1 elements for the hydrodynamic problem, and quadratic vector elements for the magnetic field.

The coolant is driven into an ample, vertical, and convective flow. It sweeps the core and windings in a vertical stream extracting heat out of these regions, and a descending stream by the case wall, releasing the heat, which is transferred to the ambient by natural convection (from the case side walls to the ambient) and by conduction (the bottom contacts the stand).

The top and bottom horizontal streams that connect the vertical flows are shorter. The complex path of the convection flow is shown through massless particle tracing: three particles are released at $P_1 = (0.021, 0.0241, 0.0181)$ (in the channel between the column and the inner winding), $P_2 = (0.0242, 0.022, 0.0181)$ (in the channel between the column and the LV winding), and $P_3 = (0.02, 0.141, 0.0181)$ (in the space between the HV winding and the case; coordinates are given in meters).

An important message conveyed by the complex flow pattern exemplified in Fig. 11(b) is that there are no localized recirculation cells, connected by stagnant diffusive interfaces to the main streams. This implies that the thermally loaded fluid in

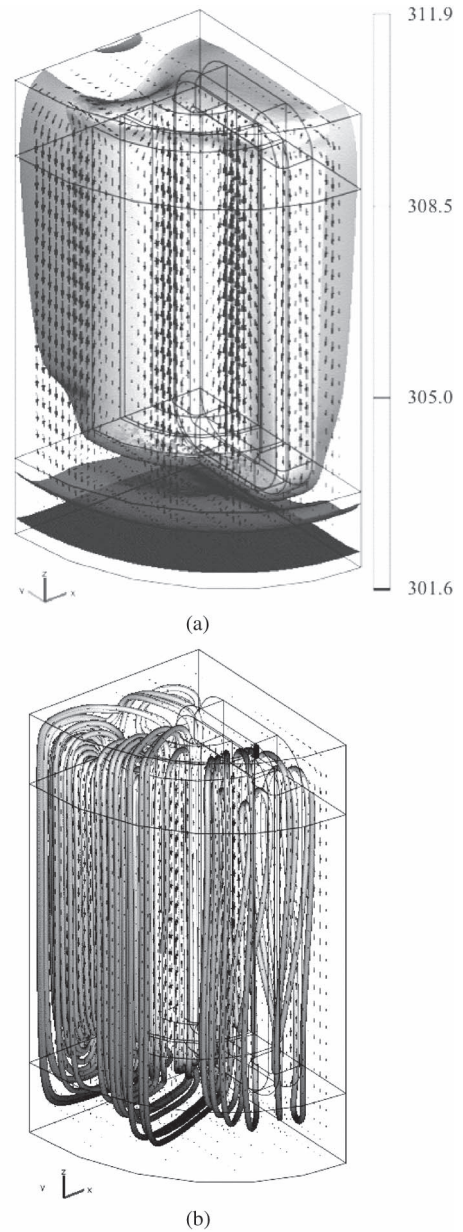


Fig. 11. Convection flow by numerical simulation—magnetic nanofluid. Gravity acts in negative Oz direction. (a) Isotherms and flow field. (b) Particle tracing (tubes)—the tube size is proportional to the velocity magnitude; the color is proportional to the local temperature.

the vicinity of the hot parts (e.g., in the channel between the HV and LV windings and in the channels between the LV winding and the core) will not overheat. It will eventually outflow in the space adjacent to the case to release the heat for further transfer to the ambient. This information is useful for the thermal design of the aggregate system.

VI. EXPERIMENTAL TESTS

A. Heating Test Circuit and Basic Relations

The temperatures on the transformer tank, isolator, and membrane were measured with a Keithley Multimeter Integra 2700 system and J -type thermocouples.

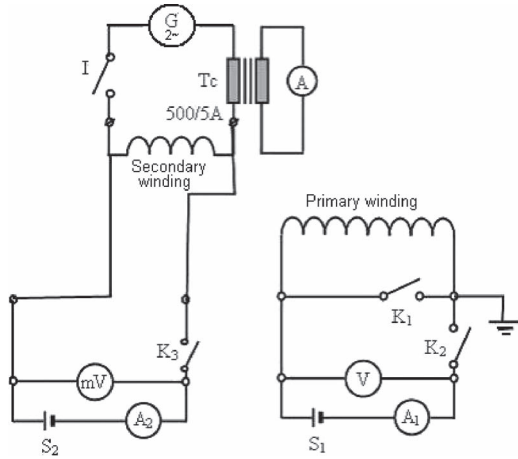


Fig. 12. Schematic circuit for the heating test.

Next, the temperatures of the windings were calculated using the method of the resistance variation. The diagram of the test circuit for the heating experiment is shown in Fig. 12, where G is the mains; $K1$, $K2$, and $K3$ are switches; T_c is a current transformer; mV and V are voltmeters; I is a switch; $A1$ and $A2$ are amperimeters; and $S1$ and $S2$ are dc power supplies.

The winding temperatures are determined at steady state. The measurement starts after disconnecting power supply G (Fig. 12) through switch I and switching the winding connections from the ac supply to the electronic stabilized supply $S2$ for the low-voltage winding and $S1$ for the high-voltage winding. The measurement of the electric resistance of the low-voltage and high-voltage windings starts as soon as the dc current measurement is stabilized, after connecting to the measurement kit. The sequence of indirect measurement of the winding temperatures is as follows:

- 1) reconnection of the secondary winding to generator G through switch I (Fig. 12);
- 2) reconnecting the primary winding to the medium-voltage source through switch $K1$;
- 3) the measurement of the low-voltage winding resistance using the amperimeter and voltmeter method, by connecting switch $K3$;
- 4) the measurement of the medium-voltage winding resistance using the amperimeter and voltmeter method, by connecting switch $K2$.

The measurements are performed in two stages: at the beginning of the heating tests and after 3 h of continuous functioning. For monitoring of the ambient temperature, we used thermocouples placed at 1 m around the transformer.

The average temperature of the windings θ_t measured in the warm state of the transformer was calculated according to SR EN 60076-2:2002 standard

$$\theta_t = (R_t/R_0)(T + \theta_0)T \quad (8)$$

where, for copper, $T = 235$ K. The other quantities in (8) are as follows: θ_0 —the average temperature of the winding, measured in the cold state of the transformer; R_t —the winding resistance, measured in the warm state of the transformer; and R_0 —the winding resistance, measured in the cold state of the transformer.

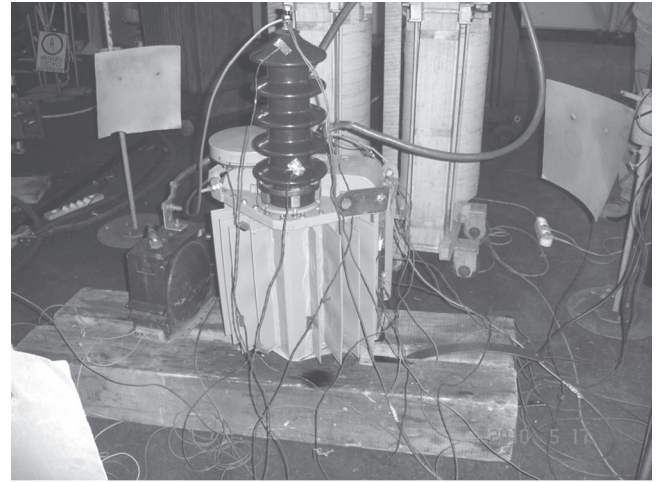


Fig. 13. Prototype transformer, TMOF2-36-40, in the test rig.

TABLE II
MEASURED AND CALCULATED HEATING OF THE
TRANSFORMER WINDINGS

Windings	Resistance [Ω]			Ambient temp. [$^{\circ}\text{C}$]		$\Delta\theta$ [$^{\circ}\text{C}$]	
	R_0	R_t		θ_0	θ_a	calculated	
	Oil, *MF	Oil	*MF	Oil, *MF	Oil, *MF	Oil	*MF
HV	70.86	88.28	86.91	15	15	61.45	56.63
LV	0.009067	0.010927	0.01087	15	15	51.37	49.70

*MF = magnetic nanofluid

TABLE III
HEATING MEASURED ON DIFFERENT PARTS OF THE TRANSFORMER

Part	Ambient temperature [$^{\circ}\text{C}$]		Heating $\Delta\theta$ [$^{\circ}\text{C}$]	
	Oil, *MF	*MF	*MF	Oil
Membrane	15	20.8	21.6	
Radiator tank	15	30.2	30.7	
Insulator	15	24.4	26.1	

*MF = magnetic nanofluid

The heating of the windings is $\Delta\theta = \theta_t - \theta_a$, where θ_a is the ambient temperature and θ_0 is the winding average temperature, measured in cold state (initial), after a long conservation (over 48 h) in the transformer testing room. The ambient temperature in the initial stage θ_a is θ_0 due to the specific conditions at the test location and due to the relatively constant temperature outside the room.

B. Results and Discussion

The comparative results of measurements and tests (Fig. 13) were presented in the test reports issued by the laboratories where they were performed. The results for the two cases are presented in Tables II and III.

These experimental data provide lumped thermal circuit results. The numerical simulation (e.g., Fig. 8) provides the temperature distribution and the convection flow—an information that is useful, for instance, in evidencing the hot-spot regions and the internal heat transfer mechanisms.

Fig. 14 presents the evolution of the temperature at the finned tank registered with the Ti 20 thermographic camera.

Fig. 15 shows the temperature variation as recorded during the experiments, at the top part of the case, in two different locations. The (thermal) steady-state regime is attained faster at

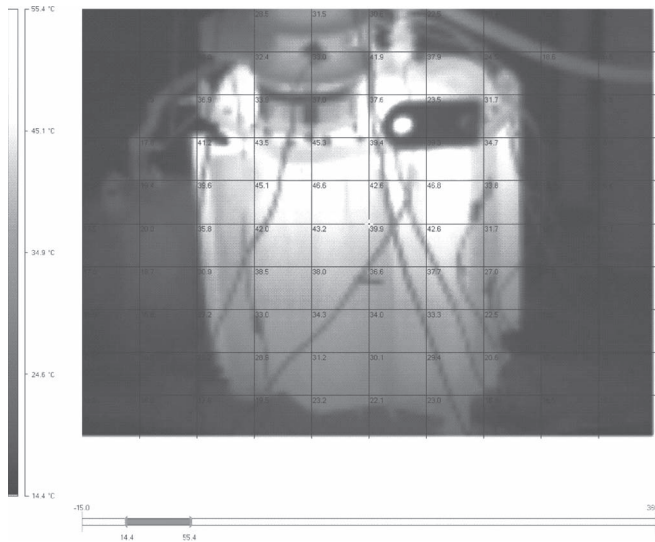


Fig. 14. Temperature in the insulated crossing and low-voltage terminal zone, recorded with the thermographic camera Ti20, using magnetic nanofluid.

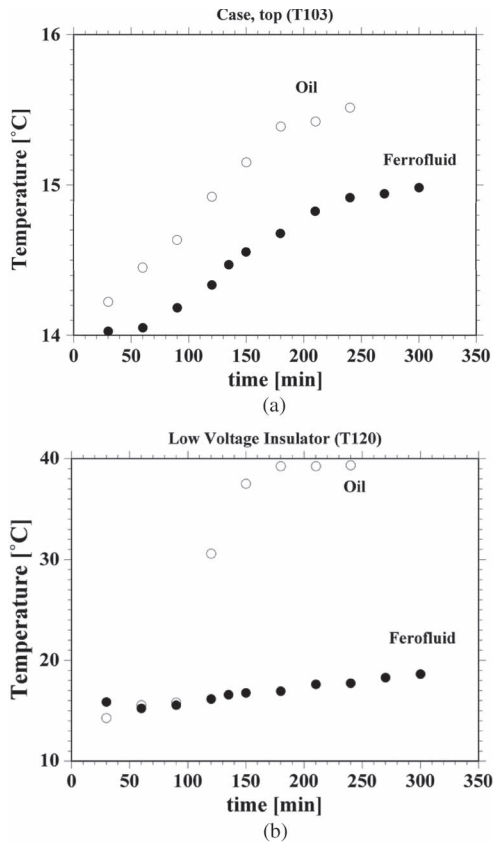


Fig. 15. Temperature dynamics at two locations, for the transformer with oil and MF. Heat transfer steady state is faster attained at location T120. (a) Temperature recorded at the top lid. (b) Temperature profile on the case, at the LV insulator passage.

location labeled T120. This discrepancy in the duration of the thermal transients at different locations is neither unexpected nor surprising since the transformer is a complex structure that does not behave as a lumped thermal system.

The faster temperature growth when oil is the cooling agent is explained by different loading conditions; in that case, the

short-circuit test was performed at a higher initial voltage in order to reduce the duration of the experiments.

Although the transients have different evolutions, the two steady-state regimes (for oil and magnetic nanofluid) are electrically the same. Apparently, the ferrofluid provides better cooling of the transformer, as already predicted by the numerical simulation results on the order of magnitude sense.

VII. CONCLUSION

The main conclusions drawn in this paper are as follows.

- 1) The magnetization curve allows the determination of an important physical property of MFs, namely, the saturation magnetization ($M_s = 3.979$ kA/m), which reflects the volume concentration, low in this case, of the magnetic nanoparticles in MFs ($\varphi = 0.012$).
- 2) The investigation methods of microstructural and flow properties, i.e., vibrating sample magnetometry and rheometry, indicate a high colloidal stability of MF sample based on UTR-40, with Fe_3O_4 particles and oleic acid as monolayer surfactant, and the existence of a small fraction of agglomerates.
- 3) The stable MFs exhibit a Newtonian behavior for normal shear stresses (less than 10^3 s^{-1}).
- 4) The usage of an MF as coolant reduces the weight and volumes of the transformers following the intensification of the cooling effect in the presence of the magnetic nanofluid.
- 5) The design of the magnetic circuit and the metallic construction (tank, bottom, and lid) leads to a reduced consumption of the main materials: copper and magnetic steel sheet, including the magnetic nanofluid.
- 6) The numerical simulations of the magnetic field and the heat transfer within the transformer show that the directions of the magnetic and gravitational thermal forces are an important element in providing optimal cooling.
- 7) The several 2-D models aimed at conveniently evaluating the electromagnetic field, the heat transfer, and the convection flow mechanisms reveal that vertical configuration provides better usage of the ferrofluid. The 3-D models confirm that vertical positioning ensures better cooling.
- 8) The usage of a ferrofluid as coolant provides magnetization body forces that add to the thermal gravitational forces. However, in natural convection, magnetic body forces do not act always to significantly improve the heat removal provided by the thermal body forces. In the vertical configuration of the transformer, these forces act concurrently with the thermal flow, and the overall effect is the enhancement of the heat transferred from the aggregate active parts (core and windings) to the ambient.
- 9) The simulation results provided recommendations for the optimization of the design of the single-phased transformer, which is the object of this project. Mainly, in the current constructive version, the transformer is built in vertical construction (the high and low voltage have the turns disposed horizontally).

REFERENCES

- [1] FEROTEC Corp., Singapore. [Online]. Available: <http://www.ferrotec.com>
- [2] B. Berkovski and V. Bashtovoy, Eds., *Magnetic Fluids and Applications, Handbook*. New York, NY, USA: Begell House, 1996.
- [3] X. Q. Wang and A. S. Mujumdar, "A review on nanofluids—Part I: Theoretical and numerical investigations," *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 25, no. 4, pp. 613–630, Oct.–Dec. 2008.
- [4] M. Raşa, "Magnetic properties and magneto-birefringence of magnetic fluids," *Eur. Phys. J. E*, vol. 2, no. 3, pp. 265–275, Jul. 2000.
- [5] M. Raşa, D. Bica, A. Philipse, and L. Vekas, "Dilution series approach for investigation of microstructural properties and particle interactions in high-quality magnetic fluids," *Eur. Phys. J. E*, vol. 7, no. 3, pp. 209–220, Mar. 2002.
- [6] D. Bica, "Preparation of magnetic fluids for various applications," *Rom. Rep. Phys.*, vol. 47, no. 3–5, pp. 265–272, Apr. 1995.
- [7] C. Tangthieng, B. A. Finlayson, J. S. Maubetsch, and T. Cader, "Heat transfer enhancement in ferrofluids subjected to steady magnetic field," presented at the 8th Int. Conf. Magn. Fluids, Timisoara, Romania, 1998.
- [8] A. M. Morega, M. Morega, F. D. Stoian, and S. Holotescu, "Numerical simulation of an experimental apparatus for the evaluation of physical properties of magnetic fluids," presented at the Int. COMSOL Conf., Budapest, Hungary, Nov. 24–25, 2008.
- [9] L. Pîslaru-Dănescu, A. M. Morega, F. Nouras, and V. Stoica, "Thermal effects on functional characteristics of the electrical transformers," presented at the 8th Int. Symp. Adv. Electromech. Motion Syst. ELECTROMOTION, Lille, France, 2009.
- [10] A. M. Morega, M. Morega, L. Pîslaru-Dănescu, V. Stoica, F. Nouras, and F. Stoian, "A novel ferrofluid cooled transformer. Electromagnetic field and heat transfer by numerical simulation," in *Proc. 12th Int. Conf. OPTIM Elect. Electron. Equip.*, Brasov, Romania, 2010, pp. 140–146.
- [11] A. Bejan, *Convection Heat Transfer*. New York, NY, USA: Wiley, 1984.
- [12] *COMSOL Multiphysics User's Guide*, COMSOL A.B., Stockholm, Sweden, 2008.



Mihaela Morega (M'96) received the Dipl.Eng. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the Faculty of Electrical Engineering, University Politehnica of Bucharest, Bucharest, Romania, in 1980 and 1988, respectively.

She is currently a Professor of electrical engineering, with teaching and research responsibilities in applied electromagnetics, with the Faculty of Electrical Engineering, University Politehnica of Bucharest. Her research interests and specializations include electromechanical energy conversion, computer-aided design and modeling of electromechanical systems, analysis of multiphysics problems, characterization of the electromagnetic environment, and interactions of electromagnetic field with human tissue for applications in biomedical engineering.



Victor Stoica was born in Bucharest, Romania, in 1979. He received the B.S. and M.S. degrees from the Faculty of Electrical Engineering, University Politehnica of Bucharest, Bucharest, in 2005 and 2007, respectively, where he is currently working toward the Ph.D. degree in electrical engineering.

He is currently with the Department of Electromechanical Engineering, National Institute for Research and Development of Electrical Engineering, Bucharest. His fields of interest include electrical machines, electromagnetics, piezoelectrics, and

electromechanical actuators.



Lucian Pîslaru-Dănescu was born in Timisoara, Romania, on March 14, 1960. He received the B.S. degree and the Ph.D. degree in electrical engineering from the University Politehnica of Bucharest, Bucharest, Romania, in 1985 and 2005, respectively.

He is currently with the Department of Electrical Micromachines Research, National Institute for Research and Development of Electrical Engineering, Bucharest. His research interests include development of models and prototypes for electromagnetic, piezoelectric, and magnetostrictive actuators; elec-

tronic sources for actuators; signal conditioning for sensors; and electromagnetic field computation.



Oana Maria Marinică was born in Chisineu-Cris, Romania, in 1974. She received the B.S. degree in physics from the West University of Timisoara, Timisoara, Romania, in 1997 and the B.S. degree in applied informatics from the University Politehnica of Timisoara, Timisoara, in 2005.

Since 2005, she has been a Researcher with the National Centre for Engineering of Systems with Complex Fluids, University Politehnica of Timisoara. Her research activities are focused on magnetic fluids (MFs) and stabilization mechanisms

for magnetofluidic composites, microstructural processes in MFs, rheology and magnetorheology of MFs and magnetofluidic composites, and magnetic properties of complex systems.



Alexandru M. Morega (M'90–SM'07) was born in Bucharest, Romania, in 1955. He received the B.E., M.S., and Ph.D. degrees in electrical engineering from the University Politehnica of Bucharest, Bucharest, in 1980, 1980, and 1987, respectively, and the Ph.D. degree in mechanical engineering from Duke University, Durham, NC, USA, in 1993.

In 1983, he joined the Faculty of Electrical Engineering, University Politehnica of Bucharest, as an Assistant Professor, where he became a Professor in 1998. His current research interests include electromagnetism, heat and mass transfer, field–substance interactions, energy conversion and sources, and multiphysics modeling.

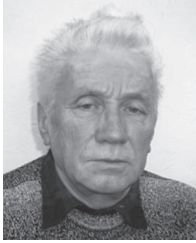
Dr. Morega is a member of the American Society of Mechanical Engineers.



Florica Nouras was born in Romania on June 26, 1961. She received the Dipl.Eng. degree in mechanical engineering from the University of Craiova, Craiova, Romania, in 1985.

She has a rich experience as a research engineer in mechanical and electrical fields, and she is currently a Research Engineer with the R&D, Test, and Calibration Department, Research, Development and Testing National Institute for Electrical Engineering (ICMET), Craiova. Her research interests include equipment for monitoring, testing, fault diagnosis,

and disturbance recording.



Nicolae Păduraru was born in Chisinau, Romania, in 1934. He received the B.S. degree from the Electrical Engineering Institute of Craiova, Craiova, Romania, in 1957.

Since 1957, he has been a Designer Engineer with Electroputere, Craiova, where he was the Senior Designer for measuring transformers from 1958 to 1964 and the Head of the design group in 1964. In 1968–1998, he was the Head of the design group for measuring transformers, Electroputere Research Institute. Since 1980, he has been a Senior Specialist with Craiova University, Craiova. Since 1999, he has been a Design Engineer with the Research, Development and Testing National Institute for Electrical Engineering (ICMET), Craiova. He has outstanding experience as a research engineer in electrical fields. He has published over 50 papers in technical journals and conference proceedings. His research interests include unconventional insulation systems for high-voltage equipment and unconventional measuring, currents and voltages, and sensors.



István Borbáth was born in Odorheiu Secuiesc, Romania, in 1956. He received the Engineer diploma from the Faculty of Machine Manufacturing Technology, Polytechnic Institute of Bucharest, Bucharest, Romania, in 1979.

He has been the General Director of Roseal Corporation, Odorheiu Secuiesc, since 1990. His experience includes research, design, manufacturing, and commercializing mechanical and magnetofluidic seals, and specific components of carbographitic, superaluminous ceramic, elastomer, and metallic materials.

His current research interests include magnetic nanofluid preparation, technical applications of magnetic nanofluids, hydrogen fuel cells, and new thermoresistance polymeric materials exposed to radiation.

Mr. Borbáth is a member of the Employer's Association for Machine Building Industry (FEPACM), Romanian Standards Association (ASRO)—Technical Committee of Standardization CT378—Nanotechnologies, Management Agency for Scientific Research, Technology Transfer and Innovation—Politehnica (AMCSIT), Romanian Atomic Forum (ROMATOM), and Romanian Pump Manufacturers Association (APPR).



Tünde Borbáth was born in Odorheiu Secuiesc, Romania, in 1981. She received the Engineer diploma in computer science and engineering from the Faculty of Automation and Computers, University Politehnica University of Timisoara, Timisoara, Romania, in 2005. She has been working toward the Ph.D. degree in the Power Engineering Faculty, University Politehnica of Bucharest, Bucharest, Romania, since 2009, working on technical applications of the magnetic nanofluids, especially magnetic nanofluid seals.

She has been a Research Engineer in automation with Roseal Corporation, Odorheiu Secuiesc, Romania, since 2007. She is involved in research projects from the magnetic fluid domain and their technical applications.



Prevention of hot spot temperature in a distribution transformer using magnetic fluid as a coolant



Jaykumar Patel ^a, Kinnari Parekh ^{a,*}, R.V. Upadhyay ^b

^a K C Patel R & D Center, Charotar University of Science & Technology, CHARUSAT Campus, Changa, 388 421 Dist. Anand, Gujarat, India

^b P D Patel Institute of Applied Sciences, Charotar University of Science & Technology, CHARUSAT Campus, Changa, 388 421 Dist. Anand, Gujarat, India

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 August 2015

Received in revised form

19 December 2015

Accepted 21 December 2015

Available online 16 January 2016

Keywords:

Heat transfer

Thermo-electrical energy

Magnetic fluid

ABSTRACT

A Mn–Zn ferrite magnetic fluid (TCF-56) having 5.6 mT fluid magnetization and high pyromagnetic coefficient, ($\partial M/\partial T = 177$ A/m K) has been investigated as a coolant in a 3 kW prototype transformer for overloading condition (167%). The winding temperature of a transformer submerged in magnetic fluid reaches at 396.8 K after 3 h of overloading, which is 20 K lower, when the same experiment was carried out with pure transformer oil. Similarly, core and top oil temperature also decrease by 14 and 21 K, respectively, when TCF-56 is used. This cooling performance of TCF-56 attributes to the thermo-magnetic convection, which sets up due to the significant change in magnetization of the fluid with increasing temperature. This can be explained using the Rayleigh number. The normal life of a transformer under 167% overloading condition is calculated for pure oil and TCF-56. The result shows nine times increase in normal life expectancy in TCF-56 fluid compared to use of pure oil. The study leads to the conclusion that Mn–Zn ferrite magnetic fluid (TCF-56) used in a transformer can deliver more power than its nameplate rating with an improved normal life.

© 2015 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

1. Introduction

A transformer is a static electrical device that operates using the principle of mutual induction. During the power transfer some amount of the input power is dissipated as losses, such as core loss, hysteresis loss, eddy current loss and stray loss. These losses are of the order of 1% of its full rated load and can be minimized by (i) using superior magnetic material for the core, (ii) tuning the thickness of the steel lamination, (iii) by closing the leakage flux lines, etc. With the increasing power rating of the transformer, these losses also increase, results in the temperature rise inside the transformer. The upper limit of temperature rise in the individual parts of a transformer must meet the criteria as defined in the relevant standards [1,2]. To conform to these specifications, one needs cooling mechanisms to disperse the high temperature induced by the losses. The typical cooling mechanism used for this is a natural air flow or insulating oil flow.

In an oil cooled distribution transformer, the heat transfer mechanism is grounded on the Archimedes law. But this is relatively poor and less efficient, due to which a large temperature

gradient across the oil reservoir is observed, which results into creation of a localized region of intense temperature between the core and windings and between the windings, known as the “hot spot”. The hot spot causes degradation of the insulation of the winding as well as the conductive components of a transformer, which finally results in a continuous sparking. Because of this, the insulating oil decomposes, forms an oil-carbon and decreases flash point of the oil. All these eventually lead to the failure of a transformer.

The hot spot temperature (HST) determines the normal lifespan of a transformer on loading. The permitted value of HST at rated load is specified by ANSI (American Standards Institute). This is a function of resistive temperature rise in the winding [2]. To forestall and/or trim down the hot spot winding temperature, an auxiliary cooling mechanism with fins or pumping devices to spread the oil inside the transformer tank is often employed. However, addition of fins requires more space and increases the overall weight of the transformer. On the other hand, oil pumps are cumbersome, consume power and need regular maintenance. The alternate way to enhance the heat dissipation is to modify the transformer oil cooling properties.

Potential to replace the insulating oil by magnetic fluid to eliminate “hot spot” in the transformer core and its winding is

* Corresponding author.

E-mail address: kinnariparekh.rnd@charusat.ac.in (K. Parekh).

observed by many researchers [3–21]. The idea is to use a magnetic fluid (ferrofluids) whose Curie temperature is close to the device's temperature (393 K) so that convection due to magnetic buoyancy is achieved [3]. The resultant convective flow transfers the heat, becomes colder and regains its magnetization to complete the regenerative cycle [22]. This offers opportunities in the passive cooling of electrical circuits, machinery, and processes [23]. It is to be added here that, Bahiraei et al. [24–26] have studied hydro-thermal characteristics of water based Mn–Zn ferrite nanofluid within annulus, square cavity and double-pipe heat exchanger in the presence of a magnetic field. According to this report, heat transport increases between fluid and wall.

Numerous theoretical calculations for 2D [20] and 3D [21] model transformer working under nominal condition indicates hot spot temperature lowers by 10–30 K when magnetic fluid is used. Nevertheless, the experimental results [16–20] reported by V. Segal [17] have shown 3.6 K reductions in winding temperature. Similarly, Stoian [18] has observed 3.4 K reduction inside the coil core temperature powered by a 50 Hz AC power. The magnetic fluid used in the experiments was magnetite dispersed fluid having a high Curie temperature 858 K [27]. Hence, to attain to the theoretical value of temperature decrement, one requires a magnetic fluid whose Curie temperature is near to the device temperature and should also have high pyromagnetic coefficients in the operating range of temperature. This is a motivation behind this study.

In the present work, we have designed a Mn–Zn magnetic fluid having Curie temperature (380 K) near to the device temperature. The fluid has a high pyro-magnetic co-efficient, $(\partial M/\partial T = 177 \text{ A/m K})$ this is nearly five times higher than magnetite $(\partial M/\partial T = 29.8 \text{ A/m K})$, in the working range of temperature (373–393 K). To check the efficiency of the synthesized magnetic fluid as a coolant, the experiment was conducted on a custom designed single phase 3 kW prototype transformer for the overloading conditions. The normal life expectancy under overloading condition is estimated using the results.

2. Experimental

2.1. Synthesis and characterization of magnetic fluid

A chemical co-precipitation method is used to prepare magnetic nanoparticles of Mn–Zn ferrites. The particles were coated with oleic acid and dispersed in transformer oil (TASHOIL-50, Tashkent transformer oil, Baroda, India) conforming to IS: 335/1993 [15]. The magnetic property of the transformer coolant fluid (TCF-56) is measured using vibrating sample magnetometer (model LakeShore VSM 7404). Fig. 1a shows the room temperature magnetic response of the fluid. The experimental data were fitted using standard Langevin's theory with log-normal particle size distribution. The value of saturation magnetization (M_s) derived from the fit is 5.6 mT [15]. The temperature dependent magnetic properties are measured using modified Quincke's experiment [28,29]. Fig. 1b shows the plot of the change in entropy of the fluid as a function of temperature under a constant magnetic field of 0.1 T. The Curie temperature, thus obtained by fitting the data with the equation mentioned in our earlier paper [29] is $380 \pm 1 \text{ K}$. The pyromagnetic co-efficient $(\partial M/\partial T)$ obtained using the ratio of the difference of magnetization at 303 K and at the Curie temperature to the temperature difference. The value of $\partial M/\partial T$ is 177 A/m K. This is nearly five times higher than magnetite based magnetic fluid (29.8 A/m K). The same tube is used to measure the thermal expansion co-efficient (β_0) of the oil as well as magnetic fluid.

The thermal conductivity (λ) as a function of temperature is measured using the principle of transient hot wire technique (Flucon LAMBDA system). Fig. 1c shows the variation of thermal

conductivity with temperature for TCF-56 and pure oil TASHOIL-50. The value of λ for TCF-56 is 2.5% higher compared to that of the base oil at all the temperatures under investigation (303–338 K). In addition, under the influence of parallel magnetic field, thermal conductivity of TCF-56 shows a further enhancement of 38% at 0.226 T field (Fig. 1d). The specific heat capacity of fluid, (c_p), (Fig. 1e) at 303 K (derived using the value of thermal conductivity and density) is lower than that of TASHOIL-50. This agrees with earlier observation by Anne et al. for 13 different nanoparticles-base fluids compared to the base fluid [30]. The temperature dependent viscosity (η) of the fluid is measured using Anton Paar rheometer (model Rheolab QC) in the range of 293–338 K (Fig. 1f). Both fluids exhibit Arrhenius behavior and value of activation energy is 6.18 ± 0.02 and $6.08 \pm 0.02 \text{ kcal/mol}$, respectively for pure oil and magnetic fluid which remains nearly same. This indicates that at this concentration, flow rate will not be hindered by viscosity change.

The electrical resistivity is measured as per the IS 6262/6103 standard using I.R Tester and Oil dissipation factor meter purchased from Power Electronical, Nashik, India. The resistivity of TASHOIL-50 is of the order of $8 \times 10^{11} \Omega \text{ m}$ and that of TCF-56 is $7.4 \times 10^8 \Omega \text{ m}$. The value of resistivity decreases by three orders of magnitudes. The decrease in resistivity of the fluid is because of the lower value of electrical resistivity of the particles ($\sim 10^{-1} \Omega \text{ m}$) [31] compared to that of the insulating oil ($\sim 10^{11} \Omega \text{ m}$). Similarly, breakdown voltage (BDV) (model PE-OBVD-6, Power Electronical, Nashik, India) is measured for both samples as per IS 6792 using the gold plated spherical electrodes fixed at 2.5 mm gap. The average of five measurements was taken. The average value of the BDV for TCF-56 (69.5 kV) shows 115% enhancement compared to TASHOIL-50 (32.3 kV). This superior electrical breakdown performance compared to that of pure oil is due to the electron charging of the nanoparticles to convert fast electrons from field ionization to slow negatively charged nanoparticles charge carriers with effective mobility reduction by a factor of about 1×10^5 [32]. The parameters obtained at 303 K for TASHOIL-50 and TCF-56 are presented in Table 1.

2.2. Design and fabrication of prototype transformer

A 3 kW (230 V, 13 A) prototype transformer was designed and fabricated to conduct the experiment. The core of the transformer was made up of cold rolled Non Grain Oriented steel laminations (CRNO) material with core dimension of 2.58×10^{-3} square meter and 7 number core sizes. 18 SWG wire was used for winding the primary and secondary coil. A mild steel (MS) cabinet of 6 mm thickness was made with volume capacity of 3.5 L of the transformer oil. The output of the transformer was connected to 3 heating coils, each of 2.5 kW power rating. Fig. 2a shows the schematic representation of a model transformer whereas Fig. 2b shows the photograph of prototype transformer used for the experiment. The temperature distribution in a prototype transformer under overloading condition (167%) is measured by submerging the transformer in the TASHOIL-50 and magnetic fluid (TCF-56), separately. The temperature at core (T_{Core}), winding (T_{Winding}), top of the oil ($T_{\text{Top oil}}$) and bottom of the oil ($T_{\text{Bottom oil}}$) were monitored using four thermocouples (LM35, precision temperature sensor, 218–423 K, accuracy 0.5 K, calibrated at 294 K) positioned at these parts as shown in Fig. 2a.

3. Results & discussion

3.1. Temperature profile of prototype transformer

The temperature profile for TASHOIL-50 and TCF-56 obtained in prototype transformer is shown in Fig. 3. From Fig. 3a–c it is clear

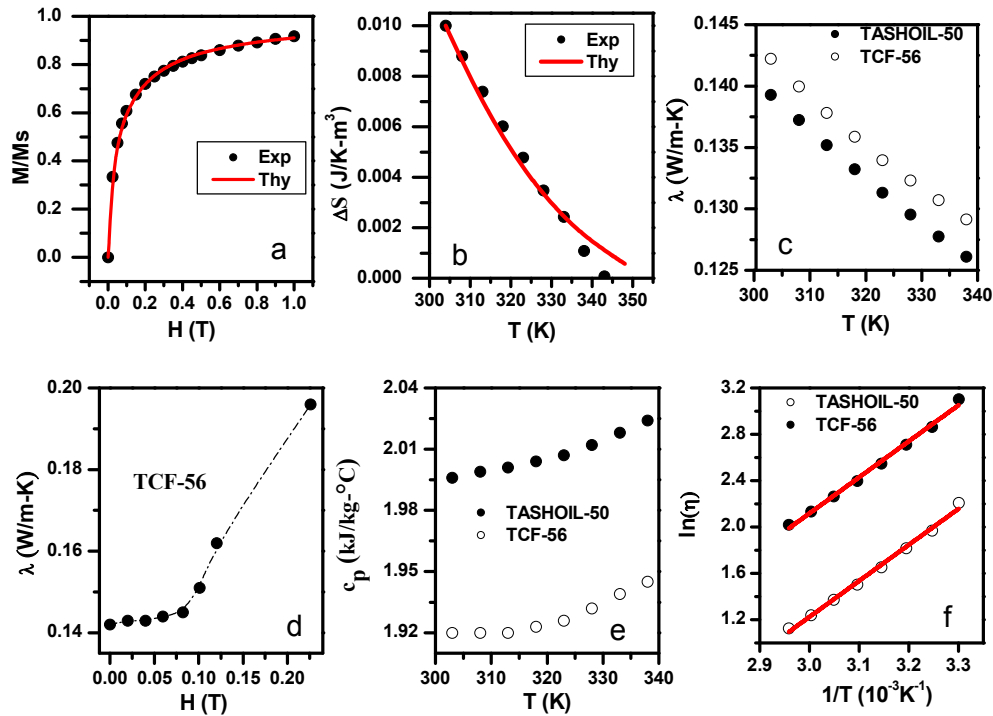


Fig. 1. (a) Normalized magnetic response of the fluid as a function of magnetic field. Symbols are experimental and line is a fit to Langevin's theory incorporating log-normal size distribution, (b) variation of entropy with temperature for TCF-56 fluid. Symbols are experimental and line is a fit [29], (c) variation of thermal conductivity for both fluids as a function of temperature, (d) magnetic field dependent thermal conductivity for TCF-56 fluid, (e) Specific heat capacity as a function of temperature and (f) viscosity as a function of temperature. Line is a fit to Arrhenius behavior.

Table 1

Properties of the TASHOIL-50 and TCF-56 at 303 K temperature.

Properties	TASHOIL-50	TCF-56
ρ (kg/m ³) @ 303 K	817	870
ϕ (%)	0.00	1.27
M_s (mT)	0.0	5.6
$\partial M/\partial T$ (A/m K)	0.00	177
β_0 (1/K)	0.00084	0.0008
λ (W/m K) @ 303 K	0.139	0.142
λ (W/m K) @ 338 K	0.126	0.129
c_p (kJ/kg K) @ 303 K	1.920	1.996
η (mPa s) @ 303 K	9	22
ρ_{ele} (Ω m) @ 363 K	8×10^{11}	7.4×10^8
BDV (kV)	32.3	69.5

that the use of magnetic fluid does alter the temperature profile, and reduction in the temperature is around 14–21 K. The experiments were repeated three times, and value reported in Table 2 is an average of three experiments. It is to be mentioned here that, the variation obtained in each experiment is less than 1%. The reduction in maximum temperature at the core and winding indicates the accelerated heat dissipation with TCF-56 fluid.

The reduced temperature in TCF-56 compared to that of TASHOIL-50 can be explained by considering the thermo-magnetic convective instability in magnetic fluid. This convective instability arises from heat conduction through a magnetized fluid layer having a temperature dependent magnetization

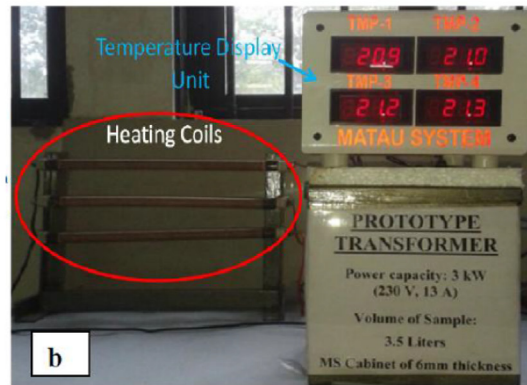
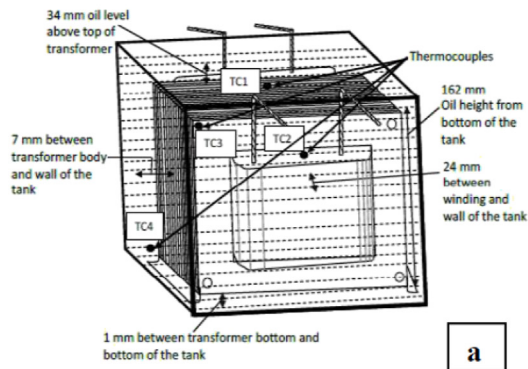


Fig. 2. (a) Internal schematic of the transformer, indicating spacing between transformer to the surrounding tank and placement of thermocouples at various positions (TC1 = thermocouple at the core, TC2 = thermocouple at winding, TC3 = thermocouple at top-oil portion, TC4 = thermocouple at bottom-oil portion) and (b) model prototype transformer.

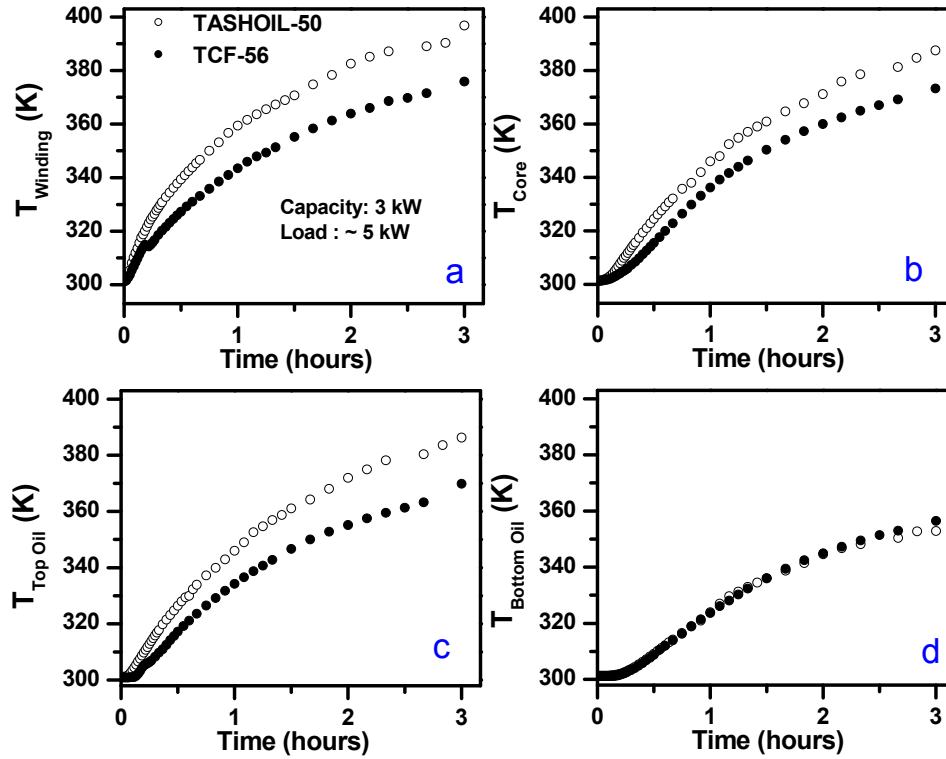


Fig. 3. Winding, core, top oil and bottom oil temperature of the transformer as a function of time when submerged in TASHOIL-50 (open symbols) and TCF-56 (filled symbols).

Table 2
Temperature value of transformer after 180 min with TASHOIL-50 and TCF-56.

Sample code	Temperature (± 1 K) after 3 h			
	T_{Core}	$T_{Winding}$	$T_{Top\ oil}$	$T_{Bottom\ oil}$
TASHOIL-50	114.5	124	113	80
TCF-56	100.3	103	97	84

$$N_{Ra} = \frac{c_p A_0 d^4}{\eta \lambda} \begin{cases} \beta_0 \rho g & (a) \\ \mu_0 \left(-\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H \left(-\frac{dH}{dz} \right) & (b) \\ \mu_0 \left(-\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H^2 \frac{A_0}{1 + \left(\frac{\partial M}{\partial H} \right)_T} & (c) \end{cases} \quad (1)$$

[33–36]. The heat transfer becomes more effective when temperature gradient (∇T) and field gradient (∇H) are in same direction.

The thermo magnetic convective instability in magnetic fluid is shown schematically in Fig. 4. Transformer's winding is a spot of maximum magnetic field as well as of highest temperature, hence the magnetic fluid experiences a drag towards the winding and it is a product of gradient magnetic field and pyro-magnetic co-efficient. Furthermore, gradient in a magnetic field (∇H) is developing in the same direction to that of the temperature gradient (∇T). At the winding, the temperature of fluid will rise due to the heat generated by the device. The hot fluid losses their magnetic property as well as its density reduces compared to the surrounding fluid. As the surrounding fluid is relatively cool and magnetically strong, the gradient in density ($\nabla \rho$) and the gradient in fluid magnetization (∇M) are created. Thus, cool fluid attracts towards the winding, and pushes the hot fluid away from the winding. The hot fluid rises and dissipates its heat as it comes into contact with the wall of the transformer and becomes denser again as well as regains its magnetic properties. Thus the natural convection due to Archimedes law, F_A gets intensified by virtue of additional magnetic convection, F_M , which resulted into the enhanced heat transfer.

The transition from a quiescent equilibrium state to a stationary convective motion in magnetic fluid is given by generalized Rayleigh number as

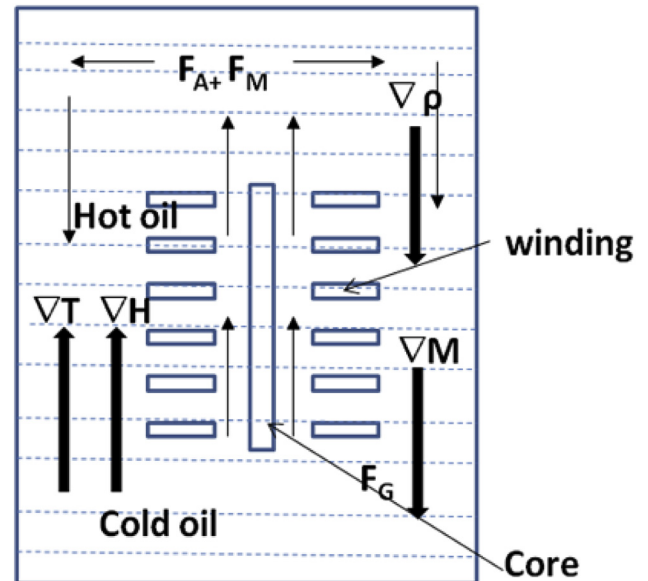


Fig. 4. The origin of the magnetic driving force for thermo-magnetic convection. Schematic of Archimedes flow, F_A and Magnetic buoyancy, F_M within transformer.

Here, c_p is the heat capacity at constant pressure per unit volume, A_0 is temperature gradient defined as $\Delta T/d$ with d is the wall spacing, λ is thermal conductivity, η is the viscosity of the liquid, β_0 is the thermal expansion co-efficient, ρ is density of fluid, g is gravitational acceleration, μ_0 is the permeability of free space, $(-\partial M/\partial T)_H$ is a pyromagnetic co-efficient, $(-dH/dz)$ is magnetic field gradient and $(\partial M/\partial H)_T$ is the susceptibility of the fluid at constant temperature.

Condition 1 (a) is only buoyant force driven convection, i.e., it become operative only when pure transformer oil is there or one does not consider the effect of magnetic properties of particles dispersion. Condition 1 (b) applies when a constant gradient magnetic field is there throughout the fluid layer and the buoyancy has been turned off. Condition 1 (c) applies when the magnetic field is uniform, but the magnetically induced temperature change is appreciable. Finlayson in 1970 [37] found that when M is greater than $3 \times 10^5 \text{ A m}^{-1}$, the critical value of Rayleigh number approaches 1708 for any value of $(\partial M/\partial H)_T$. In the present case, the value of the localized Rayleigh number for TASHOIL-50 and TCF-56 are calculated for $d = 1 \text{ mm}$, temperature difference of 20 K and field gradient of 800 kA/m^2 using the Condition 1 (b). The Rayleigh number for TASHOIL-50 is 175.3 and for TCF-56 it is 1891.2. Therefore, in case of TCF-56, the magnetic mechanism produces convection as it satisfies the instability criteria, $N_{Ra} > 1708$.

In practical situation, the flow rate inside the transformer can be in all the directions, i.e., horizontal, vertical or oblique, each of them will have its characteristic length scale, and the resultant of these effect is the thermo convective flow. The thermo convective instability of magnetic fluid is calculated by considering a resultant effect produced by linearization of the equation of motion, the equation of heat conduction and the equation of continuity. The effective Rayleigh number, $R_a(\text{eff})$, thus simplified after neglecting the contribution from adiabatic expansion and the magnetocaloric term and is given as [23,38].

$$R_a(\text{eff}) = \frac{\rho c_p A_0 d^4}{\eta \lambda} \left(\beta_0 \rho g + \mu_0 M \frac{\partial M}{\partial T} \frac{dH}{dz} \right) \quad (2)$$

The value of effective Rayleigh number for the TCF-56 is 1.98×10^3 that is very high compared to the flow rate of conventional oil. Thus, the use of coolant fluid results into the faster heat dissipation compared to the pure oil.

Thus TCF-56 offers promising advantages for the use of coolant fluid for reducing the 'hot spot' from the core and preventing the early breakdown of the insulating medium of the transformer even a continuous operation of 167% overloading condition.

3.2. Normal life expectancy calculation

Aging or deterioration of insulation is a function of temperature, moisture, and oxygen content. With modern oil preservation systems, the moisture and oxygen (contributes to deterioration of insulation life) can be minimized, leaving the insulation temperature as the controlling parameter. In aging studies, general tendency is to consider the aging effects produced by the highest temperature (hot spot), as that portion will ordinarily undergo higher deterioration. Normal life expectancy in a distribution transformer at a continuous hot spot temperature of 383 K is reported as 20.55 years, equivalent to 1,80,000 h [1]. Experimental evidence indicates that the insulation deterioration with time and temperature follows a theory of Arrhenius reaction rate. This theory relates the accelerated aging factor, F_{AA} to a hot spot temperature given as [1,39,40].

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15,000}{383} - \frac{15,000}{\Theta_H + 273} \right]} \quad (3)$$

where, Θ_H is the winding hot spot temperature. The per unit transformer insulation life can be calculated using aging acceleration factors either for a given load and temperature or in a varying load and temperature profile over a 24 h period. The above equation is used to calculate the equivalent aging of the transformer, F_{EQA} , at the reference temperature in a given time period for the given temperature cycle.

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA,n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (4)$$

Here, $F_{AA,n}$ is aging acceleration factor of temperature that exists during the time interval Δt_n , n is time interval index, N is number of time intervals. The percentage loss of total life in 24 h time period is given by

$$\% \text{ Loss of Life} = \frac{F_{EQA} \times t \times 100}{\text{Normal Insulation Life}} \quad (5)$$

The percentage loss of life is calculated using equation (5) and hot spot temperature value obtained using winding temperature ($\Theta_H = (T_{\text{winding}} - T_{\text{ambient}}) \times 0.1 + T_{\text{winding}}$). Under 167% overloading condition with an operation of 24 h insulation degradation reduces the normal life of a transformer by 27 days in case of pure oil while only 3 days in TCF-56. This clearly shows that by using magnetic fluid, the reduction in hot spot temperature by 21 K improves normal life of a transformer by nine times.

4. Conclusion

A Mn–Zn ferrite magnetic fluid (TCF-56) is used in a 3 kW prototype transformer as a coolant to study the temperature profile within the transformer. TCF-56 shows almost 14 K and 21 K temperature reduction at transformer core and winding, respectively compared to transformer oil. The difference in temperature was explained using the Rayleigh number. The normal life of transformer is calculated (as indicated in IEEE Standards) by considering 24 h overloading condition. The normal life of a transformer increases nearly nine times when magnetic fluid is used. This shows that magnetic fluid has potential to reduce/prevent the rise of hot spot temperature which enables it to deliver more power than its nameplate rating with an improved normal life.

Acknowledgment

The work has been carried out under the DST/TSG/161-G Project sponsored by DST, Govt. of India, New Delhi.

References

- [1] IEEE Std C57.91™, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators, IEEE Power & Energy Society, USA, 2011.
- [2] Facilities Instructions, Standards, and Techniques, Permissible Loading of Oil-Immersed Transformers and Regulators, vol. 1–5, April 1991.
- [3] K. Raj, R. Moskowitz, Ferrofluid-Cooled Electromagnetic Device and Improved Cooling Method, US patent US5,462,685, 1995.
- [4] V. Segal, D. Nattrass, K. Raj, D. Leonard, Accelerated thermal aging of petroleum-based ferrofluids, *J. Magn. Magn. Mater.* 201 (1999) 70–72.
- [5] V. Segal, A. Rabinovich, D. Nattrass, K. Raj, A. Nunes, Experimental study of magnetic colloidal fluids behavior in power transformers, *J. Magn. Magn. Mater.* 215–216 (2000) 513–515.
- [6] V. Segal, K. Raj, An investigation of power transformer cooling with magnetic fluids 5 (1998) 416–422.

- [7] V. Segal, A. Hjortsberg, A. Rabinovich, D. Natrass, K. Raj, AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles, in: Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, June 7–10, 1998, pp. 619–622.
- [8] J.C. Lee, W.Y. Kim, Experimental study on the dielectric breakdown voltage of the insulating oil mixed with magnetic nanoparticles, *Phys. Procedia* 32 (2012) 327–334.
- [9] B. Berkovsky, V. Bashtovoi (Eds.), *Magnetic Fluids and Applications Handbook*, Begell House, New York, 1996, p. 831.
- [10] D. Bica, Preparation of magnetic fluid for various applications, *Rom. Rep. Phys.* 47 (1995) 265–272.
- [11] M. Chiesa, S.K. Das, Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Aspects* 335 (2009) 88–97.
- [12] I. Nkurikiyimfura, Y. Wang, Z. Pan, Heat transfer enhancement by magnetic nanofluids—a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 21 (2013) 548–561.
- [13] M. Timko, P. Kopcansky, M. Molcan, L. Tomco, K. Marton, S. Molokac, P. Rybar, F. Stoian, S. Holotescu, A. Taculescu, Magnetodielectric properties of transformer oil based magnetic fluids, *Acta Phys. Pol. A* 121 (2012) 5–6.
- [14] G.Y. Jeong, S.P. Jang, H.Y. Lee, J.C. Lee, S. Choi, S.H. Lee, Magnetic-thermal-fluidic analysis for cooling performance of magnetic nanofluids comparing with transformer oil and air by using fully coupled finite element method, *IEEE Trans. Magn.* 49 (5) (2013) 1865–1868.
- [15] K. Parekh, R.V. Upadhyay, Characterization of transformer oil based magnetic fluid, *Indian J. Eng. Mater. Sci.* 11 (2004) 262–266.
- [16] F.D. Stoian, S. Holotescu, A. Taculescu, O. Marinica, D. Resiga, M. Timko, P. Kopcansky, M. Rajnak, Characteristic properties of a magnetic nanofluid used as cooling and insulating medium in a power transformer, in: The 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, 2013, ISBN 978-1-4673-5980-1.
- [17] V. Segal, *Colloidal Insulating and Cooling Fluid*, US patent 5,863,455, 1999.
- [18] F.D. Stoian, Experimental study of cooling enhancement using a Fe_3O_4 magnetic nanofluid in an applied magnetic field, *J. Phys. Conf. Ser.* 547 (2014) 012044.
- [19] T. Cader, S. Bernstein, C. Crowe Pullman, *Magnetic Fluid Cooler Transformer*, US patent 5,898,353, 1999.
- [20] A.M. Morega, M. Morega, G. Mihoc, C. Iacob, L. Pîslaru-Dănescu, V. Stoica, F. Nourăş, F.D. Stoian, A novel, ferrofluid-cooled transformer electromagnetic field and heat transfer by numerical simulation, in: 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2010.
- [21] L. Pîslaru-Dănescu, A.M. Morega, M. Morega, V. Stoica, O.M. Marinică, F. Nourăş, N. Păduraru, I. Borbăth, T. Borbăth, Prototyping a ferrofluid-cooled transformer, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 49 (3) (2013) 1289–1298.
- [22] R.E. Rosensweig, Magnetic fluids, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 19 (1987) 437–453.
- [23] R.A. Curtis, Flows and wave propagation in ferrofluids, *Phys. Fluids* 14 (10) (1971) 2096–2102.
- [24] M. Bahiraei, S.M. Hosseinalipour, M. Hangi, Numerical study and optimization of hydrothermal characteristics of Mn–Zn ferrite nanofluid within annulus in the presence of magnetic field, *J. Supercond. Nov. Magn.* 27 (2014) 527–534.
- [25] M. Bahiraei, M. Hangi, Natural convection of magnetic nanofluid in a cavity under non-uniform magnetic field: a novel application, *J. Supercond. Nov. Magn.* 27 (2014) 587–594.
- [26] M. Bahiraei, M. Hangi, Investigating the efficacy of magnetic nanofluid as a coolant in double-pipe heat exchanger in the presence of magnetic field, *Energy Convers. Manag.* 76 (2013) 1125–1133.
- [27] R.E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, Dover Publications, 1997.
- [28] K. Parekh, R.V. Upadhyay, Temperature dependence of magnetization of magnetic fluid using Quincke's method, *Indian J. Pure Appl. Phys.* 35 (1997) 523–528.
- [29] K. Parekh, R.V. Upadhyay, R.V. Mehta, Magnetocaloric effect in temperature-sensitive magnetic fluids, *Bull. Mater. Sci.* 23 (2000) 91–95.
- [30] A.K. Starace, J.C. Gomez, J. Wang, S. Pradhan, G.C. Glatzmaier, Nanofluid heat capacities, *J. Appl. Phys.* 110 (2011), 124323-1-5.
- [31] S. Chikazum, *Physics of Ferromagnetism*, Clarendon Press, Oxford, 1997, p. 605.
- [32] J.G. Hwang, M. Zahn, F.M. O'Sullivan, L.A.A. Pettersson, O. Hjortstam, R. Liu, Effects of nanoparticle charging on streamer development in transformer oil-based nanofluids, *J. Appl. Phys.* 107 (2010), 014310-1-17.
- [33] M.I. Shliomis, Magnetic fluids, *Sov. Phys. Usp.* 17 (2) (1974) 153–159.
- [34] B.M. Berkovsky, V. Bashtovoi, Instabilities of magnetic fluids leading to a rupture of continuity, *IEEE Trans. Magn.* 16 (2) (1980) 288–297.
- [35] E.L. Resler Jr., R.E. Rosensweig, Magnetocaloric power, *AIAA J.* 2 (8) (1964) 1418–1422.
- [36] H. Matsuki, K. Yamasawa, K. Murakami, Experimental considerations on a new automatic cooling device using temperature-sensitive magnetic fluid, *IEEE Trans. Magn.* 13 (5) (1977) 1143–1145.
- [37] B.A. Finlayson, Convective instability of ferromagnetic fluids, *J. Fluid Mech.* 40 (4) (1970) 753–767.
- [38] R.E. Rosensweig, Fluid dynamics and science of magnetic liquids, *Adv. Electron. Electron Phys.* 48 (1979) 103–199.
- [39] PN-71/E-81000 transformers loading of oil-immersed transformers.
- [40] N. Rashid, Short-Time Overloading of Power Transformers (Master thesis), 2011. Stockholm, Sweden.

DOCUMENTO N°. PLANOS

Índice documento nº3:

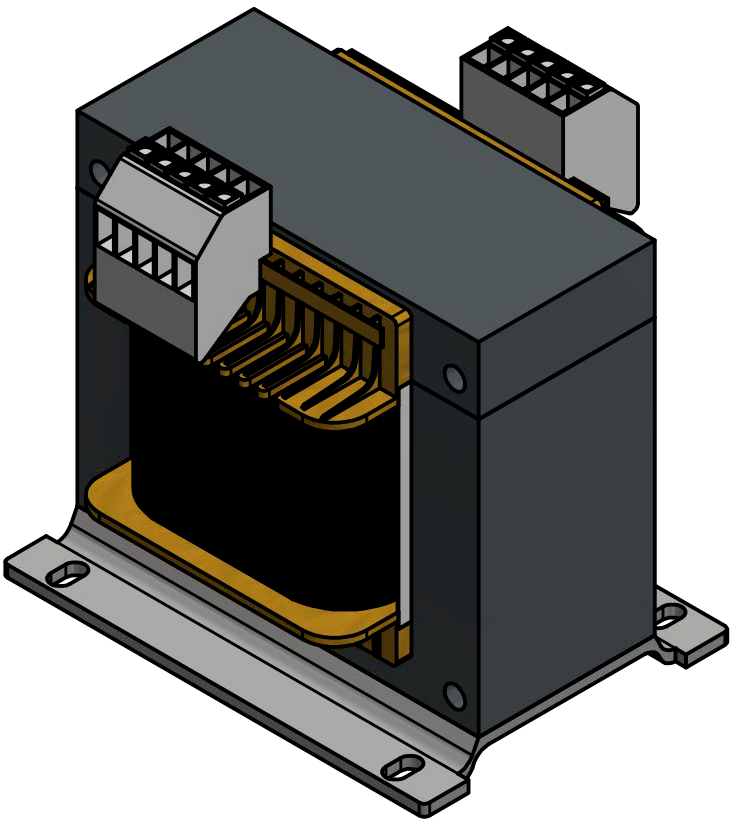
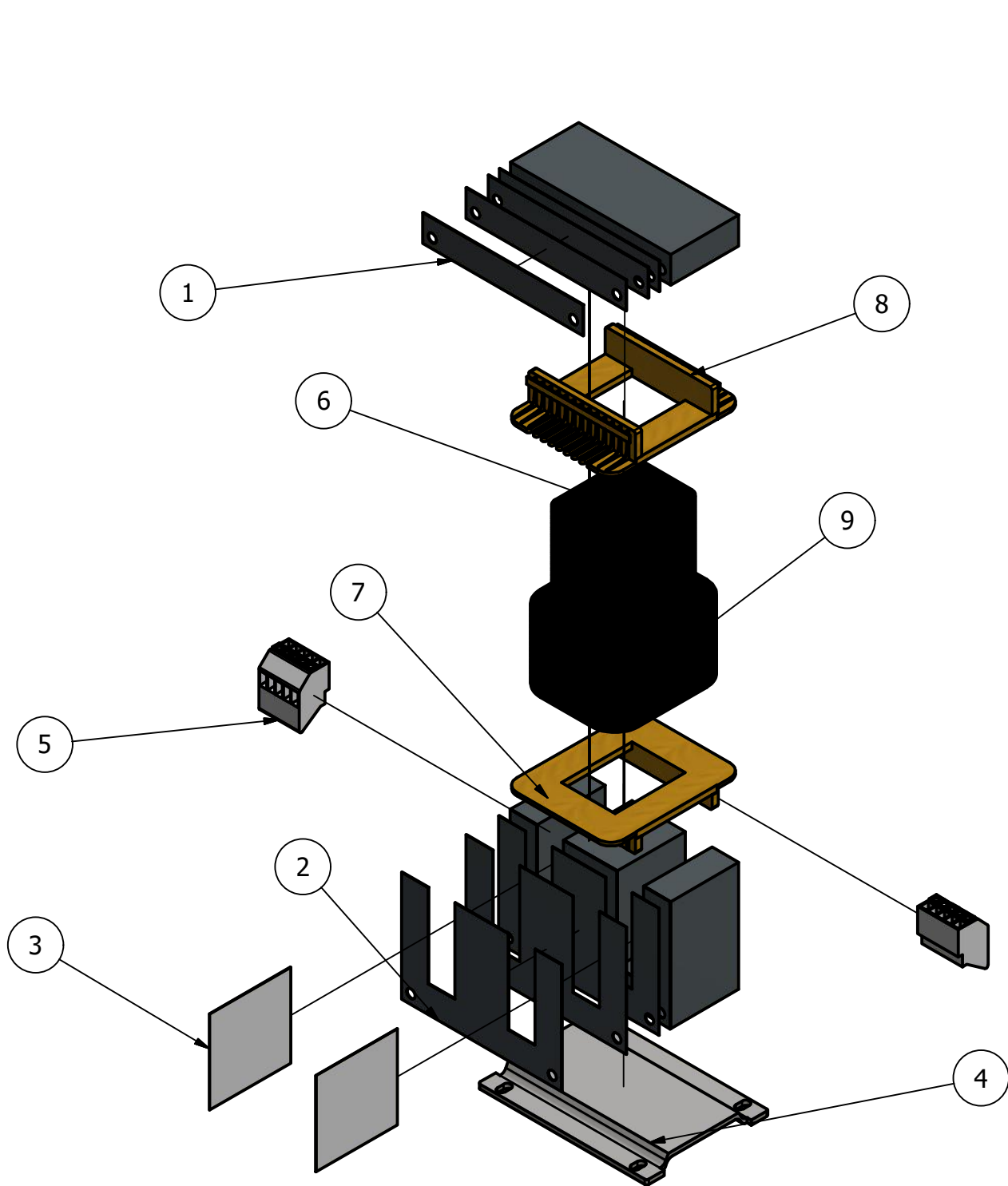
PLANO Nº1. Explosión del transformador.

PLANO Nº2. Vistas 01.

PLANO Nº3. Vistas 02.

PLANO Nº4. Vistas 03.

PLANO Nº5. Vistas 04.

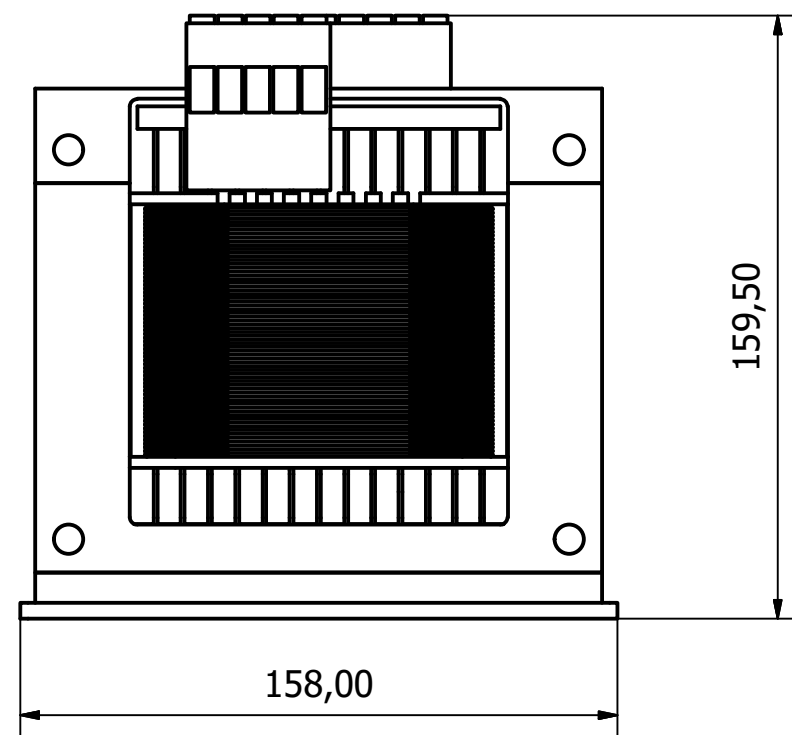


LISTA DE COMPONENTES				
ELEMENTO	CANTIDAD	COMPONENTE		
1	120	Chapa_Nucleo_Superior		
2	120	Chapa_Nucleo_Inferior		
3	2	Aislante_Lateral		
4	1	Soporte		
5	2	Clemas		
8	1	Tapa_Superior_Devanados		
7	1	Tapa_Inferior_Devanados		
6	1	Devanado_Baja_Tensión		
9	1	Devanado_Alta_Tensión		
		Tipo de documento		Creado por:
		PLANOS TRANSFORMADOR		Francisco José Iglesias Ruiz
		Título. Título suplementario		Aprobado por
		Explosión del transformador		Rev.
		Referencia técnica		Idioma
				ES
		Fecha	Nº de Plano (Titulación)	Hoja
			01	

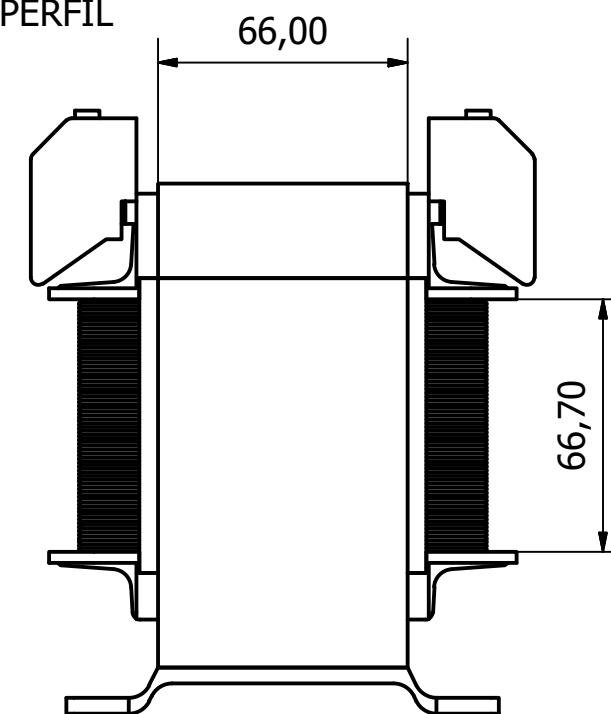
Escala 1:4



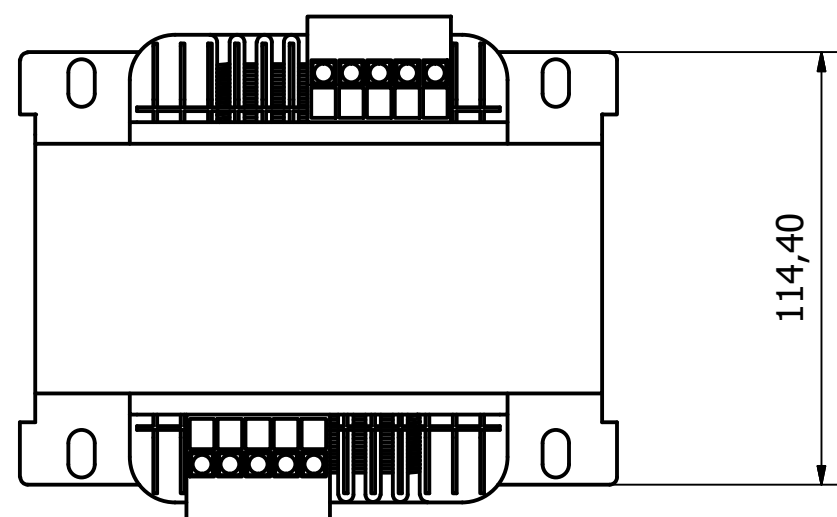
ALZADO



PERFIL

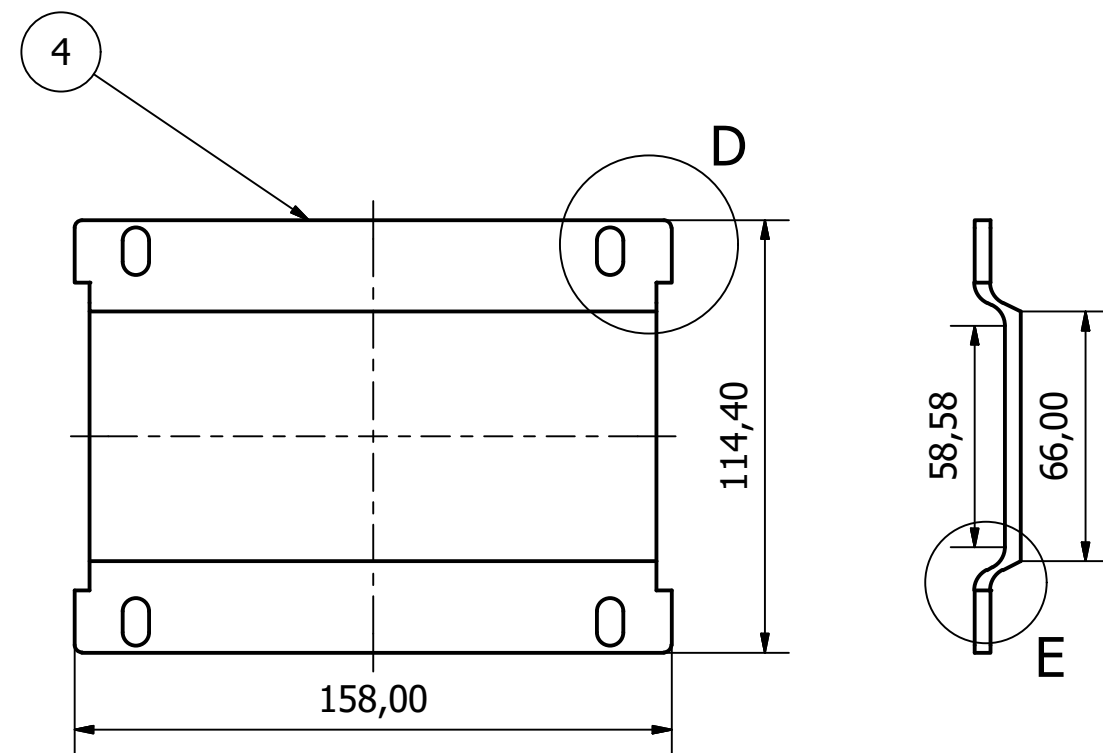
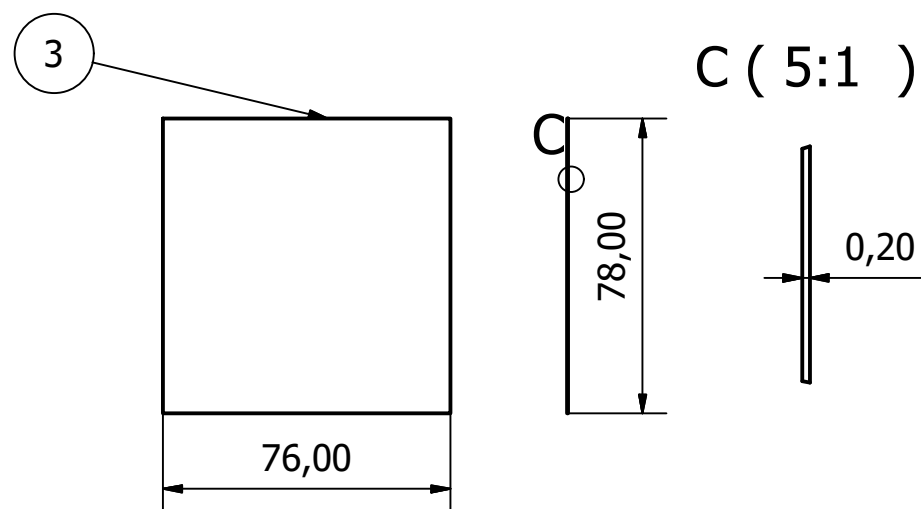
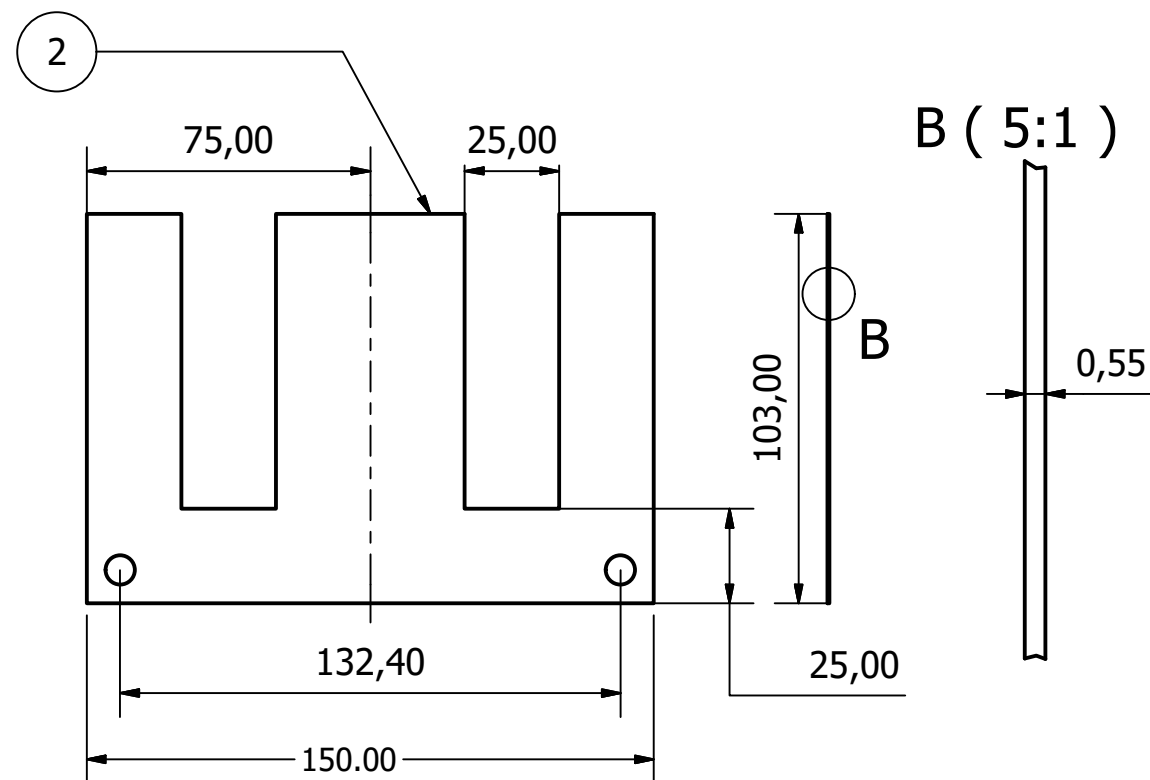
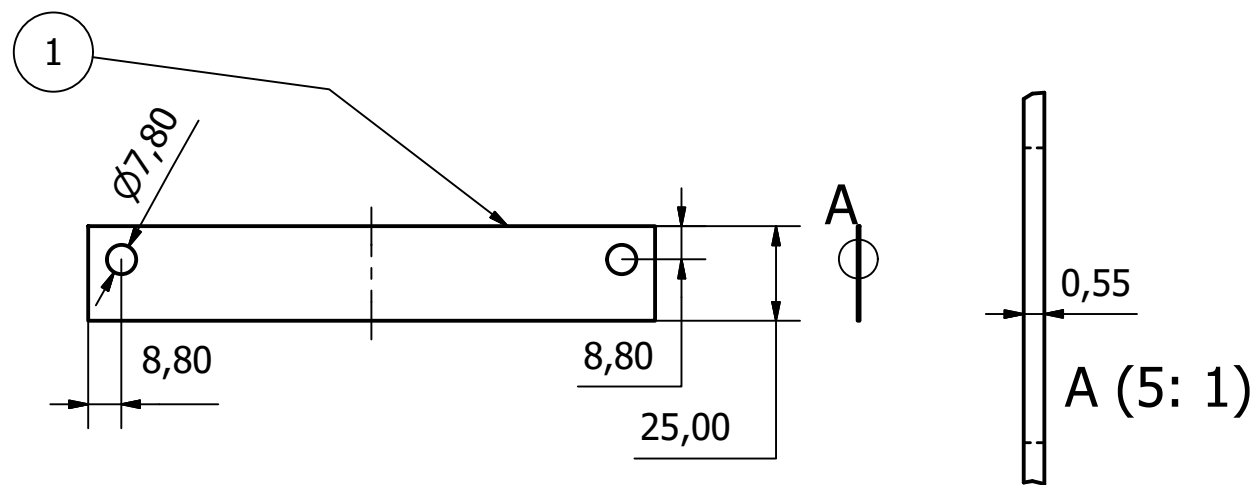


PLANTA



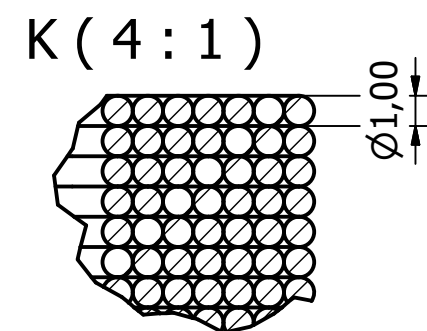
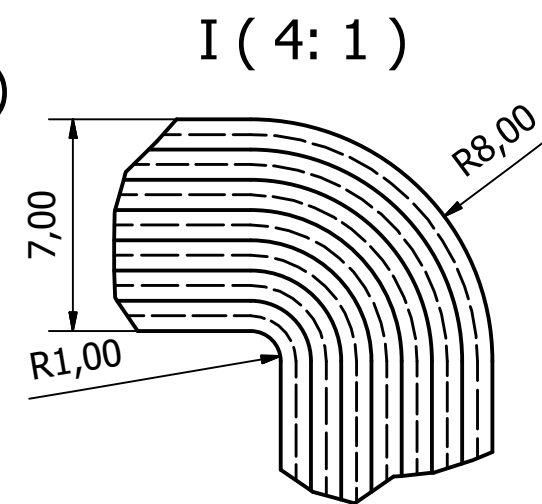
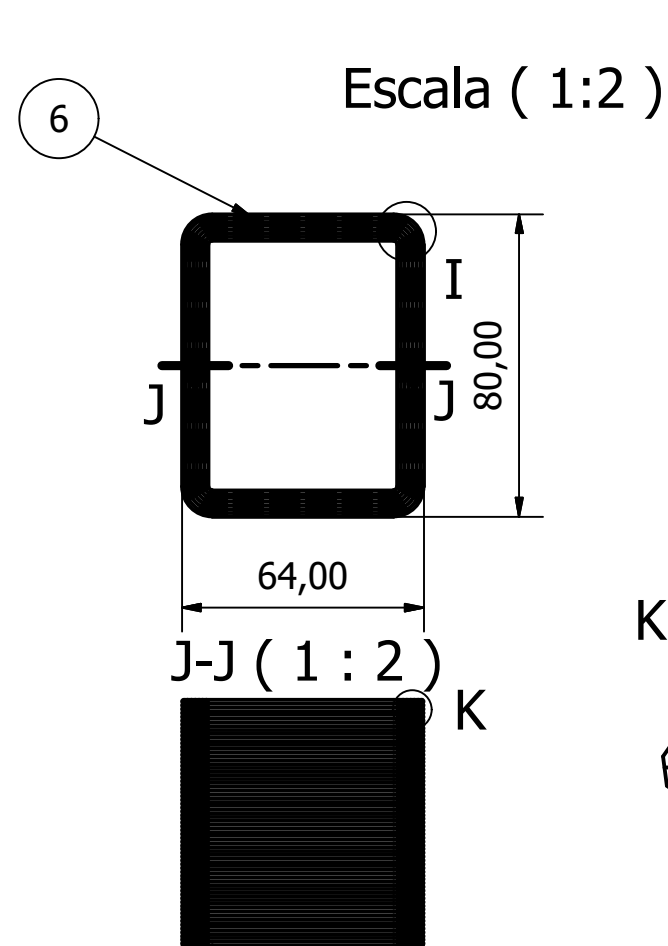
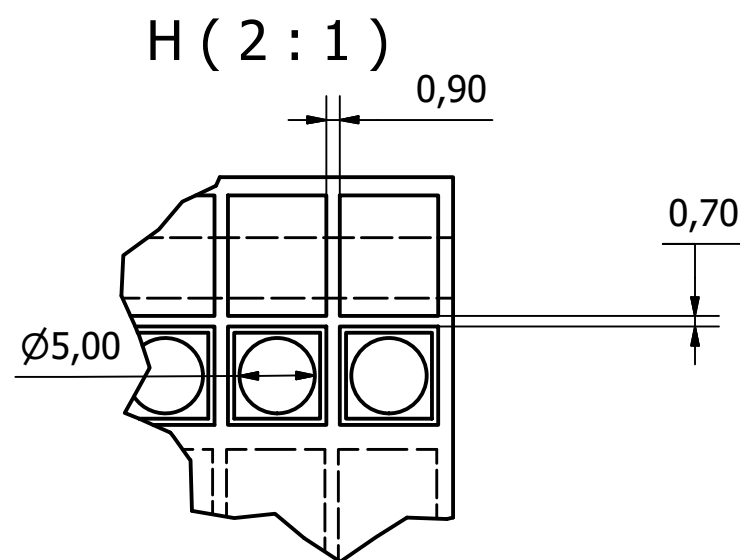
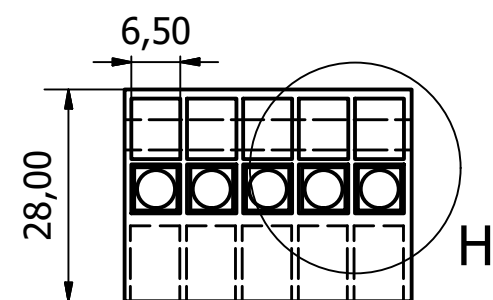
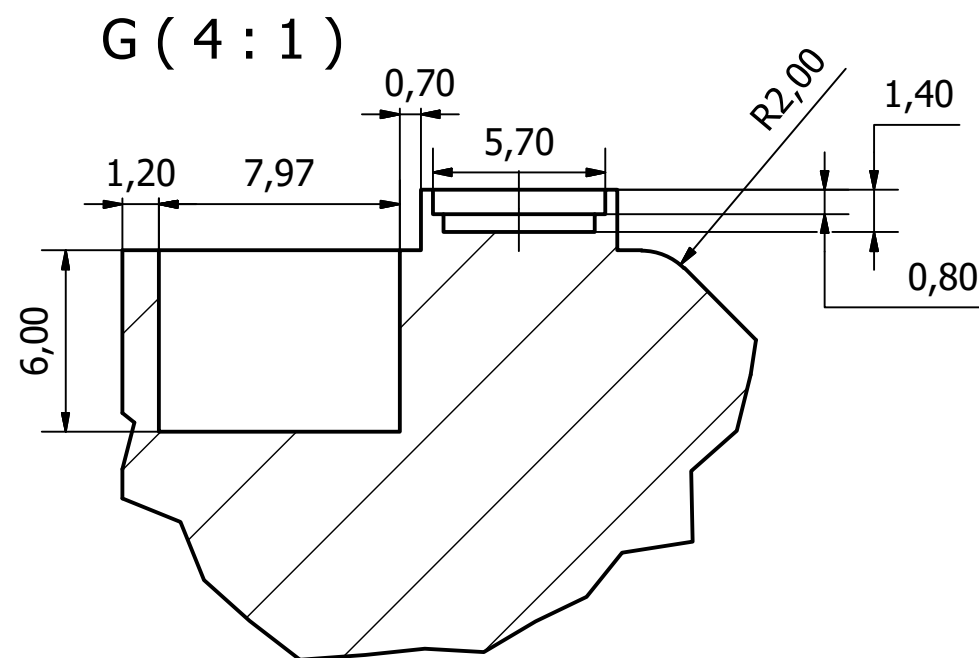
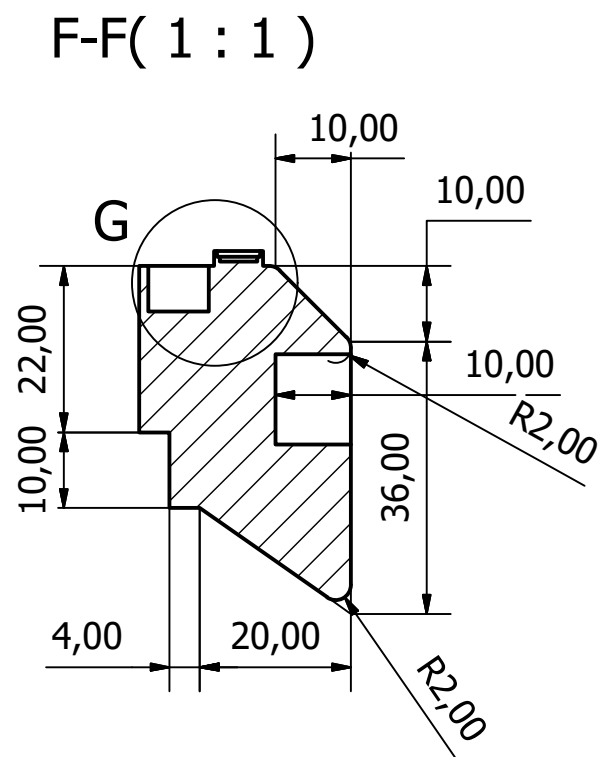
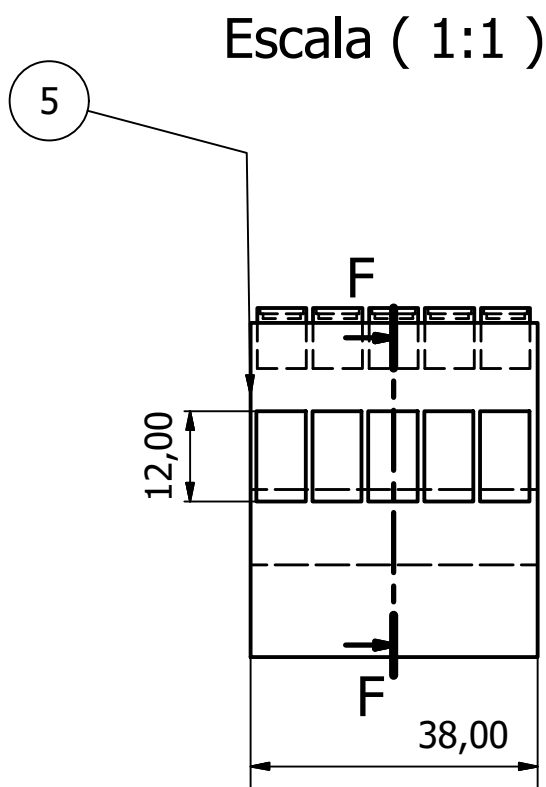
Escala 1:2

E.T.S.I Industriales T.	Tipo de documento PLANOS TRANSFORMADOR		Creado por: Francisco José Iglesias Ruiz	
	Título. Título suplementario Vistas Generales		Aprobado por	Rev.
			Referencia técnica	Idioma ES
			Fecha	Nº de Plano (Titulación) 02 Hoja

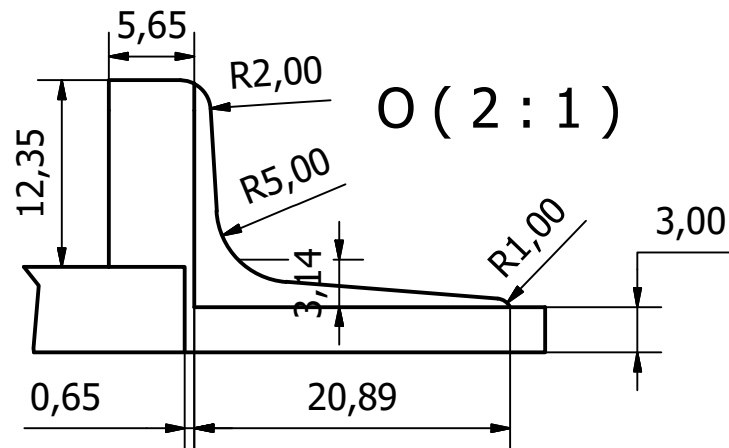
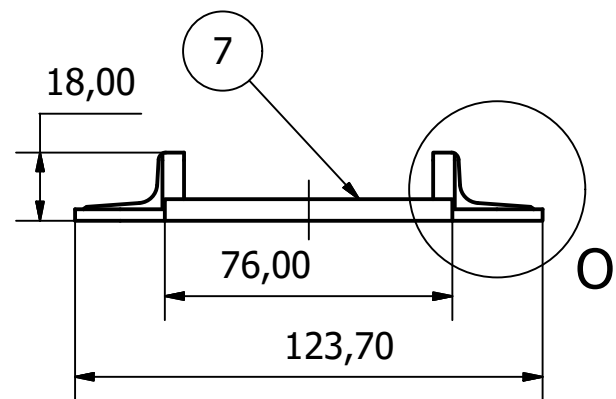


Escala 1:2

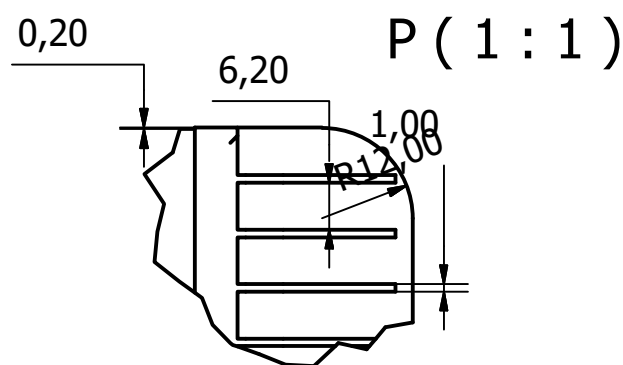
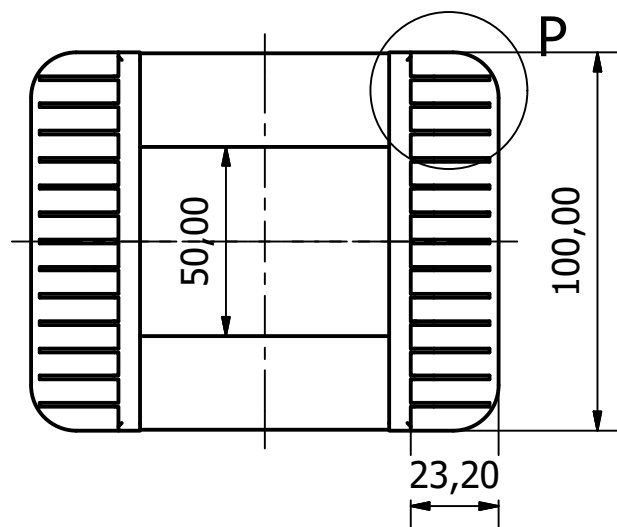
E.T.S.I Industriales T. UC UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	Tipo de documento		Creado por:	
	PLANOS TRANSFORMADOR		Francisco José Iglesias Ruiz	
	Título. Título suplementario		Aprobado por	Rev.
	Vistas representativas de los elementos del transformador		Referencia técnica	Idioma
		Fecha	Nº de Plano (Titulación)	Hoja
			03	



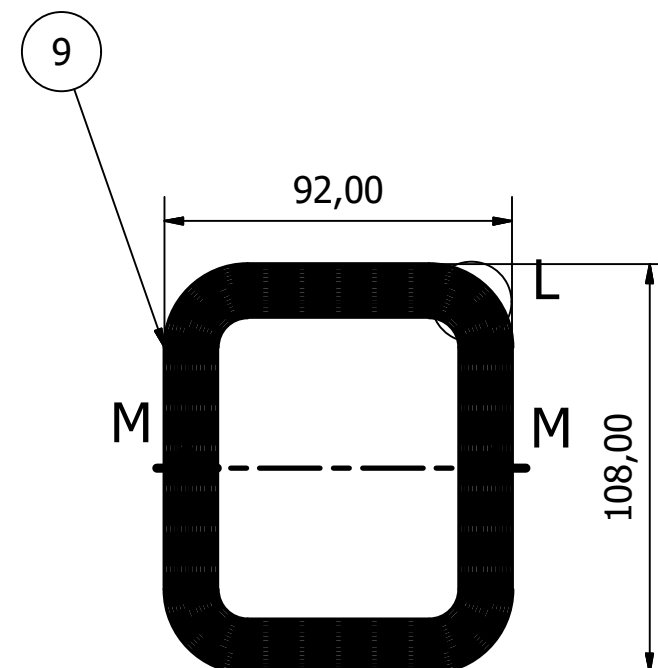
E.T.S.I Industriales T. UC UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	Tipo de documento PLANOS TRANSFORMADOR	Creado por: Francisco José Iglesias Ruiz	
		Aprobado por	
		Referencia técnica	
		Idioma ES	
Escala	Título. Título suplementario Vistas representativas de los elementos del transformador	Fecha	
		Nº de Plano (Titulación) 04	



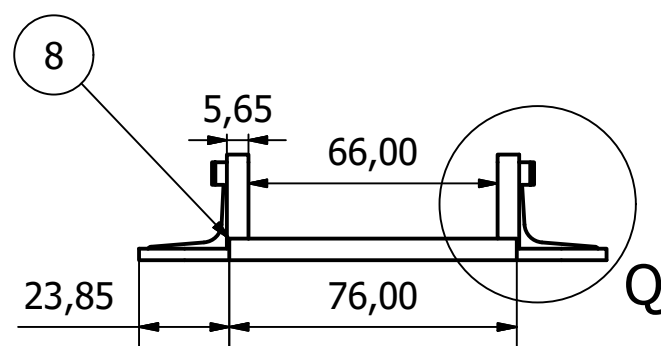
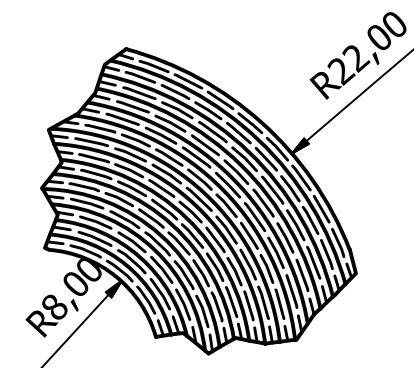
O (2 : 1)



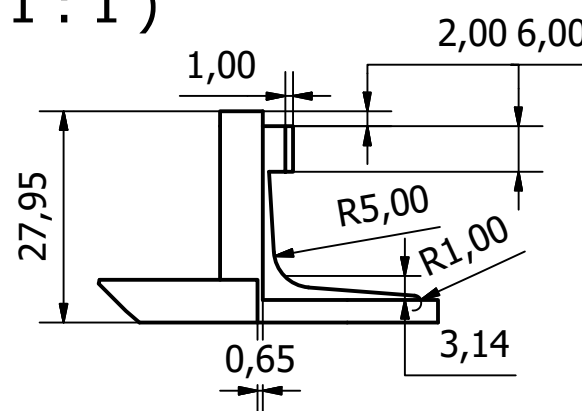
P (1 : 1)



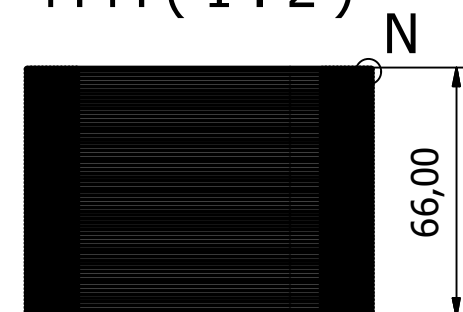
L (2 : 1)



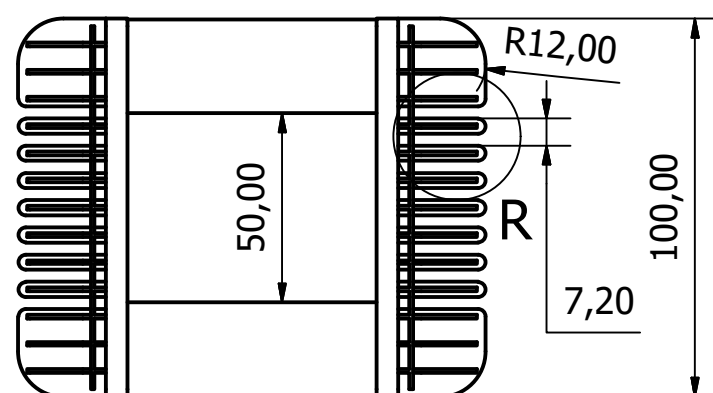
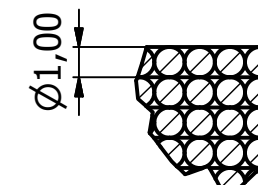
Q (1 : 1)



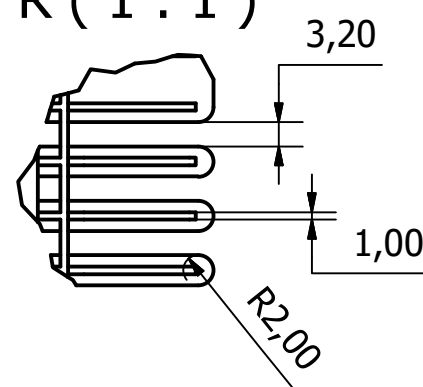
M-M (1 : 2)



N (4 : 1)



R (1 : 1)



E.T.S.I Industriales T. UC UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	Tipo de documento		Creado por:	
	PLANOS TRANSFORMADOR		Francisco José Iglesias Ruiz	
	Título. Título suplementario		Aprobado por	Rev.
	Vistas representativas de los elementos del transformador		Referencia técnica	Idioma
Fecha		Nº de Plano (Titulación)		Hoja
		05		

Escala 1:2

