

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y
ENERGÍA

TRABAJO FIN DE GRADO

Modelización numérica de plataforma experimental para determinación de la capacidad refrigerante de líquidos dieléctricos.

Numerical modelling of the experimental setup for the
determination of the cooling capacity of dielectric liquids



AUTOR: SANDRA CUESTA GUTIÉRREZ

DIRECTOR DE PROYECTO: FERNANDO DELGADO

COORDINADOR: RAÚL HUSILLOS

FECHA: 22/02/2017

Agradecimientos:

Me gustaría aprovechar estas líneas para agradecer todo el apoyo recibido durante estos años, a mi padre y a mi marido por que sin ellos nunca hubiese empezado esta carrera, a mi madre y a mi hermana por animarme a acabarla, a mis compañeros y profesores de la escuela en especial a mi tutor.

Gracias por tanto.

Índice general

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 2: OBJETIVO	6
CAPÍTULO 3: ANTECEDENTES	7
CAPÍTULO 4: PRINCIPIOS BÁSICOS	13
4.1 TRANSFORMADORES.....	13
4.1.1 Definición	13
4.1.2 Aspectos constructivos.....	13
4.1.3 Principio de funcionamiento	17
4.1.4 Pérdidas en los transformadores	19
4.1.5 Sistemas de refrigeración.....	19
4.1.4.5 Líquidos refrigerantes.....	25
4.2 FERROFLUIDOS	27
4.2.1 Introducción	27
4.2.2 Curva de magnetización- Ecuación de Langevin	29
4.2.3 Saturación magnética	35
4.2.4 Fracción volumétrica.....	36
4.2.5 Susceptibilidad magnética	38
4.2.6 Rango del diámetro de las partículas ferromagnéticas	39
4.2.6.1 Diámetro magnético medio.....	39
4.2.6.2 Diámetro mínimo	39
4.2.6.3 Diámetro máximo.....	40
CAPÍTULO 5: EXPERIMENTO PREVIO	43
CAPÍTULO 6: DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	47

6.1 MODELO GEOMÉTRICO	47
6.2 MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO	52
6.2.1 <i>Parámetros globales</i>	52
6.2.2 <i>Características de los materiales</i>	53
6.2.3 <i>Condiciones iniciales y de contorno</i>	59
6.2.4 <i>Ecuaciones</i>	67
6.2.5 <i>Mallado</i>	70
6.2.6 <i>Multifísica</i>	73
6.2.7 <i>Estudio</i>	73
CAPÍTULO 7: RESULTADOS OBTENIDOS.....	76
7.1 VALORES DERIVADOS Y TABLAS	76
7.2 DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO	77
7.3 TEMPERATURA	78
7.4 VELOCIDAD	81
7.5 PRESIÓN.....	83
7.6 GRÁFICO DE TENSIONES.....	85
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES	86
CAPÍTULO 9: LÍNEAS DE DESARROLLO FUTURAS	87
REFERENCIAS	88

Capítulo 1: Introducción

En la actualidad, los transformadores eléctricos tienen un papel fundamental en la red de suministro de energía. Debido a la naturaleza de su operación, los transformadores eléctricos suelen estar expuestos a duras condiciones de trabajo, esto sumado a posibles sobrecalentamientos procedentes de sobrecargas o corrientes de cortocircuito puede llegar a acortar la vida útil de la máquina.

Debido a esto, se está empezando a estudiar las propiedades físico-químicas de los aceites usados en transformadores con la finalidad de mejorar su capacidad dieléctrica y refrigerante mediante la posible adición de nanopartículas magnéticas.

En este contexto, el grupo de investigación en transformadores eléctricos de potencia de la Universidad de Cantabria (GITEP) ha llevado a cabo una plataforma experimental monitorizada térmicamente utilizando un transformador de 0,8 KVA que ha sido sumergido en una cuba para lograr la comparación de las propiedades de varios líquidos dieléctricos con y sin magnetita.

Capítulo 2: Objetivo

En un transformador refrigerado por aceite, el mecanismo de transferencia de calor se basa en la ley de Arquímedes, pero en ocasiones es insuficiente y poco eficiente, debido a lo cual se observa un gran aumento de temperatura en el aceite de la cuba que contiene al transformador, originando regiones localizadas de temperatura intensa en el núcleo y los devanados, denominadas puntos calientes.

El objetivo inicial de este estudio es el desarrollo de un modelo geométrico-numérico fluido-térmico-magnético lo más aproximado posible de la plataforma experimental citada anteriormente que determine la capacidad refrigerante de diversos líquidos dieléctricos (aceite mineral, esteres naturales y sintéticos). Para llevar a cabo el modelo y conseguir que este aporte resultados el modelo simulado difiere en diversos aspectos tanto geométricos como numéricos de la plataforma del experimento.

El presente estudio se centra en el régimen permanente del experimento. Es decir, el tipo de estudio a realizar es estacionario.

El objetivo secundario es sentar un modelo base para valorar la adición de nanopartículas magnéticas (ferrofluidos) en estudios posteriores.

Capítulo 3: Antecedentes

Este capítulo trata sobre trabajos previos al presente.

El presente trabajo está basado en otro realizado en el año 2016 titulado “Prevention of hot spot temperature in a distribution transformer using magnetic fluid as a coolant” (1) en el cual se diseña un ferrofluido dopando el aceite refrigerante TASHOIL-50 con nanopartículas de ferrita, compuesta a su vez por manganeso y zinc.

Este ferrofluido el cual ha sido denominado TCF-56 tiene una temperatura de Curie de 380 K, cercana a la temperatura de operación del dispositivo, que en este caso es un transformador monofásico de 3 kVA (230V, 13A).

La magnetización del ferrofluido ha sido medida con un magnetómetro y después ajustada a la ecuación de Langevin para a partir de ella obtener la susceptibilidad magnética, la saturación magnética, la fracción volumétrica y el rango de las partículas ferromagnéticas.

En la figura 3.1 se observan las propiedades fundamentales de ambos refrigerantes.

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

Figura 3.1: Tabla comparativa de las propiedades de los dos refrigerantes a 303 K.

(1)

Donde:

- ρ , densidad.
- ϕ , fracción volumétrica.
- M_s , saturación magnética.
- $\partial M/\partial T$, coeficiente piro-magnético.
- β_0 , coeficiente de expansión térmica.
- λ , conductividad térmica.
- C_p , calor específico.
- η , viscosidad dinámica.

El transformador prototipo usado y citado anteriormente es un modelo estándar y la cuba que lo contiene ha sido diseñada expresamente para llevar a cabo el experimento.

El núcleo del transformador se compone de láminas de acero laminadas en frío, con una sección central de $2,58 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. Para los devanados se utiliza alambre de cobre que

enrollado forma las bobinas del primario y del secundario. La cuba que contiene al transformador es de acero dulce de 6 mm de espesor con una capacidad de volumen de 3,5 l del aceite del transformador. La salida del transformador se conectó a 3 resistencias, cada una de 2,5 kW de potencia nominal. La distribución de la temperatura en el transformador se ha medido mediante 4 sensores de temperatura (TC1, TC2, TC3, TC4) bajo condiciones de sobrecarga (167%), sumergiendo el transformador en el TASHOIL-50 y el ferrofluido TCF-56, por separado.

En condiciones de sobrecarga las sobreelevaciones de temperatura de los devanados son más altas que las que corresponden al funcionamiento en condiciones de carga normal.

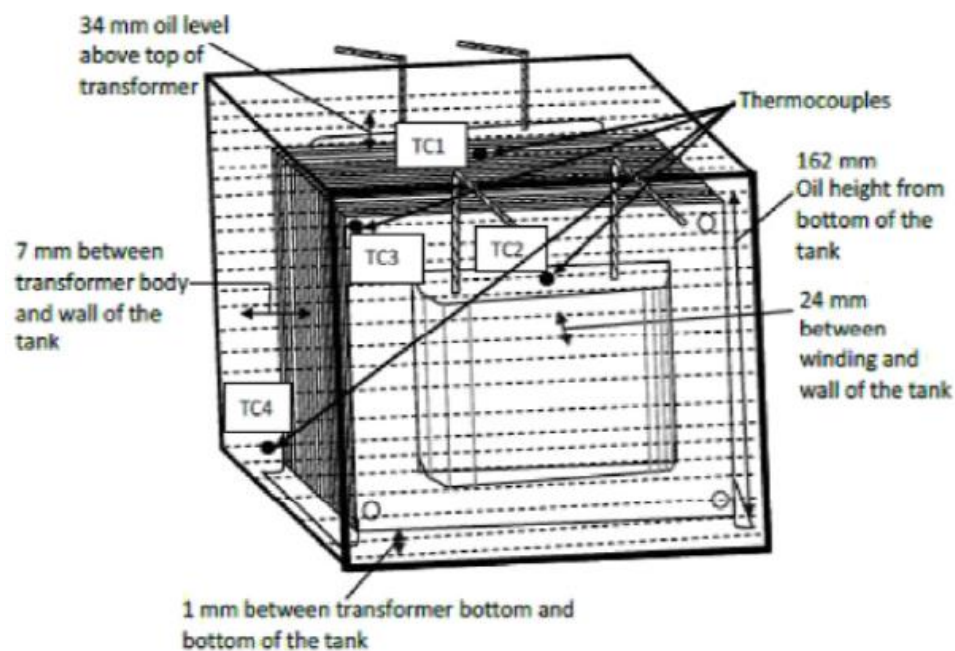


Figura 3.2: Esquema de la situación de los sensores de temperatura. (1)

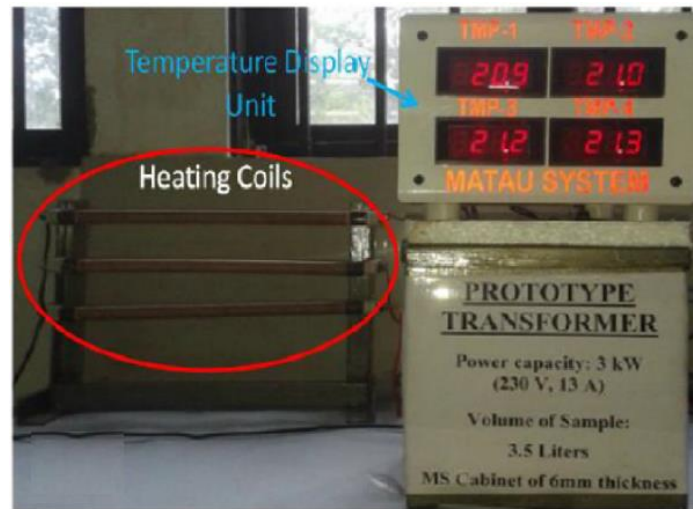


Figura 3.3: Vista exterior del transformador dentro de la cuba, las resistencias que alimenta y la pantalla con las temperaturas medidas por los sensores de temperatura. (1)

Los devanados del transformador conforman un punto de campo magnético y temperatura máximos ya que la temperatura del fluido se ve incrementada en este punto debido al calor generado por el dispositivo, creándose de esta manera un gradiente de campo magnético ∇H y un gradiente de temperatura ∇T .

A medida que aumenta la temperatura se reducen las propiedades magnéticas del fluido, así como su densidad, como el fluido que está localizado en el exterior de los devanados está relativamente más frío y magnéticamente es más fuerte, se crean un gradiente de densidad $\nabla \rho$ y un gradiente de magnetización ∇M .

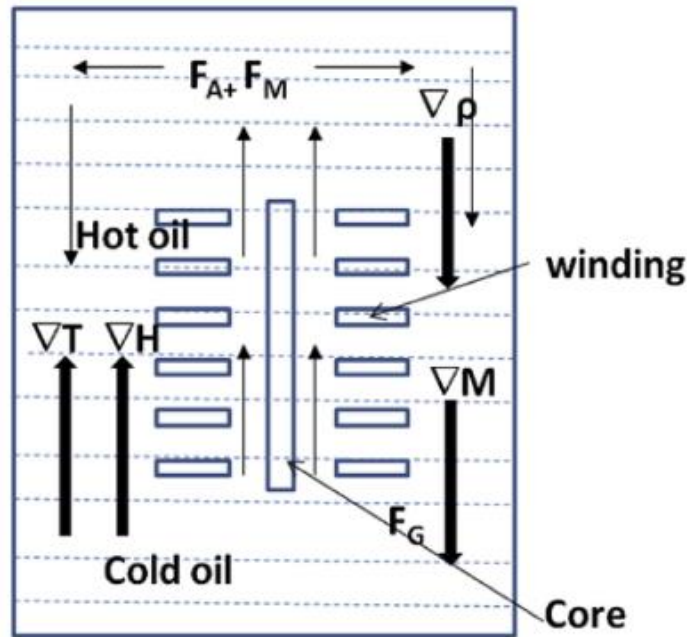


Figura 3.4: Esquema de los gradientes que se crean dentro de la cuba y del transformador, de la fuerza de convección natural (F_A) y de la fuerza de flotabilidad magnética (F_M). (1)

Por lo tanto, el fluido que se encuentra en las zonas más frías de transformador es atraído hacia los devanados, desplazando el fluido caliente hacia el exterior de estos.

El fluido caliente disipa su calor cuando entra en contacto con las paredes exteriores de la cuba y se vuelve más denso de nuevo, recuperando de este modo sus propiedades magnéticas.

Así, a la fuerza de convección natural debida a la ley de Arquímedes, F_A , se le suma la fuerza de flotabilidad magnética, F_M , lo que se traduce en una mejora de la transferencia

de calor que puede llegar a incrementar hasta en 9 veces la vida útil del transformador debido a la prevención y/o reducción de los puntos calientes.

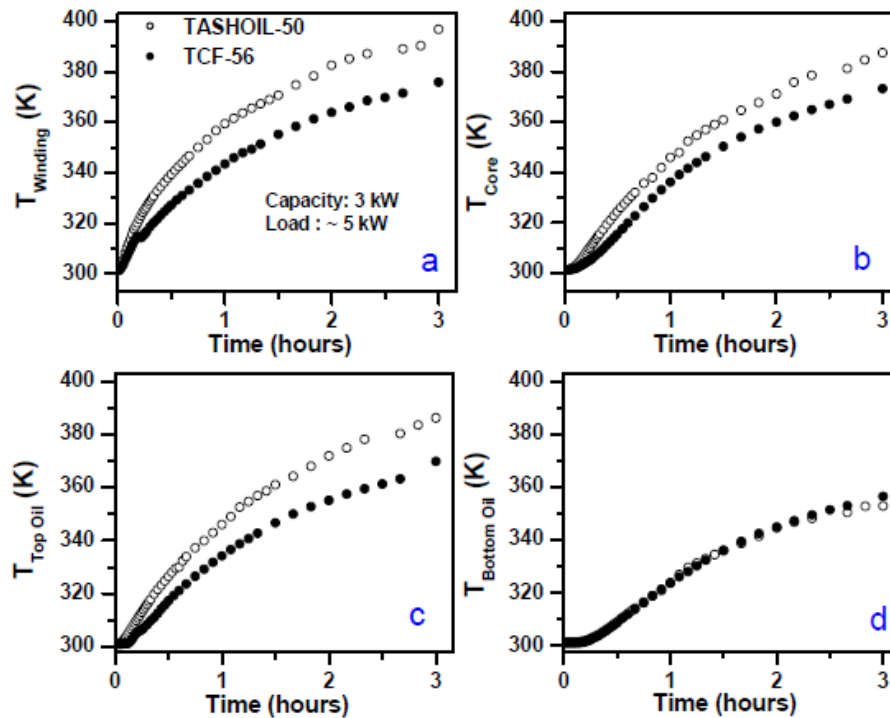


Figura 3.5: Temperatura captada por los 4 sensores (TC1, TC2, TC3, TC4) en función del tiempo. (1)

Capítulo 4: Principios básicos

4.1 Transformadores

4.1.1 Definición

El transformador es un dispositivo eléctrico estático, destinado a funcionar con corriente alterna, constituido por dos arrollamientos, primario y secundario, que, por medio de la inducción electromagnética, permite transformar una energía con una determinada tensión e intensidad en otra energía con tensión e intensidad diferentes. (2)

El arrollamiento de mayor tensión se denomina devanado de alta tensión y el de menor tensión es denominado devanado de baja tensión. Son máquinas sin partes móviles y esto hace que los rendimientos sean muy altos, cercanos al 99,7%.

Los transformadores son imprescindibles en las redes eléctricas ya que han permitido el desarrollo de estas, consiguiendo transportar la energía a grandes distancias de una forma práctica y económica.

4.1.2 Aspectos constructivos

Las principales partes de las que se compone un transformador son: núcleo, devanado de alta tensión, devanado de baja tensión, sistema de refrigeración y aisladores pasantes de salida.

El núcleo constituye el circuito magnético del transformador. Está constituido por chapas de acero al silicio apiladas todas juntas, pero sin ser soldadas, que son sometidas

a un tratamiento químico especial, denominado carlite, para recubrirlas de una capa aislante muy fina para reducir gran parte de las pérdidas en el hierro.

El circuito magnético está formado por las columnas, que son las partes del núcleo donde se montan los devanados, estas columnas van unidas entre sí mediante otra parte del núcleo denominada culata. Los espacios entre columnas y culatas, se denominan ventanas del núcleo.

Según la posición relativa entre el núcleo y los devanados, los transformadores pueden ser acorazados, los devanados están en la mayor parte abrazados por el núcleo magnético, y de columnas, en los que los devanados rodean casi totalmente el núcleo magnético.

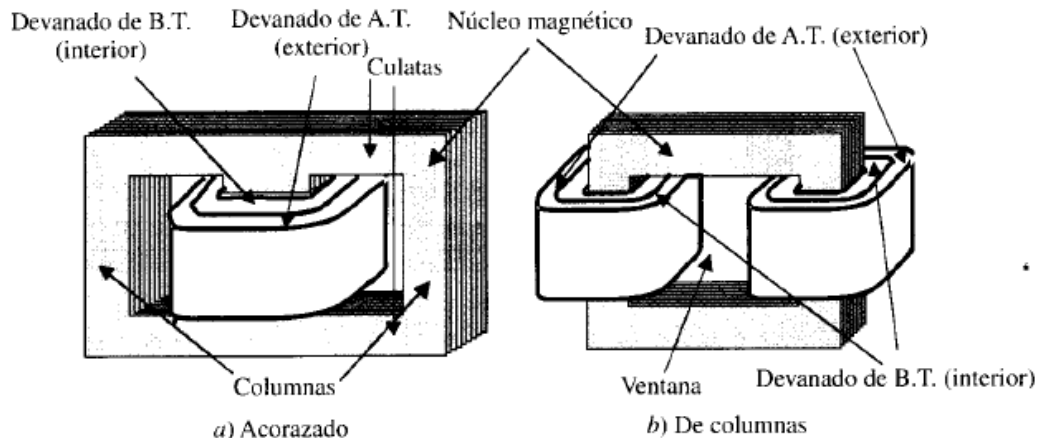


Figura 4.1: Tipos de núcleos magnéticos

Otro aspecto importante del núcleo de los transformadores es la sección transversal de sus columnas que para transformadores de pequeña potencia se construye de forma cuadrada y en los de mayor potencia en forma de polígono escalonado formando

secciones cruciformes y de esta manera se aprovecha mejor el área interior de los devanados.

Los devanados constituyen el circuito eléctrico del transformador. Se realizan por medio de conductores de cobre, en forma de hilos redondos para diámetros pequeños o de sección rectangular para secciones mayores, en los dos casos están recubiertos por una capa aislante que puede ser barniz fibra de algodón o cinta de papel en función de la potencia del transformador.

Según sea la disposición relativa entre los arrollamientos de alta y baja tensión, los devanados pueden ser concéntricos, tienen forma de cilindros coaxiales y se coloca el devanado de baja tensión en la posición interior, ya que es más fácil de aislar que el de alta tensión, o alternados, en los cuales los arrollamientos se subdividen en secciones o galletas de tal forma que las partes de los devanados de alta y baja tensión se suceden alternativamente a lo largo de la columna, colocando en los extremos media bobina, que por razones obvias de aislamiento pertenecen al devanado de baja tensión.

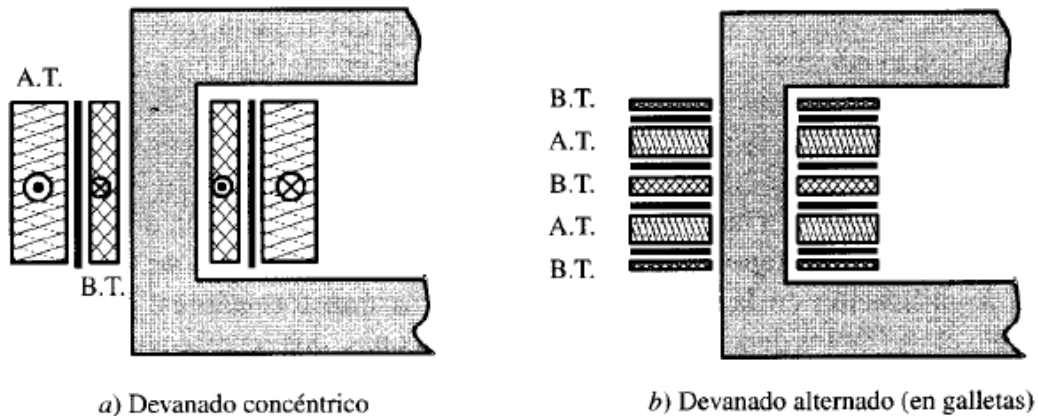


Figura 4.2: Tipos de disposiciones de los devanados de un transformador

En un transformador como en todas las máquinas eléctricas existen pérdidas que se transforman en calor y contribuyen al calentamiento de la máquina, para evitar que se alcancen temperaturas altas que puedan afectar al aislamiento de los devanados se instala un sistema de refrigeración que normalmente consiste en la introducción del núcleo y de los devanados en una cuba con líquido refrigerante.

Los bornes del transformador se llevan al exterior de la cuba mediante unos aisladores pasantes de porcelana rellenos de aceite o aire. Cuando se utilizan tensiones altas aparece un fuerte campo eléctrico entre el conductor terminal y el borde del orificio en la tapa superior de la cuba, para evitar la perforación del aislador, éste se realiza con una serie de cilindros que rodean el borne metálico dentro del espacio cerrado que contiene el aceite. Estos cilindros son más altos para el borne de alta tensión y de menor tamaño para el borne de baja tensión.



Figura 4.3: Aisladores pasantes en los bornes de un transformador

4.1.3 Principio de funcionamiento

El funcionamiento de los transformadores se basa en la inducción electromagnética. Cuando se aplica una tensión en los bornes del devanado primario del transformador se crea un flujo magnético variable que a su vez genera unas fuerzas electromotrices, ec. [4.1] en los devanados de acuerdo a la ley de Faraday, y que se opone al flujo que la genera según la ley de Lenz.

$$e_1 = -N_1 \times \frac{d\phi}{dt} ; e_2 = -N_2 \times \frac{d\phi}{dt} \quad [4.1]$$

- e_1 : Fuerza electromotriz en el primario.
- e_2 : Fuerza electromotriz en el secundario.
- N_1 : Número de espiras del devanado primario.
- N_2 : Número de espiras del devanado secundario.

- ϕ : Flujo magnético variable.

Si conectamos una carga en el secundario y cerramos el circuito la fuerza electromagnética en el secundario generará una intensidad i_2 que a su vez creará una diferencia de potencial en el secundario v_2 .

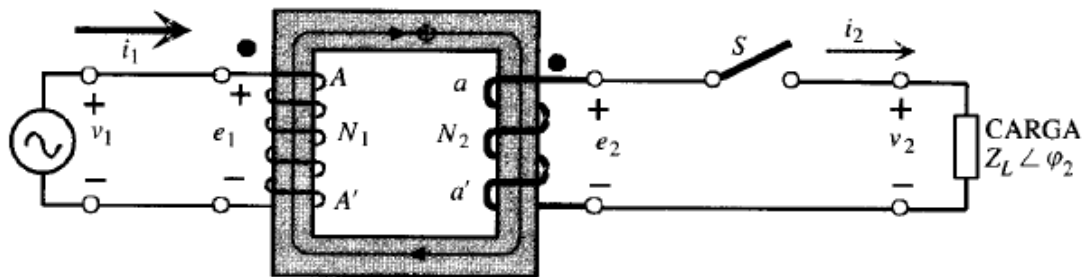


Figura 4.4: Núcleo y circuito de un transformador

En la figura 4.4 se designa a los terminales de la misma polaridad con una misma letra, A-a para los positivos y A'-a' para los negativos, mayúscula para el lado de alta tensión y minúscula para el lado de baja tensión

La relación entre las tensiones del primario y secundario, entre el número de espiras del primario y del secundario y entre las fuerzas electromotrices viene dada por la relación de transformación, m , ec. [4.2]

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad [4.2]$$

4.1.4 Pérdidas en los transformadores

Los transformadores como todas las maquinas eléctricas tienen pérdidas. Se pueden dividir en pérdidas en el hierro y pérdidas en el cobre.

Las pérdidas en el hierro se dividen a su vez en dos tipos, debidas a las corrientes parasitarias o de Foucault y pérdidas por histéresis.

Las corrientes de Foucault se producen en el núcleo al inducirse una corriente eléctrica transformándose en calor, para reducirlas se construye el núcleo del transformador mediante laminas y no macizo.

Las pérdidas por histéresis se producen debido a la histéresis que presentan los materiales de los que está compuesto el núcleo, que es la tendencia de estos a conservar sus propiedades.

Las pérdidas por efecto Joule o pérdidas en el cobre son debidas a la resistividad de este, y son proporcionales al cuadrado de la intensidad que circula por el conductor y la resistencia que esté presente.

4.1.5 Sistemas de refrigeración

En los transformadores como en el resto de máquinas eléctricas y como ya se menciona en el punto 4.1.2 Aspectos constructivos hay pérdidas que se transforman en calor y que hacen que la temperatura de la maquina se eleve hasta grados que degradan y acortan la vida útil de los materiales.

El calor que se produce en los devanados y en el núcleo se evacua al exterior mediante métodos de convección¹ y radiación².

Cuando conectamos un transformador se produce un incremento de la temperatura hasta que se alcanzan las condiciones de servicio. En este punto se toma como referencia una temperatura que denominamos temperatura de servicio en base a la cual van diseñados los materiales aislantes, una tensión llamada tensión nominal y una corriente que será la intensidad nominal, de la constancia de estas dos últimas depende que se mantenga constante la temperatura de servicio.

Una variación relativa pequeña en la temperatura de servicio debido al calor producido por las pérdidas puede reducir la vida útil de los materiales a la mitad, de ahí que se considere imprescindible el sistema de refrigeración como parte del transformador.

Los transformadores pueden ser refrigerados mediante aire, refrigeración en seco o mediante aceite, refrigeración en baño de aceite.

Para transformadores con potencias nominales pequeñas se utiliza la refrigeración en seco, en la cual el aire circula de manera natural, atrapando el calor de los puntos calientes y mediante convección se transporta este calor hacia puntos más fríos del exterior del núcleo transformador. Para transformadores de potencia nominal mayor se

¹ Convección: Método de transferencia de calor que se produce en un fluido. Transporta el calor de las zonas más calientes a las más frías mediante el movimiento de un líquido o un gas.

² Radiación: Es la transferencia de calor de un cuerpo debido a su temperatura. No necesita medio de transporte ni fluido ni líquido ni tampoco es necesario que haya contacto entre sólidos.

puede utilizar la refrigeración en seco, pero con una circulación de aire forzada por ventiladores.



Figura 4.5: Transformador refrigerado en seco

Los transformadores de distribución de pequeña potencia normalmente son refrigerados en baño de aceite dentro de un tanque de acero. El aceite absorbe el calor procedente del núcleo del transformador y lo evacua al exterior mediante radiación y convección. Para transformadores de mayor potencia se aumenta el número de radiadores externos, aumentando de esta manera la superficie de intercambio de calor del tanque con el aire exterior, que puede ser forzado por ventiladores.

La refrigeración en aceite se utiliza en transformadores de alta tensión ya que tiene una doble función como refrigerante y como aislante.



Figura 4.6: Transformador refrigerado en baño de aceite

En transformadores con potencias muy altas se puede evacuar el calor del aceite del tanque mediante un intercambiador de calor aceite-agua, pero es un método costoso ya que el agua necesita refrigerarse y para esto necesita una circulación continua.

En la placa de características³ del transformador encontramos el tipo de refrigeración que se rige según la norma IEC 60076-2.

La norma indica que, para transformadores bañados en aceite, el método de refrigeración viene indicado por un código de cuatro letras.

La primera de las letras indica el medio refrigerante que atraviesa los devanados.

³ Placa de características: Placa que indica el tipo de máquina eléctrica, sus condiciones nominales, conexionado, tipo de refrigeración, fabricante y otros datos importantes para el correcto funcionamiento de la máquina.

LETRA	SIGNIFICADO
O	Líquido aislante mineral o sintético con punto de inflamación $\leq 300^{\circ}\text{C}$
K	Líquido aislante con punto de inflamación $>300^{\circ}\text{C}$
L	Líquido aislante con punto de inflamación no medible

Figura 4.7: Significado de la primera letra del código que indica el método de refrigeración

La segunda letra indica el método de circulación del refrigerante interno.

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

Figura 4.8: Significado de la segunda letra del código que indica el método de refrigeración

La tercera letra indica el refrigerante exterior.

LETRA	SIGNIFICADO
A	Aire
W	Agua

Figura 4.9: Significado de la tercera letra del código que indica el método de refrigeración

La cuarta letra indica el modo de circulación del refrigerante exterior.

LETRA	SIGNIFICADO
N	Convección natural
F	Convección forzada (bombas, ventiladores)

Figura 4.10: Significado de la cuarta letra del código que indica el método de refrigeración

Todos los medios refrigerantes sufren un envejecimiento que afecta a sus propiedades que viene dado por la elevación de la temperatura, el contacto con aire, la presencia de humedad y de oxígeno que provoca la oxidación y posible formación de lodos y otros subproductos que pueden llegar a alterar sus propiedades aislantes y refrigerantes.

Para preservar las propiedades del refrigerante los dos métodos más extendidos son el diseño de la cuba que permita que el aceite se expanda al calentarse y el relé Buchholz que es un dispositivo que actúa detectando los gases acumulados en su cámara, originados por falta de aceite o por el flujo de aceite provocado por descargas eléctricas internas o cortocircuitos en el transformador.

El relé va colocado entre el transformador y el depósito de expansión⁴ y en su interior contiene aceite, cuando se produce un calentamiento anómalo en los devanados del transformador, el aceite de la cuba se expansiona y asciende hasta el relé produciendo burbujas en el aceite de este. El relé consta de dos flotadores móviles que se accionan al disminuir el nivel de aceite, uno de alarma y otro secundario que cuando los gases siguen aumentando por que el fallo no ha sido corregido desconecta el transformador de la red.

El relé Buchholz detecta gracias a su gran sensibilidad, cortocircuitos, sobrecargas, interrupciones de fase y pérdidas de aceite.

4.1.4.5 Líquidos refrigerantes

Los líquidos utilizados en la actualidad en la refrigeración de transformadores son:

- Aceite mineral: Es una mezcla de hidrocarburos procedente de la destilación del petróleo. Es el más utilizado.
- Líquidos alternativos: Han sido desarrollados posteriormente al aceite mineral con el objetivo de conseguir un líquido refrigerante con mejores propiedades y más respetuosos a nivel medioambiental. Engloban los aceites de silicona⁵, los esteres sintéticos⁶ y los esteres naturales⁷.

⁴ EL depósito de expansión absorbe las expansiones y contracciones del refrigerante debidas a los cambios de temperatura.

⁵ Mezcla de polímeros orgánicos e inorgánicos.

⁶ Producto químico obtenido por la unión de un ácido graso y un alcohol.

⁷ Se obtienen mediante el reciclaje de aceites usados de girasol, colza o soja.

Los líquidos usados en la refrigeración de transformadores son líquidos dieléctricos⁸ y deben reunir una serie de características.

- Seguridad medioambiental. Los aceites tanto minerales como sintéticos son más dañinos para el medio y menos biodegradables que los esteres.
- Estables a la oxidación. La oxidación es debida a la presencia de aire y de altas temperaturas en contacto con el líquido refrigerante; se pueden generar subproductos que afectan a las propiedades del líquido.
- Viscosidad. Mientras más baja sea la viscosidad mayor será la refrigeración, ya que el líquido circulara mejor dentro del transformador.
- Punto de inflamación. Debe ser lo más alto posible para evitar incendios que se pueden ocasionar debido a la mezcla de vapores producidos por el líquido y el oxígeno contenido en el aire.
- Miscibilidad⁹. Propiedad importante a la hora de sustituir un fluido refrigerante por otro diferente.
- Rigidez dieléctrica. Valor de tensión límite para el cual el líquido refrigerante pierde sus propiedades dieléctricas.

⁸ Un material dieléctrico es aquel con baja conductividad eléctrica; un aislante capaz de formar dipolos eléctricos en su interior bajo la acción de un campo eléctrico. (9)

⁹ Capacidad de dos o más líquidos de mezclarse entre sí, formando una solución homogénea.

4.2 Ferrofluidos

4.2.1 Introducción

Un ferrofluido es un coloide (sustancia con propiedades de dos o más estados de la materia) estable debido al movimiento browniano¹⁰ de las partículas que bajo la acción de un campo magnético se polariza de manera rápida (3); es una mezcla de partículas ferromagnéticas recubiertas de un surfactante¹¹ que previene las aglomeraciones debidas a las fuerzas de Van del Waals¹² y de un fluido portador, normalmente agua o aceite (3).

Los ferrofluidos están siendo en estos últimos años objeto de gran interés científico y su estudio ha crecido de manera notable debido a que presentan simultáneamente propiedades propias de la fase líquida que está compuesta por el fluido portador y de la fase sólida que está compuesta por partículas ferromagnéticas. A nivel macroscópico coexisten dos fases; sin embargo, las nanopartículas presentes constituyen cada una de ellas un núcleo que se comporta como un monodominio magnético individual (4).

Los ferrofluidos presentan paramagnetismo; concretamente se les considera superparamagnéticos; las características que los definen son:

¹⁰ Movimiento aleatorio que impide que las nanopartículas se sedimenten. Este movimiento es debido a la excitación térmica de las moléculas del fluido portador que colisionan con las nanopartículas ferromagnéticas. Pasado un tiempo determinado estas colisiones se acumulan haciendo que la nanopartícula se mueva en una dirección aleatoria.

¹¹ Agentes tensoactivos o surfactantes de naturaleza polar-no polar, (hidrófilo-hidrófobo), con tendencia a localizarse en la barrera entre dos fases inmiscibles modificando el valor de la tensión superficial. (8)

¹² Engloba a las fuerzas de atracción débiles entre moléculas eléctricamente neutras que tienen un papel fundamental en el proceso de estabilización molecular.

- Alcanzan la saturación magnética antes que los materiales paramagnéticos debido a su gran susceptibilidad magnética.
- La magnetización decae a 0 sin la presencia de un campo magnético (5).

Cuando exponemos a los ferrofluidos a la presencia de un campo magnético originado bien por una corriente continua (CC) o por una corriente alterna (CA) se producen una serie de fenómenos ferro-hidrodinámicos, que van desde la formación de picos, meniscos o patrones laberínticos¹³ hasta la variación de la viscosidad del fluido, que se convertirá en una variable dependiente de la magnetización; todos ellos son debido a la interacción del campo magnético, con el momento dipolar magnético¹⁴ de cada partícula. (6)

El comportamiento de los líquidos ferrofluidos depende del campo magnético al que se exponen estos; en los campos magnéticos generados por una corriente alterna a diferencia de los que son generados por una corriente continua, hay un desfase entre la magnetización de las partículas del ferrofluido y el campo magnético al que están sometidas, de modo que la magnetización no es co-lineal y por esta razón se crea un momento magnético que actúa sobre cada partícula del ferrofluido haciendo que estas giren para alinearse con el campo magnético exterior. El momento neto generado en el ferrofluido debido a la suma de los momentos individuales generados en cada partícula

¹³ Formas geométricas tridimensionales formadas por el ferrofluido expuesto a la acción de un campo magnético.

¹⁴ Cantidad vectorial que indica la magnetización y la orientación del campo magnético en cada dipolo magnético.

se puede determinar midiendo con un viscosímetro la viscosidad a una determinada velocidad de cizallamiento (7).

4.2.2 Curva de magnetización- Ecuación de Langevin

La magnetización en un material en función del campo magnético aplicado se mide con un magnetómetro y se puede representar mediante la función que relaciona ambas magnitudes, denominada curva de magnetización. A partir de ella se pueden obtener los parámetros fundamentales que definen al ferrofluido, que son los siguientes:

- Saturación magnética.
- Fracción volumétrica de las partículas magnéticas.
- Susceptibilidad magnética.
- Rango del diámetro de las partículas magnéticas.

Estos datos hallados experimentalmente se comparan con la curva de magnetización teórica aportada por la ecuación de Langevin, ec. [4.9], para materiales paramagnéticos. Esta teoría parte del supuesto de que los dipolos magnéticos¹⁵ individuales no interaccionan entre ellos cuando están en disolución coloidal en el ferrofluido.

La ecuación de Langevin se determina a partir de la relación entre el par magnético (T) y la energía (W) de un dipolo magnético, ec. [4.3].

$$T = \mu_0 \vec{m} \times \vec{H} = \mu_0 m H \sin \theta \quad [4.3]$$

¹⁵ Un dipolo magnético es un bucle de corriente eléctrica

Siendo:

- μ_0 , la permeabilidad magnética del vacío¹⁶, $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.
- $\vec{m}$, momento dipolar magnético¹⁷.
- $\vec{H}$, la intensidad del campo magnético aplicado¹⁸.
- θ , el ángulo comprendido entre el momento dipolar magnético y la dirección del campo magnético aplicado.

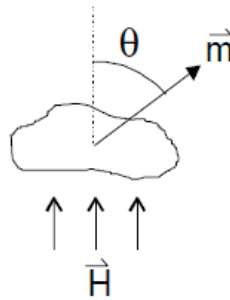


Figura 4.11: Ángulo θ entre el momento magnético dipolar y la intensidad del campo magnético

La ec. [4.4] permite calcular la energía (W) que es necesario utilizar para girar una partícula un cierto ángulo θ a partir del par magnético de giro.

¹⁶ En física, la permeabilidad magnética es la capacidad de los materiales para atraer y hacer pasar a través de sí los campos magnéticos. Esta permeabilidad está dada por la relación entre la inducción magnética y la intensidad de campo magnético.

¹⁷ Cantidad vectorial con dirección perpendicular a la corriente que genera el campo magnético al que está sometido. Tiende a alinear los dipolos magnéticos con la dirección del campo magnético.

¹⁸ Es la excitación magnética generada por la bobina de un electroimán. Es proporcional al número de espiras contenidas en la bobina, a la intensidad de corriente eléctrica que circula por ellas e inversamente proporcional a la longitud de la bobina.

$$W = \int_0^\theta T d\theta = -m\mu_0 H (\cos \theta - 1) \quad [4.4]$$

A pesar de que el momento magnético dipolar de los dipolos magnéticos intenta alinearse con el campo magnético exterior aplicado, existe una energía térmica que intenta impedirlo, manteniendo una aleatoriedad en la orientación de estos.

Mediante la función estadística de Boltzmann se describe esta situación, ec. [4.5].

$$n = \hat{n} e^{\frac{-W}{kT}} \quad [4.5]$$

Donde:

- n , es la densidad de dipolos magnéticos que poseen una cantidad de energía W , ec. [4.4].
- $\hat{n}$, es la constante de normalización de Boltzmann (no necesaria para la obtención de la ecuación de Langevin).
- K , es la constante de Boltzmann que tiene un valor de $1,38 \times 10^{-23}$ J/K.
- T , es la temperatura absoluta en grados Kelvin.

Si combinamos las ecuaciones [4.4] y [4.5] tenemos:

$$n = n_0 e^{m\mu_0 H \cos \theta / kT} \quad [4.6]$$

Donde:

- n_0 , es la densidad de dipolos magnéticos cuando el campo magnético aplicado es nulo.

Si integramos sobre una esfera de radio R que contiene una gran cantidad de dipolos magnéticos y dividimos entre su volumen, tenemos la densidad de dipolos magnéticos promedio, ec. [4.7].

$$N = \frac{n_0}{\alpha} \sinh \alpha = \frac{n_0}{\left(\frac{m\mu_0 H}{kT}\right)} \sinh\left(\frac{m\mu_0 H}{kT}\right) \quad [4.7]$$

La magnetización neta de la esfera será paralela a la dirección del campo magnético aplicado. Si se supone que dicho campo magnético se aplica en la dirección Z (magnetización respecto a los ejes X e Y nula) se puede calcular el valor de dicha magnetización en la dirección Z integrando la ecuación diferencial de dicha magnetización, ec. [4.8], respecto al eje z en el volumen de la esfera.

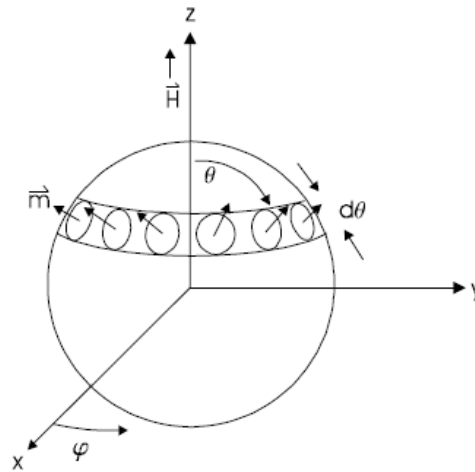


Figura 4.12: Todos los dipolos dentro del volumen de una esfera contribuyen a la magnetización neta de un cuerpo.

$$dM_z = \frac{mn}{4\pi R^3} \cos \theta r^2 \sin \theta d\theta dr d\varphi \quad [4.8]$$

Donde:

- φ , es el ángulo desde el eje X en el plano XY
- r , es el radio de la esfera en la ecuación diferencial que va de 0 a R.

Considerando n dada por la ec. [4.6] e integrando la ec. [4.8] sobre la mencionada esfera de radio R se obtiene la ecuación de Langevin, ec. [4.9].

$$\frac{M}{M_s} = L(\alpha) = \coth(\alpha) - \frac{1}{\alpha} \quad [4.9]$$

Donde:

- M , es la magnetización.
- M_s , es la saturación magnética (4.2.3 Saturación magnética), ec. [4.12].
- α , argumento de la función de Langevin.

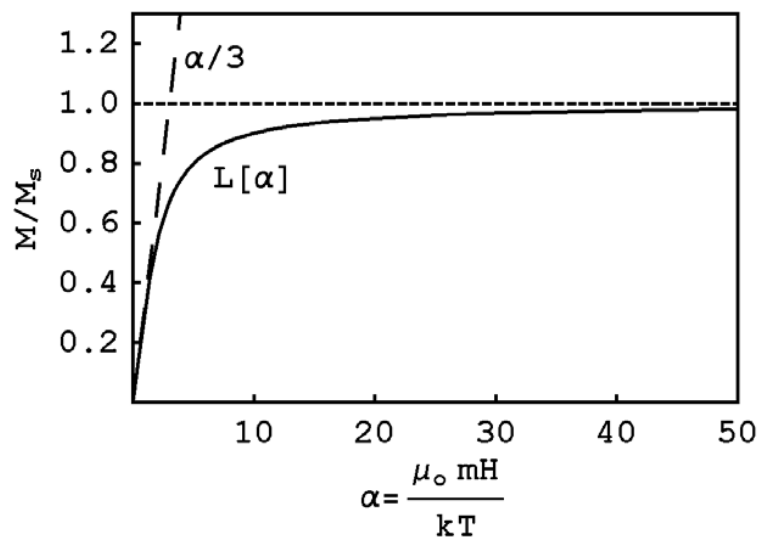


Figura 4.13: Representación de la ecuación teórica de Langevin. Ec [4.9].

La figura 4.13 muestra la representación gráfica de la función de Langevin dada por la expresión matemática [4.9], donde los límites para campo magnético bajo y alto, representados por las dos asíntotas, son las ec. [4.10] y [4.11], respectivamente.

$$\lim_{\alpha \ll 1} L(\alpha) \approx \frac{\alpha}{3} = \frac{\pi}{18} \frac{\mu_0 M_d H d^3}{kT} \quad [4.10]$$

$$\lim_{\alpha \gg 1} L(\alpha) \approx 1 - \frac{1}{\alpha} = \left(1 - \frac{6}{\pi} \frac{kT}{\mu_0 M_d H d^3} \right) \quad [4.11]$$

4.2.3 Saturación magnética

La saturación magnética se define como el estado alcanzado en el cual un aumento de la excitación magnética no produce un aumento de la magnetización.

La región cercana al límite donde los campos magnéticos son más altos, ec. [4.11] corresponde con la zona de saturación magnética y es donde la mayoría de los dipolos magnéticos ya están alineados con el campo magnético aplicado.

La relación entre la saturación magnética y la magnetización de dominio viene dada por la ec. [4.12].

$$M_s = \varnothing M_d \quad [4.12]$$

Donde:

- $\varnothing$, es la fracción volumétrica de las partículas magnéticas en la mezcla del líquido portador y surfactante.
- M_d , es la magnetización de dominio de la partícula de volumen V y momento dipolar magnético m , (m/V) . Es una constante propia del material.

En la Tabla 1 se muestran los valores de la saturación magnética nominales según el fabricante de determinadas muestras de diferentes ferrofluidos, la saturación magnética estimada obtenida por procedimientos matemáticos y la magnetización máxima medida aplicando el máximo campo magnético (exterior) H_e , que es un valor muy cercano al de saturación magnética.

Fluid Sample	$\mu_0 M_s$ (Gauss)			T (K)	H_e (kGauss)
	Nominal (Gauss)	Estimated (Gauss)	Max. Measured M (Gauss)		
NF 1634 Isopar M	400	444.2	421.3	299	8.0
MSG W11 water-based	162	203.2	187.3	299	14.0
NF 1273 wax ferrofluid	550	NA	NA	NA	NA
NBF 1677 fluorocarbon-based	400	404.9	394.1	323	8.0
EFH1 hydrocarbon-based	400	386.6	365.2	room(≈ 300)	10.0

Tabla 1: Valores de saturación magnética nominal, estimada y máxima magnetización medida.

Como se puede apreciar en la Tabla 1 algunos autores a pesar de que las unidades en el sistema internacional de la saturación magnética son A/m, prefieren expresar la saturación magnética en unidades de densidad de flujo magnético, Teslas¹⁹ o Gauss.

$$Bs \text{ (Tesla)} = \mu_0 M_s \text{ (A/m)} \quad [4.13]$$

4.2.4 Fracción volumétrica

La fracción volumétrica de las partículas se define como la cantidad total de nanopartículas ferromagnéticas en volumen respecto al volumen de la mezcla.

¹⁹ 1 Tesla=10⁴ Gauss

Para la magnetita que es el material más utilizado en la elaboración de ferrofluidos el valor de la magnetización de dominio es $M_d = 446 \text{ kA/m}$. Este valor junto con la máxima magnetización medida que es similar al valor de saturación magnética sirve para obtener la fracción volumétrica, Tabla 2.

$$M_m \approx M_s \quad [4.14]$$

Donde:

- M_m , es la máxima magnetización medida.

Fluid Sample	Maximum Measured $\mu_o M_s$ Gauss	T K	H_e kGauss	ϕ %
NF 1634 Isopar M	421.3	299	8.0	7.5
MSG W11 water-based	187.3	299	14.0	3.3
NF 1273 wax ferrofluid	NA	NA	NA	9.8*
NBF 1677 fluorocarbon-based	394.1	323	8.0	7.0
EFH1 hydrocarbon-based	365.2	room(≈ 300)	10.0	6.5

Tabla 2: Valores de la fracción volumétrica para las diferentes muestras de ferrofluido nombradas en la tabla 1.

4.2.5 Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética es una constante de proporcionalidad adimensional que indica el grado de sensibilidad a la magnetización de un material bajo la acción de un campo magnético.

La pendiente inicial de la primera asíntota de la figura 4.13 corresponde con la susceptibilidad magnética, χ , y se expresa matemáticamente mediante la ec. [4.15].

$$\chi = \frac{\pi}{18} \frac{\mu_0 \emptyset M_d^2 d^3}{kT} = \frac{q}{T} \quad [4.15]$$

Donde:

- d , diámetro magnético medio de las nanopartículas.

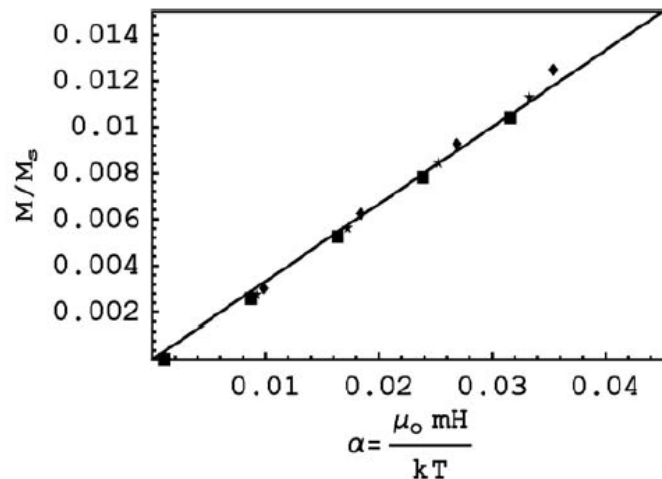


Figura 4.14: Representación de la ecuación de Langevin para el fluido MSG W11 para campos magnéticos bajos (parte lineal). La pendiente de la recta corresponde a la susceptibilidad magnética.

La susceptibilidad magnética está relacionada con la permeabilidad magnética mediante la ec. [4.16].

$$\mu = (1 + \chi) \mu_0 \quad [4.16]$$

4.2.6 Rango del diámetro de las partículas ferromagnéticas

Los ferrofluidos contienen nanopartículas que abarcan un amplio rango de tamaños el cual es necesario conocer debido a que el comportamiento del ferrofluido depende del tamaño de las partículas.

4.2.6.1 Diámetro magnético medio

Mediante la ec. [4.17] y obteniendo M_s , T y χ de manera experimental y siendo el resto de variables constantes, podemos obtener el diámetro magnético medio²⁰ de las partículas, d .

$$d = \sqrt[3]{\frac{18\chi kT}{\mu_0 M_s M_d \pi}} \quad [4.17]$$

4.2.6.2 Diámetro mínimo

Se obtiene el diámetro mínimo de las partículas ajustando los datos experimentales al límite superior de la ecuación de Langevin, ec. [4.11], mediante la ec. [4.18].

²⁰ En los ferrofluidos tenemos que hablar de dos diámetros diferentes de partícula, el magnético y el real que es el diámetro magnético más aproximadamente 2 nm de surfactante, suponiendo que la partícula es esférica.

$$\mu_0 M = c + \frac{b}{\mu_0 H_i} \quad [4.18]$$

Donde:

- $c = \mu_0 M_s$
- $b = \frac{-6kT\mu_0 M_s}{\pi M_d d^3}$
- H_i , es el campo magnético en el interior del material que difiere del campo magnético exterior aplicado, debido a la existencia de un factor de demagnetización D.

4.2.6.3 Diámetro máximo

El diámetro máximo de las partículas se puede obtener de tres formas.

- Mediante la ec. [4.17] tomando valores para la susceptibilidad magnética en función de cada temperatura.

Fluid Sample	T K	χ Dimensionless
NF 1634		
Isopar M	295	2.181
	323	1.862
	348	1.636
MSG W11		
water-based	299	0.669
	323	0.596
	343	0.543
NF 1273		
wax ferrofluid	300	2.586
	323	2.545
	353	2.500
NBF 1677		
fluorocarbon-based	300	3.033
	323	2.674
	374	2.074
EFH1		
hydrocarbon-based	room	1.552

Tabla 3: Valores de susceptibilidad magnética para las distintas muestras de ferrofluido nombradas en la tabla 1 en función de la temperatura.

- Mediante el mejor ajuste a la ecuación de Langevin de datos experimentales obtenidos en la zona de campo magnético bajo.
- Mediante la ec. [4.19] que es una corrección de la ecuación de Langevin para la zona de campos magnéticos bajos que tiene en cuenta la interacción de los dipolos entre sí.

$$\frac{\chi(2\chi + 3)}{\chi + 1} = \frac{\pi}{6} \phi \frac{\mu_0 M_d^2 d^3}{kT} \quad [4.19]$$

Fluid Sample	d_{min} (nm)	d_{avg} (nm)	d_{max}^* (nm)	d_{max}^{**} (nm)	d_{max}^{***} (nm)
NF 1634 Isopar M	7.7	11.0	14.1	13.9	12.8
MSG W11 water-based	5.5	7.9	12.2	12.4	11.8
NF 1273 wax ferrofluid	NA	NA	13.4	13.6	12.4
NBF 1677 fluorocarbon-based	9.7	12.6	15.9	16.0	14.6
EFH1 hydrocarbon-based	6.9	10.6	13.3	13.1	12.2

Tabla 4: Diámetro medio, mínimo y máximo obtenido para las distintas muestras de ferrofluido nombradas en la tabla 1.

Capítulo 5: Experimento previo

El transformador que se ha simulado en el presente trabajo es un transformador monofásico de 0,8 kVA de potencia nominal y con relación de transformación 220V/110V.

En la figura 5.1 se muestran las características principales de la máquina y un esquema del conexionado de los bornes.

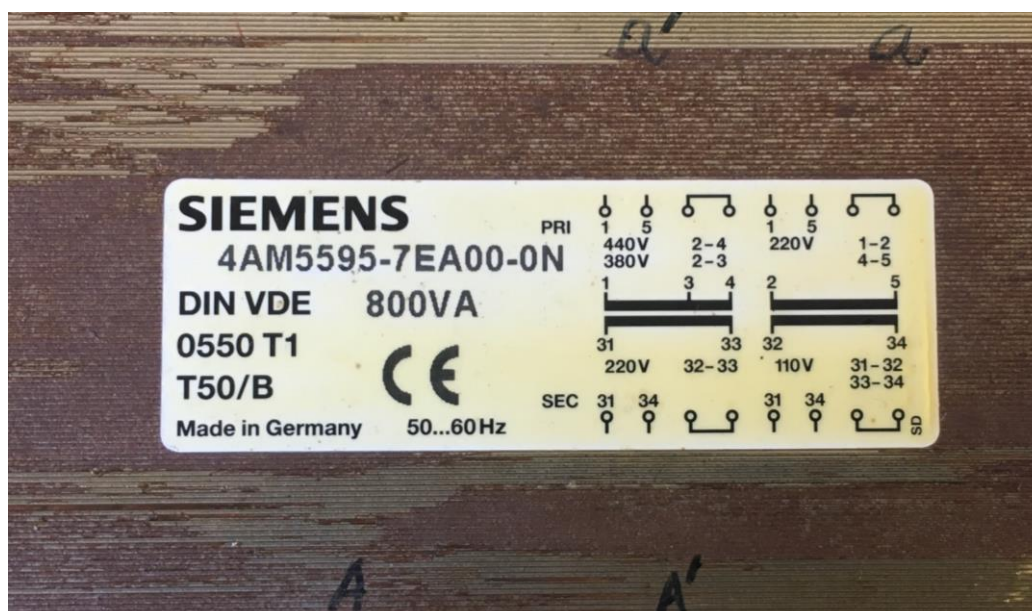


Figura 5.1: Placa de características.

Este mismo transformador ha sido previamente utilizado en un experimento por el Grupo de Investigación de Transformadores Eléctricos de Potencia (GITEP) del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria.

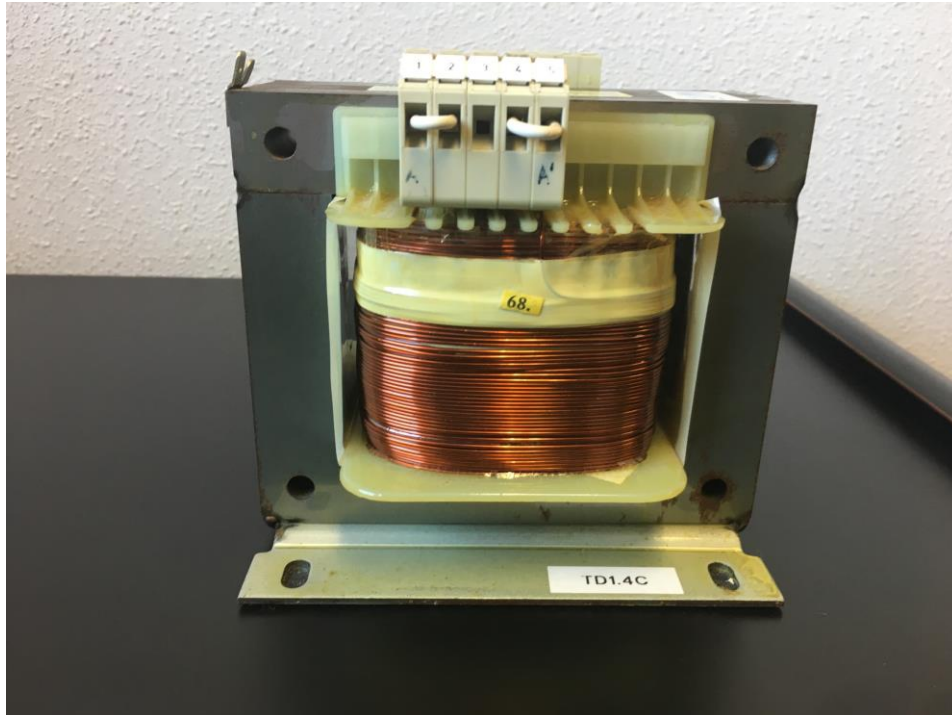


Figura 5.2: Vista frontal del transformador.

El objetivo del citado experimento era la comparación de la capacidad refrigerante de 4 aceites diferentes:

- Aceite mineral.
- Aceite mineral dopado con nanopartículas magnéticas (magnetita).
- Aceite basado en esteres naturales (aceite alternativo).
- Aceite basado en esteres naturales dopado con nanopartículas magnéticas (magnetita).

Para poder llevarlo a cabo, el transformador se introdujo en una cuba de paredes de acero inoxidable (figura 5.3) donde los devanados y el núcleo quedaban bañados en los 4 aceites alternativamente.

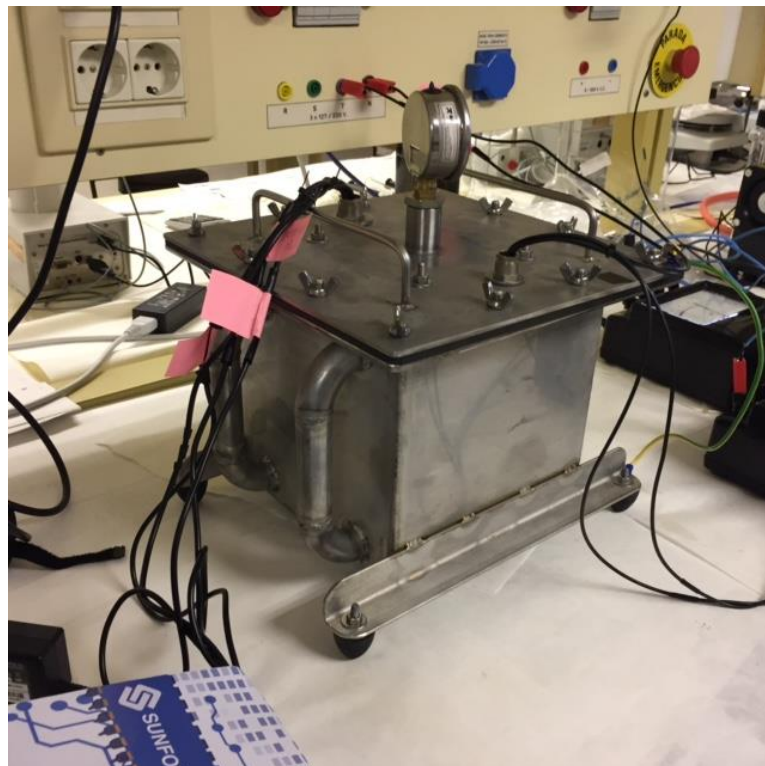
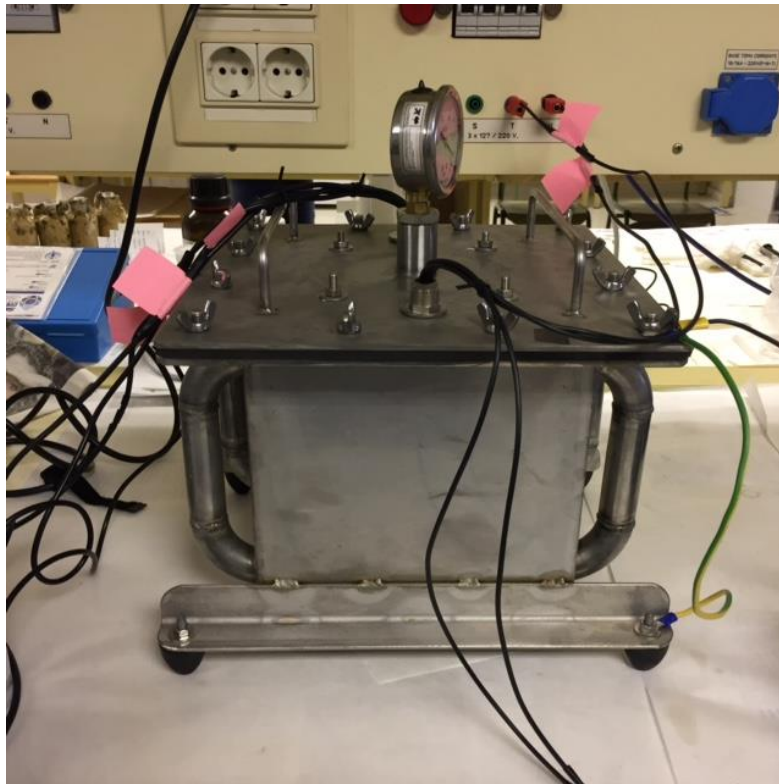


Figura 5.3: Vistas exteriores del transformador dentro de la cuba.

Cuatro termopares colocados en la parte superior e inferior de la cuba, en el núcleo y en la cara externa de los devanados, captan las medidas de temperatura tanto de la parte sólida como del aceite cada 10 segundos para ser tratadas informáticamente, figura 5.4. Asimismo, se ha colocado un termopar exterior para captar la temperatura del ambiente.

Dicho tratamiento informático consiste en la captación de las temperaturas cada 10 segundos y su representación gráfica frente al tiempo hasta que éstas se mantienen estables, momento en el cual se comparan los valores obtenidos para los 4 aceites.

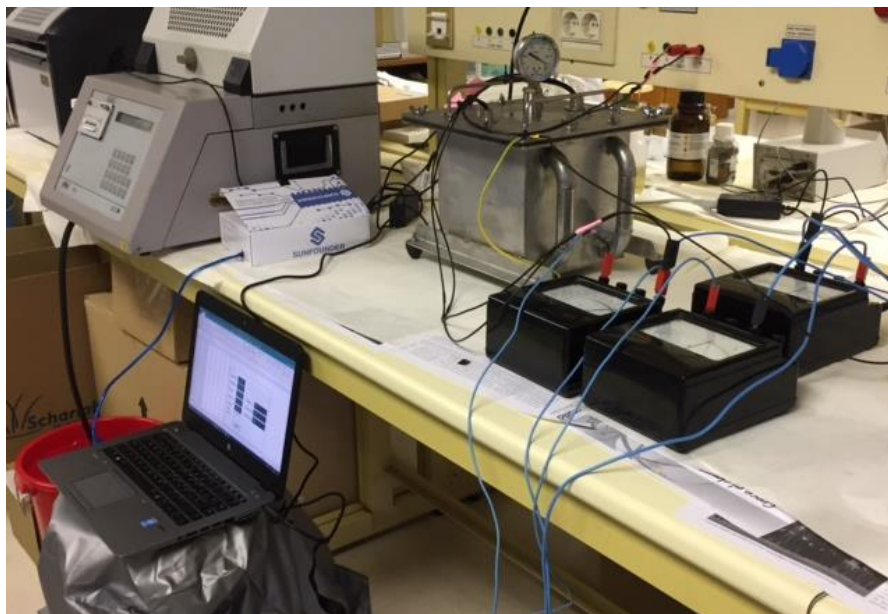


Figura 5.4: Vista de la cuba, de un amperímetro, vatímetro y voltímetro, así como del sistema de captación de datos.

Capítulo 6: Descripción del modelo numérico

6.1 Modelo geométrico

El transformador simulado en el presente estudio es un modelo de columnas (figura 6.1), que unidas por dos yugos, superior e inferior, permiten establecer una trayectoria de flujo magnético cerrado.

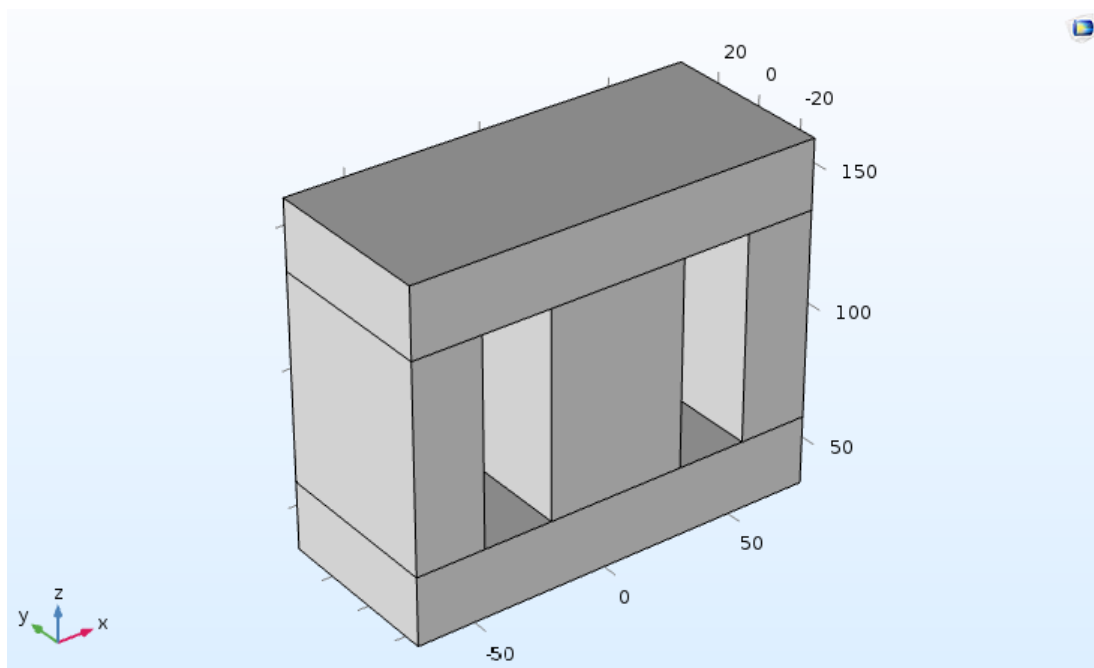


Figura 6.1: Vista isométrica del núcleo del modelo.

Las bobinas primaria y secundaria en el transformador se colocan arrolladas alrededor de la columna central del núcleo conformando un bobinado de tipo concéntrico como muestra la figura 6.2.

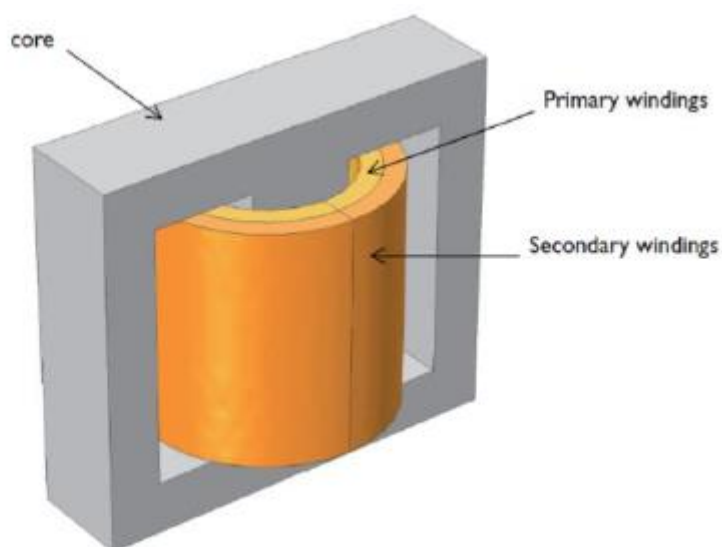
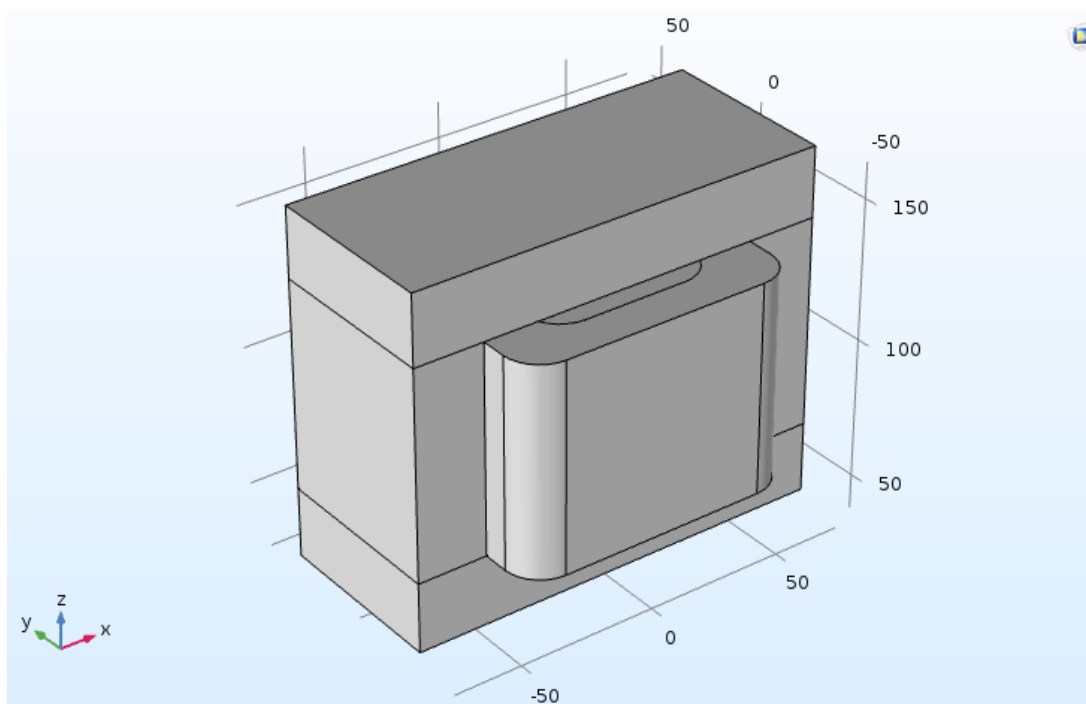


Figura 6.2: Vistas isométricas del núcleo y devanados del modelo.

En el presente trabajo se ha realizado una simulación del transformador dentro de una cuba de paredes de acero inoxidable y se ha omitido la refrigeración externa.

Con la finalidad de minimizar tiempos de simulación, ésta se ha realizado tomando un cuarto de la geometría completa como muestra la figura 6.3.

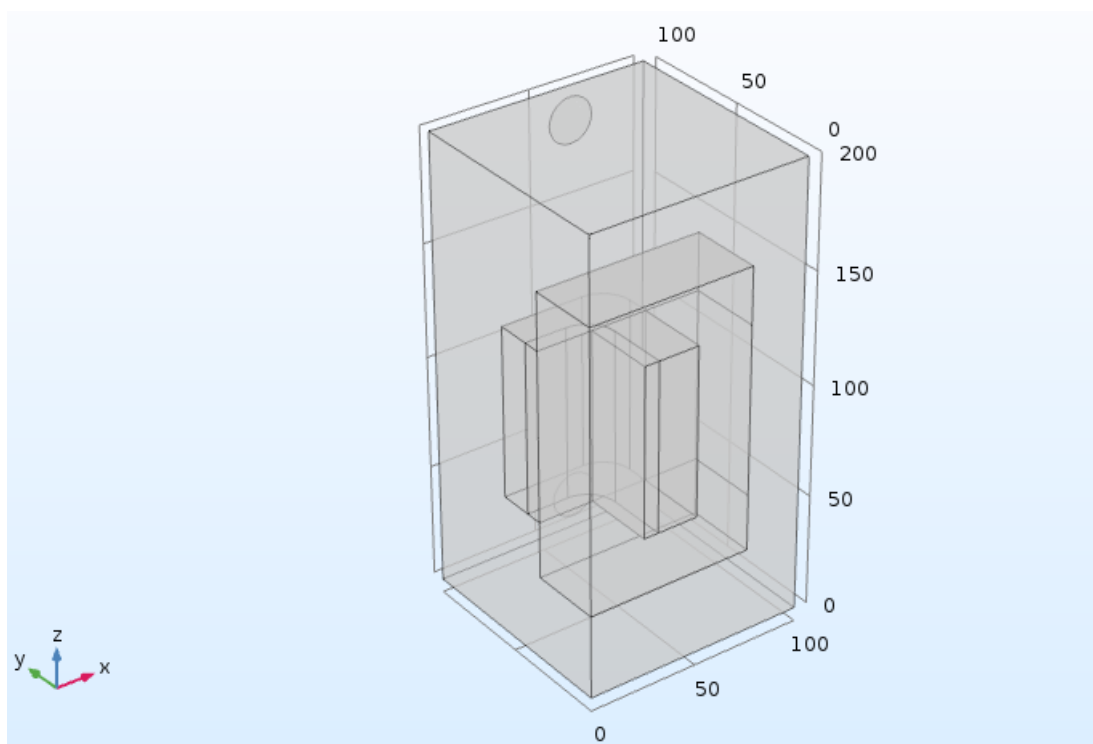


Figura 6.3: Vista isométrica de la geometría completa.

El bobinado tanto primario como secundario queda en un cuarto del original como se puede observar en las figuras 6.4 y 6.5 respectivamente.

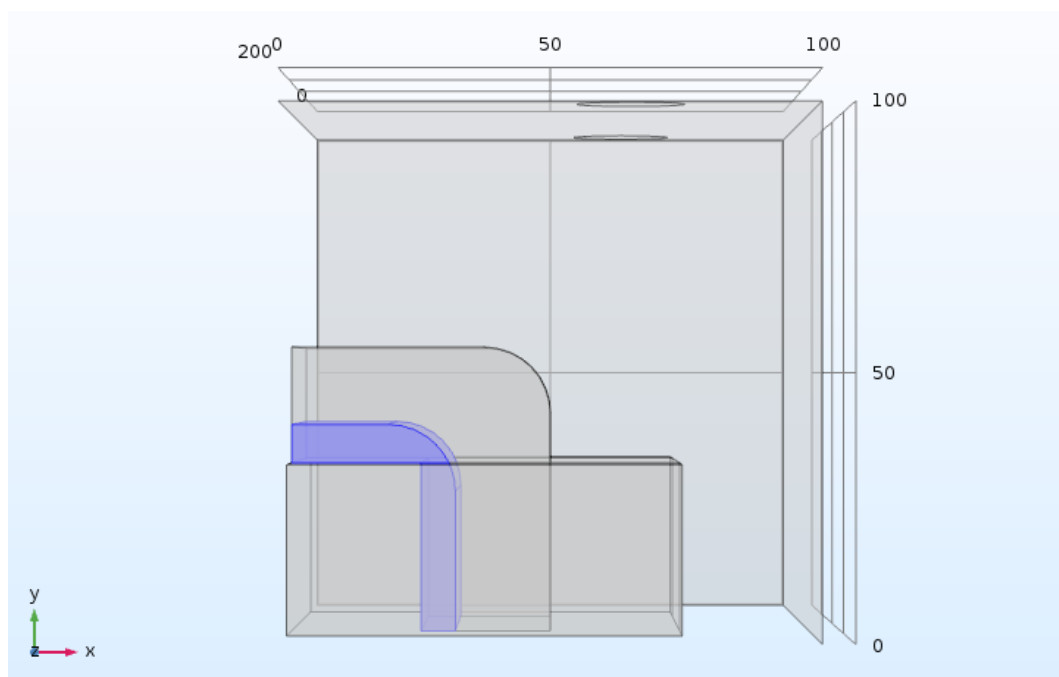


Figura 6.4: Vista superior del devanado del primario.

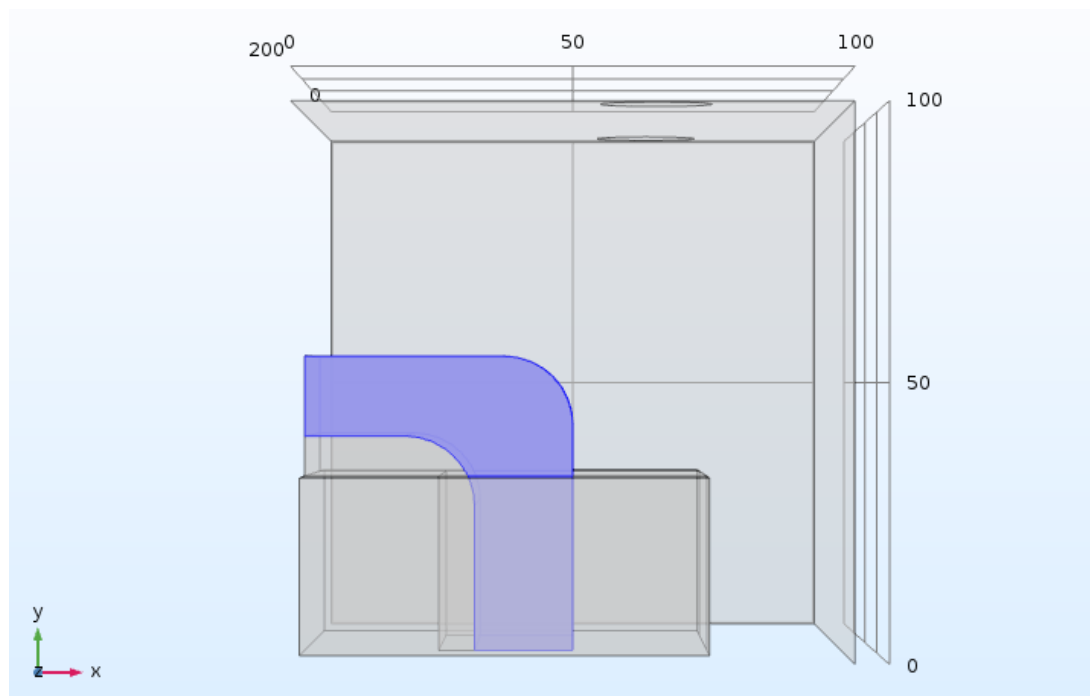


Figura 6.5: Vista superior del devanado del secundario.

En la figura 6.6 se observa en una vista frontal la sección del núcleo del transformador dentro de la cuba, así como los orificios de entrada y salida del aceite que se encuentran situados en la parte inferior y superior de la cuba respectivamente.

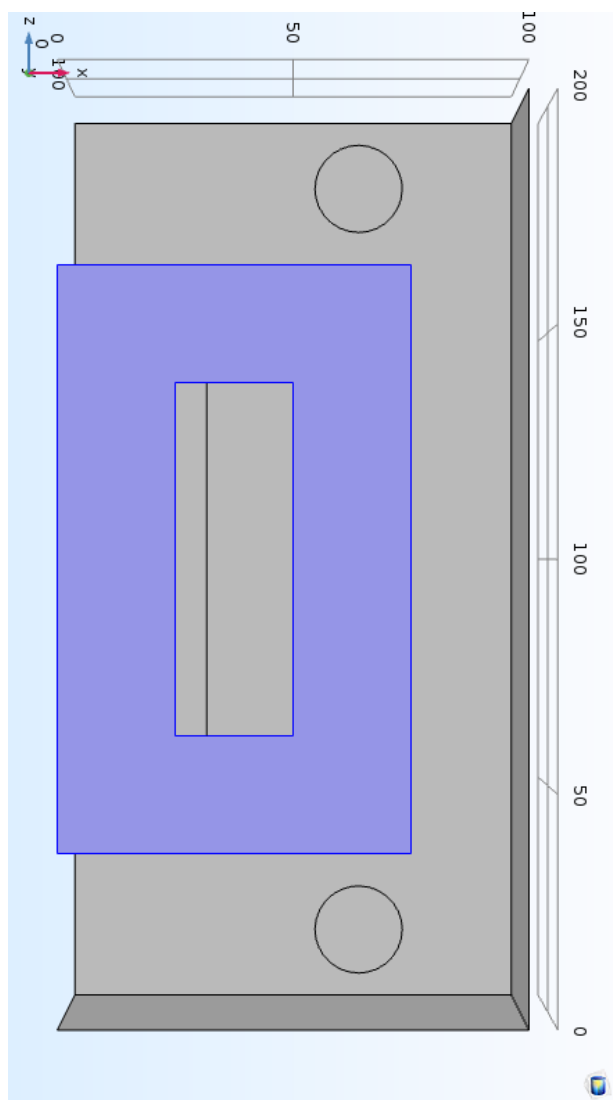


Figura 6.6: Vista frontal del núcleo del transformador.

6.2 Modelo físico-matemático

6.2.1 Parámetros globales

En la tabla 6.1 se observa una tabla con los parámetros globales, que son una serie de valores que se mantienen constantes durante toda la simulación y que son necesarios para poder llevar a cabo la resolución de las ecuaciones.

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
Diam_nano	10E-9	1E-8	Diametro promedio de la nanopartícula
Frac_volum	5E-2	0.05	Fracción volumétrica de nanopartículas
Np	2*66	132	Espiras del primario
Ns	4*66	264	Espiras del secundario
Perd_nucleo	34/4	8.5	Pérdidas en un cuarto de núcleo (W)
Perd_primario	11/4	2.75	Pérdidas en un cuarto de primario (W)
Perd_secundario	9/4	2.25	Pérdidas en un cuarto de secundario (W)
Vol_nucleo	2.438e-4	2.438E-4	Volumen de un cuarto de núcleo (m ³)
Vol_primario	2.924e-5	2.924E-5	Volumen de un cuarto de primario (m ³)
Vol_secundario	9.421e-5	9.421E-5	Volumen de un cuarto de secundario (m ³)

Tabla 6.1: Parámetros globales iniciales del transformador.

Por un lado, el diámetro promedio y la fracción volumétrica de las nanopartículas son necesarios para caracterizar al aceite mineral en el caso de doparle con nanopartículas magnéticas. Por otro lado, el número de espiras del primario y del secundario es necesario para calcular la fuerza electromotriz inducida en las bobinas. Por último, el conocimiento de las perdidas, del volumen del núcleo y de los devanados primario y secundario es necesario para caracterizar las fuentes de calor.

6.2.2 Características de los materiales

Las características de los materiales deben ser conocidas a partir de estudios previos de sus propiedades físicas y químicas.

- ACERO AL SILICIO:

Es un acero especial, con mejores propiedades magnéticas tales como una zona de histéresis pequeña lo que implica bajas pérdidas en el núcleo y una alta permeabilidad magnética.

»	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, norma	normH	HBCurve1(normB[1/(T)])[A/m]	A/m
	normB	normB	sqrt(B1^2+B2^2+B3^2)	T
	Densidad de flujo magnético, norma	normB	BHCurve1(normH[1/(A/m)])[T]	T
	normH	normH	sqrt(H1^2+H2^2+H3^2)	A/m

Tabla 6.2: Características del acero al silicio.

- COBRE:

Es un elemento químico perteneciente a los metales de transición con alta conductividad eléctrica, ductilidad y maleabilidad, ideal para la fabricación de cables eléctricos y componentes electrónicos, lo que le ha llevado a ser uno de los metales más utilizados en el mundo.

»	Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
✓	Permeabilidad relativa	mur	1	1
✓	Capacidad térmica a presión constante	Cp	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
	Coeficiente de expansión térmica	alpha	17e-6[1/K]	1/K
	Módulo de Young	E	110e9[Pa]	Pa
	Coeficiente de Poisson	nu	0.35	1
	Resistividad de referencia	rho ₀	1.72e-8[ohm*m]	Ω·m
	Resistividad, coeficiente de temperatura	alpha	0.0039[1/K]	1/K
	Temperatura de referencia	T _{ref}	298[K]	K

Tabla 6.3: Características del cobre.

- REFRIGERANTE

El refrigerante es un aceite mineral que reúne las propiedades características de éste, es decir, posee baja viscosidad, alta capacidad calorífica y conductividad térmica. Estas tres propiedades junto con la densidad son dependientes de la temperatura del fluido como se muestra en las figuras 6.7, 6.8, 6.9 y 6.10.

»	Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
✓	Viscosidad dinámica	mu	eta(T[1/K])[Pa*s]	Pa·s
✓	Capacidad térmica a presión constante	Cp	Cp(T[1/K])[J/(kg*K)]	J/(kg·K)
✓	Densidad	rho	rho(T[1/K])[kg/m ³]	kg/m ³
✓	Conductividad térmica	k	k(T[1/K])[W/(m*K)]	W/(m·K)
✓	Permeabilidad relativa	mur	1+X _m (T)	1
✓	Conductividad eléctrica	sigma	10	S/m
✓	Permitividad relativa	epsilon _r	1	1
✓	Coeficiente de dilatación adiabática	gamma	1	1

Tabla 6.4: Características del aceite refrigerante.

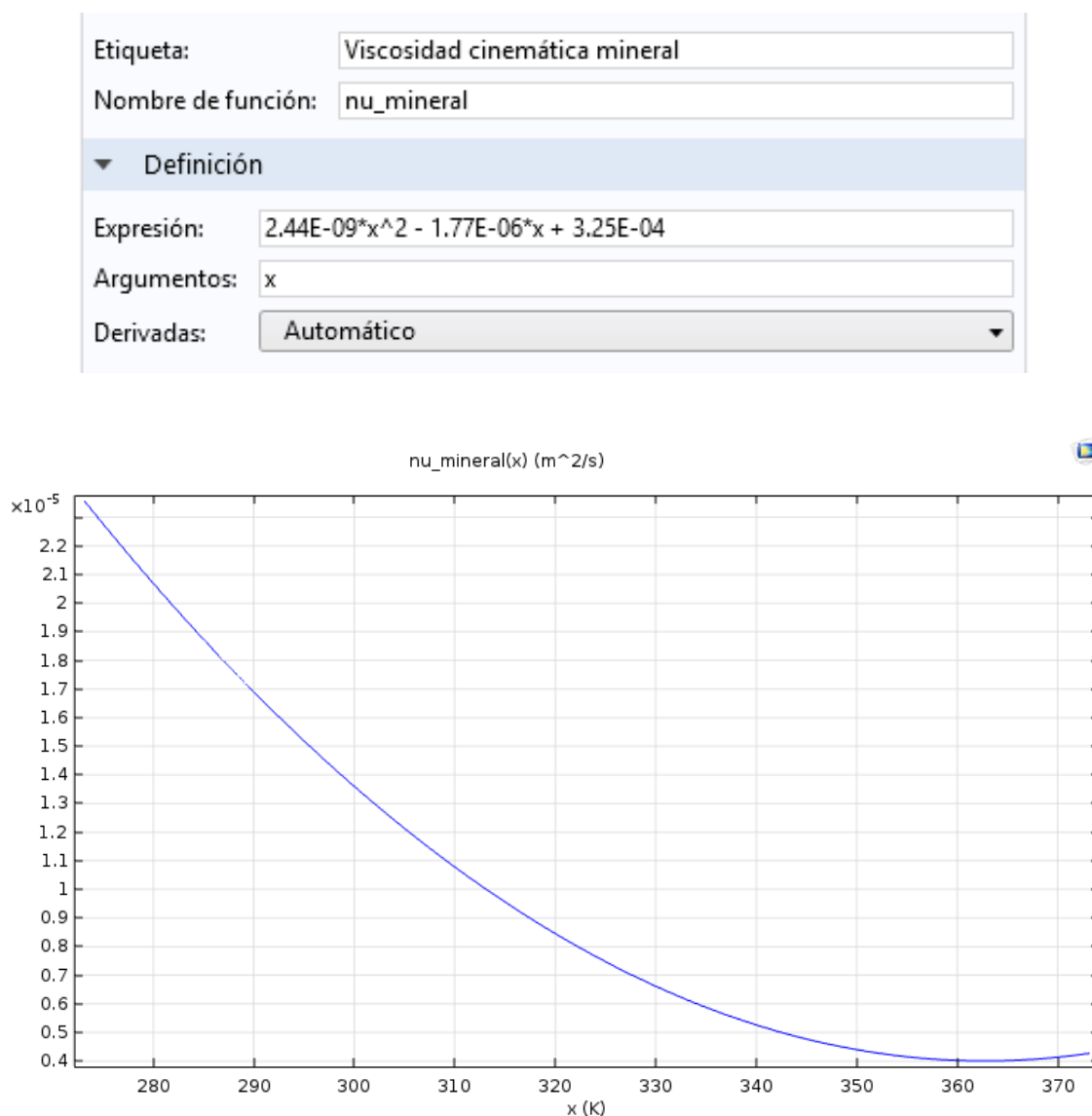


Figura 6.7: Ecuación y gráfico de la viscosidad cinemática.

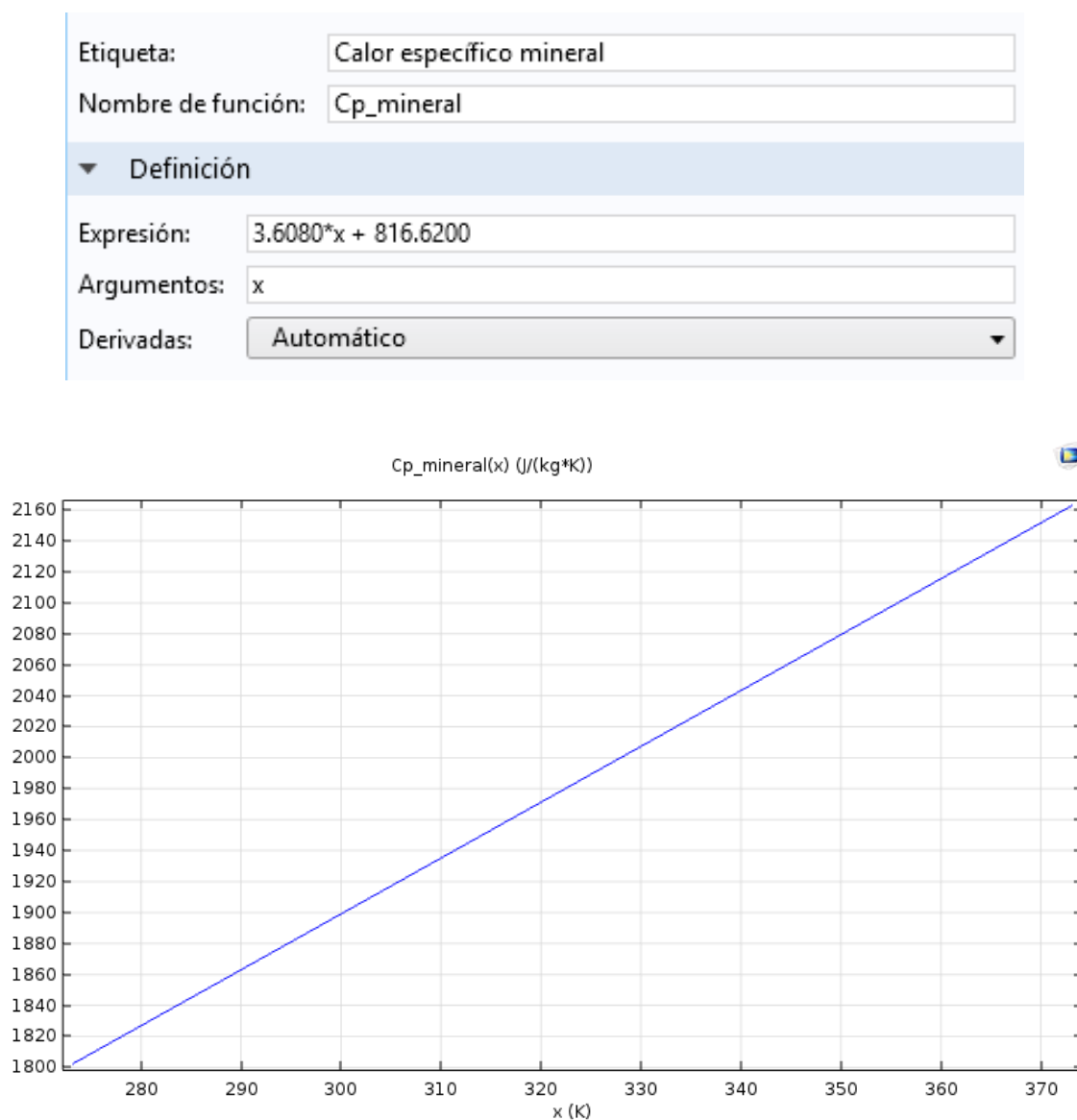


Figura 6.8: Ecuación y gráfico de la capacidad calorífica.

Etiqueta:

Nombre de función:

▼ Definición

Expresión:

Argumentos:

Derivadas:

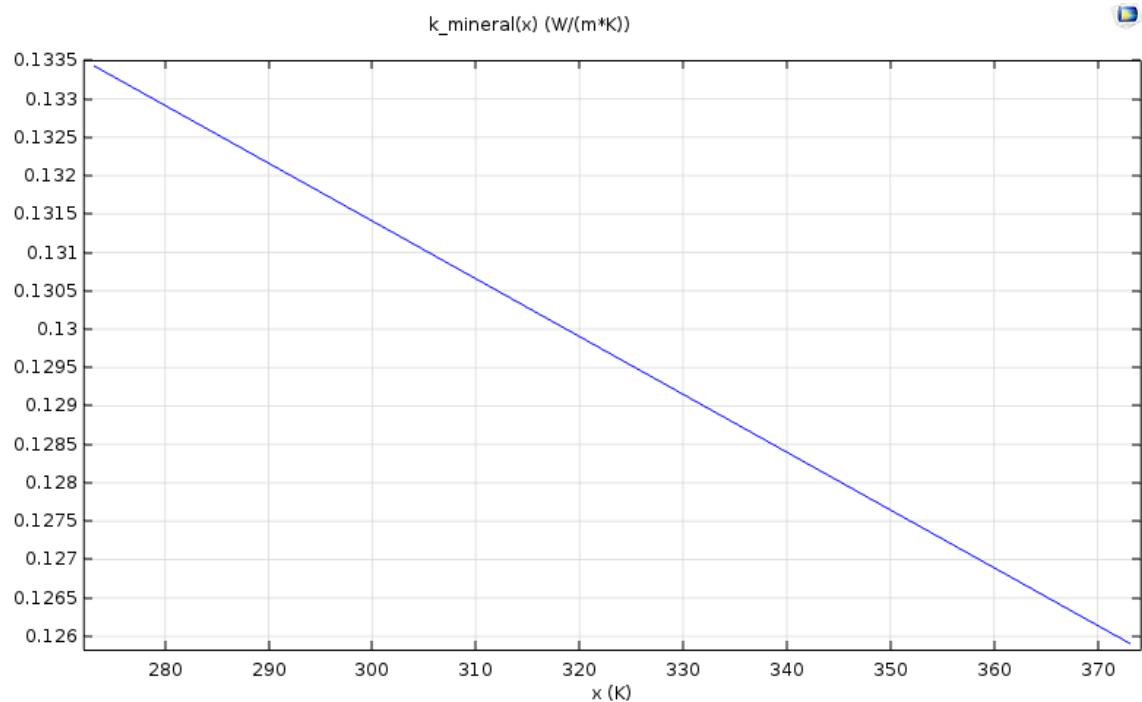


Figura 6.9: Ecuación y gráfico de la densidad de la conductividad térmica.

Etiqueta:

Nombre de función:

▼ Definición

Expresión:

Argumentos:

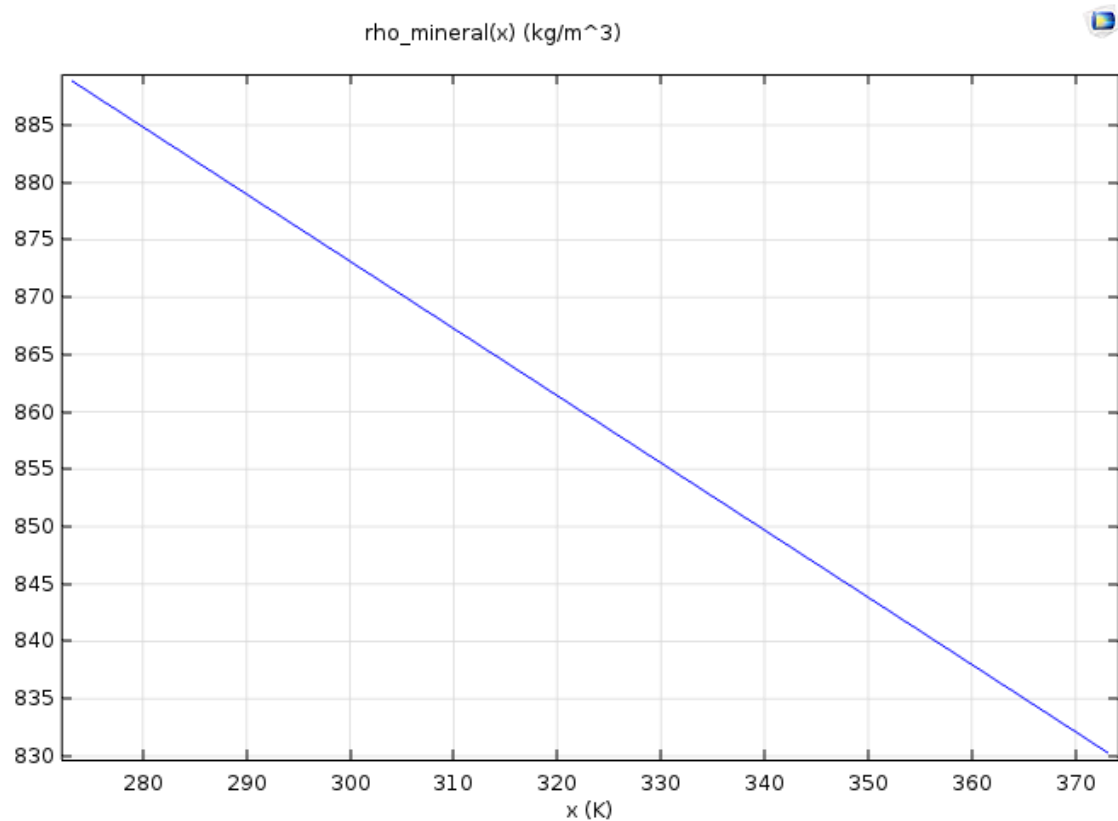


Figura 6.10: Ecuación y gráfico de la densidad del aceite mineral.

6.2.3 Condiciones iniciales y de contorno

En matemáticas las ecuaciones diferenciales, que COMSOL aproxima a ecuaciones algebraicas para poder resolver el presente modelo, están delimitadas a una región específica; esta región cuenta con fronteras o contornos que deben estar bien definidos en todas las físicas involucradas. En estas fronteras es necesario establecer condiciones a cumplir por las físicas resueltas. Dichas condiciones se denominan de contorno. Asimismo, es necesario establecer los valores iniciales de las variables a resolver (en nuestro caso, T , u , A) utilizados por los resolvedores como punto de partida de los cálculos.

- TRANSFERENCIA DE CALOR:
 1. La temperatura inicial del transformador al completo es de 293,15 K.
 2. Las paredes de la cuba son de acero inoxidable. Por ello, se han considerado con resistencia térmica despreciable. Dicho de otra manera, las paredes exteriores de la cuba tienen las mismas temperaturas que las interiores o, lo que es lo mismo, el aceite que está en contacto con las últimas. Por ello, se supone que el aceite se encuentra en contacto directo con el aire y que existe una transferencia de calor por convección entre ambos fluidos. Para modelar este mecanismo de transferencia de calor se requiere de la determinación del coeficiente de convección aire-cuba, figura 6.11.

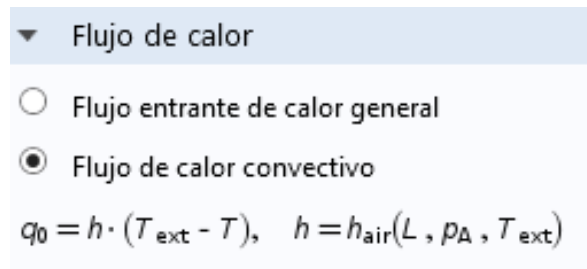


Figura 6.11: Ecuación para la evacuación del calor en las paredes de la cuba mediante convección.

Donde:

-h, coeficiente de convección (W/m²).

-T_{ext}, temperatura del aire exterior (293,15 K).

-P_A, presión del aire exterior (1 atm).

-L, longitud característica.

-Paredes verticales (0,2 m)

-Tapa y base (0,1/4 m)

3. Se consideran dos fronteras, una A y otra B, en las cuales se aplica la condición de simetría lo que implica que a través de ellas no hay flujo de calor, figura 6.12.

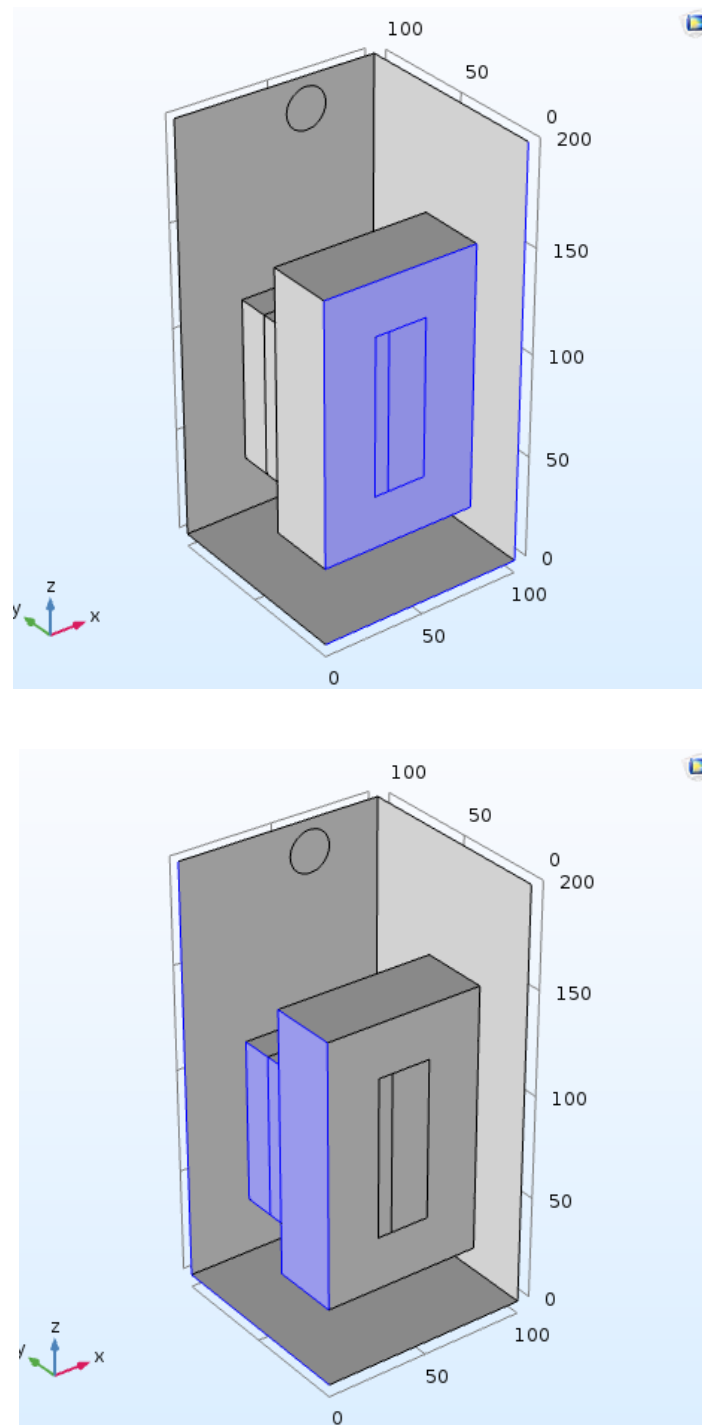
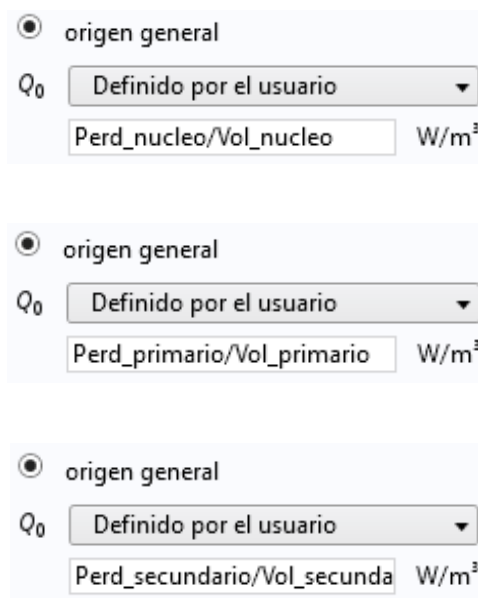


Figura 6.12: Simetrías A y B.

4. Las fuentes de calor proceden de las pérdidas electromagnéticas del núcleo (pérdidas por corrientes de Foucault y de ciclo de histéresis) y de los devanados

primario y secundario (pérdidas por efecto joule). Ambas pérdidas han sido halladas mediante los ensayos de vacío (pérdidas en el hierro, 34 W) y cortocircuito (pérdidas en el cobre, 20W). Estas pérdidas han sido distribuidas uniformemente en el núcleo y en los devanados, figura 6.13.



origen general
 Q_0 Definido por el usuario
 Perd_nucleo/Vol_nucleo W/m³

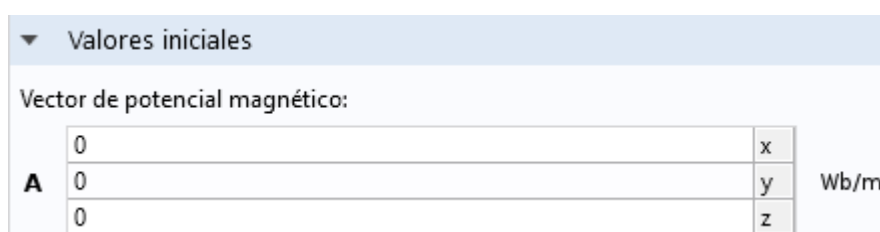
origen general
 Q_0 Definido por el usuario
 Perd_primario/Vol_primario W/m³

origen general
 Q_0 Definido por el usuario
 Perd_secundario/Vol_secunda W/m³

Figura 6.13: Ecuaciones para el cálculo de las fuentes de calor.

- CAMPOS MAGNÉTICOS

- En el instante inicial el valor del vector potencial magnético es 0 Wb/m en las tres coordenadas espaciales.



Valores iniciales

Vector de potencial magnético:

A	0	x	Wb/m
	0	y	
	0	z	

Figura 6.14: Valor del vector potencial magnético para el instante t=0.

2. En una primera aproximación, se ha supuesto que el campo magnético es tan pequeño en las cercanías de las paredes de la cuba que las líneas de flujo no las atraviesan. Es decir, dichas paredes se comportan como aislantes magnéticos.
3. Las bobinas de baja y alta tensión se configuran de acuerdo a lo mostrado en las figuras 6.15 y 6.16 respectivamente. En COMSOL, una bobina de múltiples espiras es posible modelarla homogeneizándola, en lugar de definir explícitamente cada una de sus espiras, como un conjunto de hilos pequeños separados por un aislante eléctrico. La corriente fluye solo en una de las direcciones del cable y es despreciable en cualquier otra dirección.

La densidad de corriente que fluye en el dominio de la bobina se calcula a partir de la excitación de la bobina, ésta puede ser, excitación de corriente, que es la utilizada en la presente simulación, excitación de voltaje, procedente o no de un circuito eléctrico.

▼ bobina

Nombre del embobinado:

modelo de conductor:

Espiras de varias vueltas homogeneizadas
▼

Tipo de embobinado:

Numérico
▼

Excitación del embobinado:

Corriente
▼

Corriente del embobinado:

I_{coil}

A

Figura 6.15: Configuración de la bobina de baja tensión.

▼ bobina

Nombre del embobinado:
AT

modelo de conductor:
Espiras de varias vueltas homogeneizadas

Tipo de embobinado:
Numérico

Excitación del embobinado:
Corriente

Corriente del embobinado:
 I_{coil} $3.5*\sqrt{2}$ [A] A

Figura 6.16: Configuración de la bobina de alta tensión.

4. El núcleo del transformador está conformado por hierro al silicio y su curva de magnetización es la que muestra la figura 6.17.

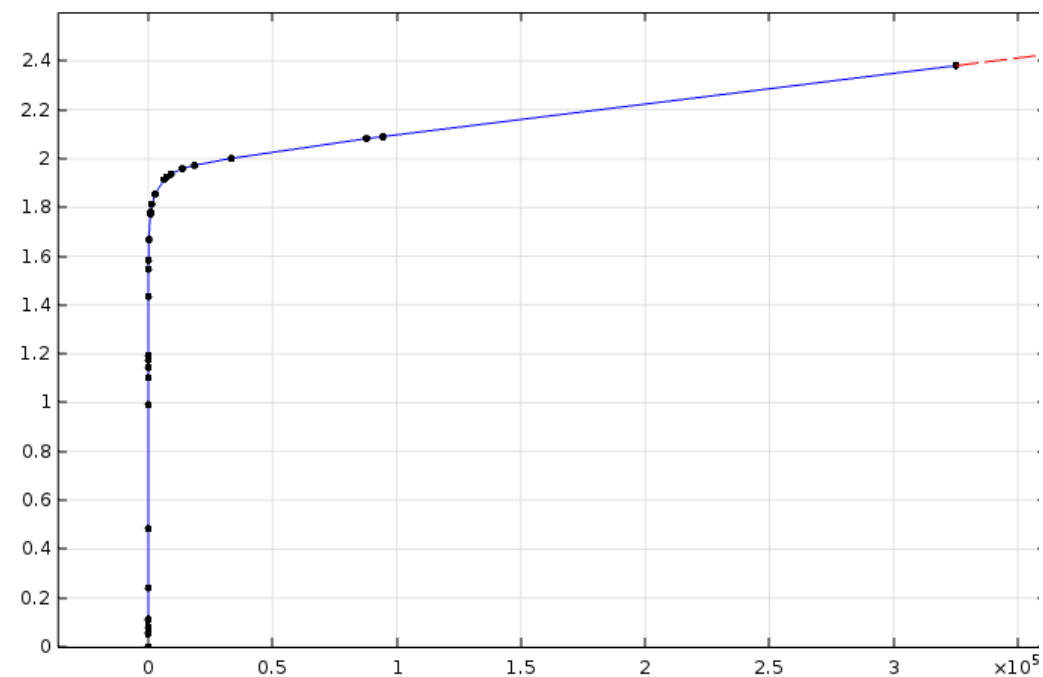


Figura 6.17: Curva de magnetización para el hierro al silicio.

- MECÁNICA DE FLUIDOS
1. En todas las caras del transformador y en las 4 caras verticales de la cuba se cumple la condición de no deslizamiento, es decir, el fluido sobre las paredes no se mueve.
 2. La presión y el campo de velocidades son nulos para el instante inicial.
 3. Se consideran dos fronteras, una A y otra B (figura 6.18), en las cuales se aplica la condición de simetría la cual implica que el flujo del aceite justo fuera de las fronteras es igual al de dentro.

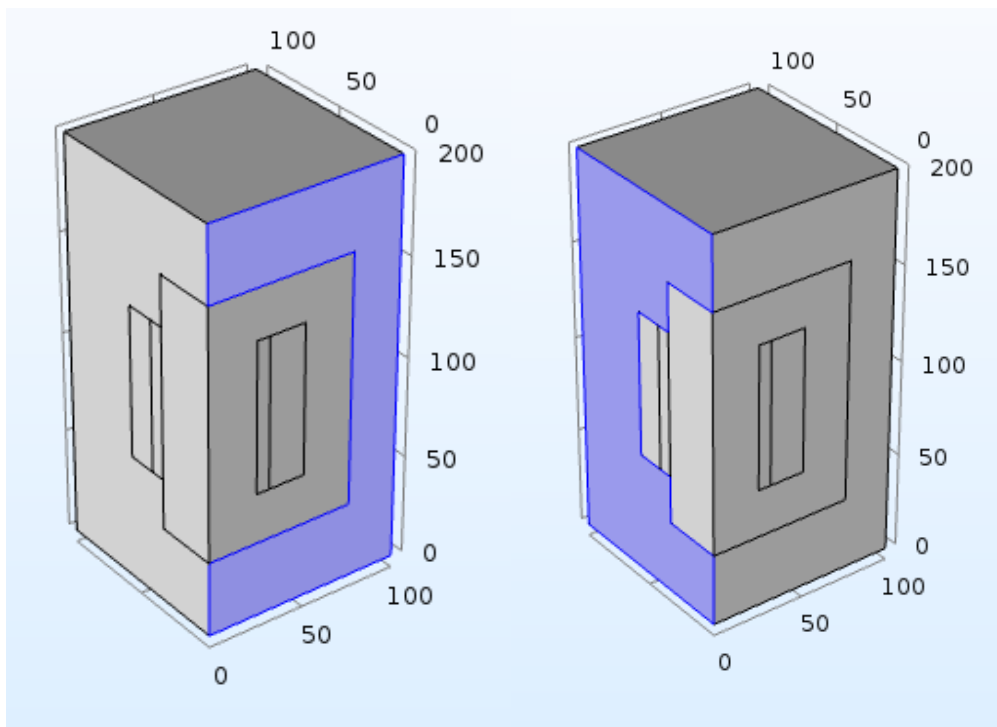


Figura 6.18: Simetrías A y B.

4. La velocidad de entrada del aceite por la tubería inferiores de $u_0 = 0,05$ m/s, y la presión a la salida del aceite en la tubería superior se considera nula, figura 6.19.

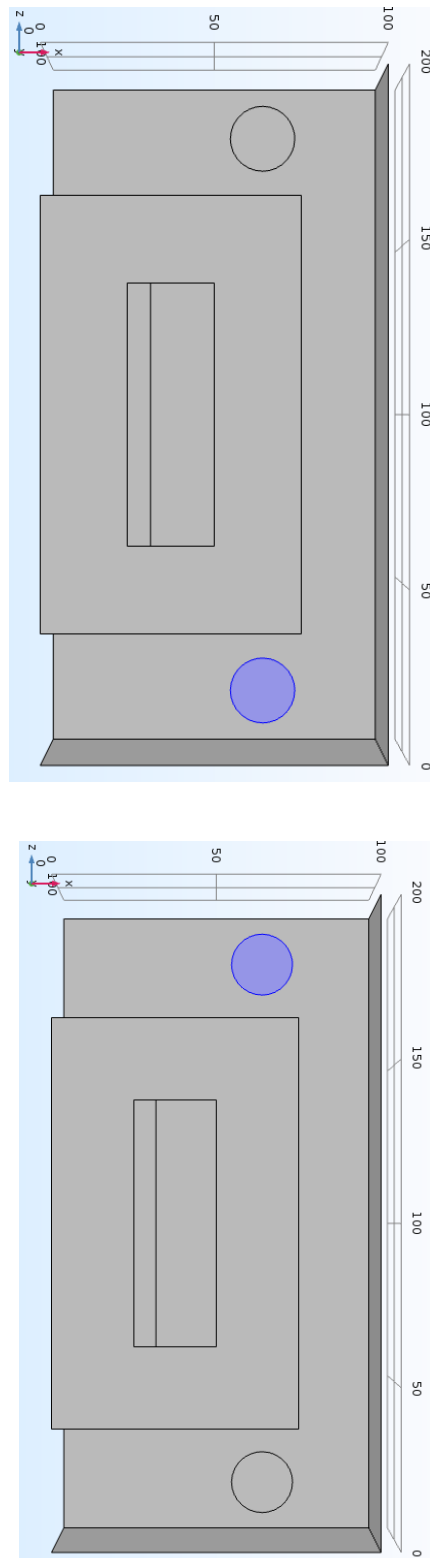


Figura 6.19: Vista frontal de la tubería de entrada y de salida.

6.2.4 Ecuaciones

- CAMPO MAGNÉTICO

La ecuación de gobierno utilizada en la simulación es la ley de Ampere, que se muestra en la ecuación 6.1, permite calcular campos magnéticos a partir de corrientes eléctricas.

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I_T$$

Ecuación 6.1: Ley de Ampere.

La ley de Ampere establece que, para cualquier trayecto de bucle cerrado, la integral de los elementos de longitud multiplicado por el campo magnético en la dirección de esos elementos de longitud, es igual a la permeabilidad multiplicada por la corriente eléctrica encerrada en ese bucle.

- MECÁNICA DE FLUIDOS

Las ecuaciones que rigen la simulación son las de la conservación de la masa que enuncia que la masa que entra en un intervalo de tiempo es igual a la que sale en ese mismo intervalo de tiempo y la de la conservación de la cantidad de movimiento, que a su vez dice que, la tasa de cambio de la cantidad de movimiento de una porción dada de fluido es igual a la resultante de las fuerzas que actúan sobre esta porción, figura 6.20.

▼ Ecuación

Mostrar ecuaciones asumiendo:

Estudio 1, Frecuencia-Estacionario ▼

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) \right] + \mathbf{F}$$

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0$$

Figura 6.20: Ecuaciones de la conservación de la cantidad de movimiento y de la masa respectivamente.

Donde:

- $\mathbf{u}$, es la velocidad del fluido, en este caso del refrigerante (m/s).

- p , es su presión (Pa).

- ρ , es su densidad (kg/m³).

- μ , es su viscosidad dinámica (Pa·s).

- $\mathbf{F}$, fuerzas de flotabilidad (N/m³). Se define como el resultado del producto de la aceleración de la gravedad por la diferencia entre la densidad del aceite mineral y una densidad referencia, figura 6.21.

Fuerza volumétrica:

	0	x
F	0	y
	-g_const*(spf.rho-900[kg/m^3])	z

N/m³

Figura 6.21: Ecuación para la fuerza de flotabilidad.

- TRANSFERENCIA DE CALOR

La ecuación que rige la transferencia de calor en sólidos en la simulación implica las condiciones mostradas en la figura 6.22.

▼ Ecuación

Mostrar ecuaciones asumiendo:

Estudio 1, Frecuencia-Estacionario ▼

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{\text{ted}}$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

Figura 6.22: Ecuaciones que rigen la transferencia de calor en sólidos.

La ecuación que rige la transferencia de calor en fluidos en la simulación implica las condiciones mostradas en la figura 6.23.

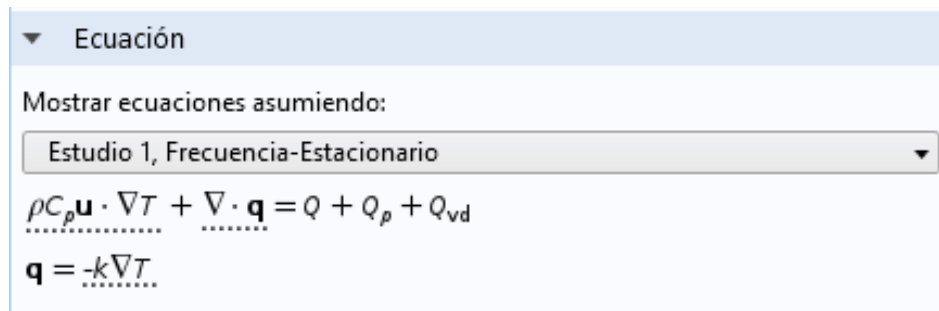


Figura 6.23: Ecuaciones que rigen la transferencia de calor en fluidos.

Donde:

- C_p , calor específico (J/kg·K).

- q , flujo de calor (W/m²).

- Q , Q_{ted} , Q_p , Q_{vd} , pérdidas de calor (J).

- k , conductividad térmica (W/m·K)

6.2.5 Mallado

La construcción de un mallado es necesaria para resolver la simulación mediante el método de análisis de elementos finitos, que es un método que convierte un número infinito de variables desconocidas en un número limitado de elementos de comportamiento bien definido.

Este método consiste primeramente en la construcción de un modelo geométrico que posteriormente se subdivide en partes pequeñas con formas geométricas más sencillas denominadas elementos que están interconectados en puntos denominados nodos.

Esta red de elementos es lo que se denomina un mallado.

Por último, el programa resuelve un numero de ecuaciones igual al número de elementos de los que consta el mallado, aproximando una solución. La solución depende de la calidad del mallado ya que cuanto mayor sea el número de elementos más aproximada a la realidad será la solución de la simulación.

La malla de la simulación de la cual es objeto este estudio consta de las siguientes características constructivas y de calidad:

Malla completa

Vértices de malla: 53266

Tipo de elemento: Todos los elementos ▼

Elementos tetraédricos: 233462

Elementos piramidales: 1238

Elementos de prisma: 22786

Elementos triangulares: 17527

Elementos cuadriláteros: 600

Elementos de arista: 1086

Elementos de vértice: 54

— Estadísticas del elemento de dominio

Número de elementos: 257486

Calidad mínima de elemento: 0.003117

Calidad media de elemento: 0.6463

Ratio de volumen de elemento: 1.507E-4

Volumen de malla: 2000000.0 mm³

Tasa máxima de crecimiento: 7.854

Tasa media de crecimiento: 1.869

Figura 6.24: Características y calidad de la malla

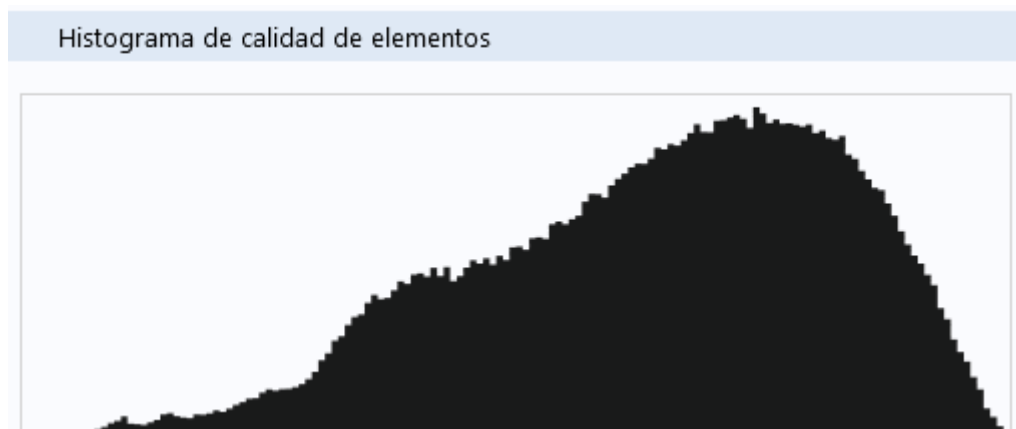
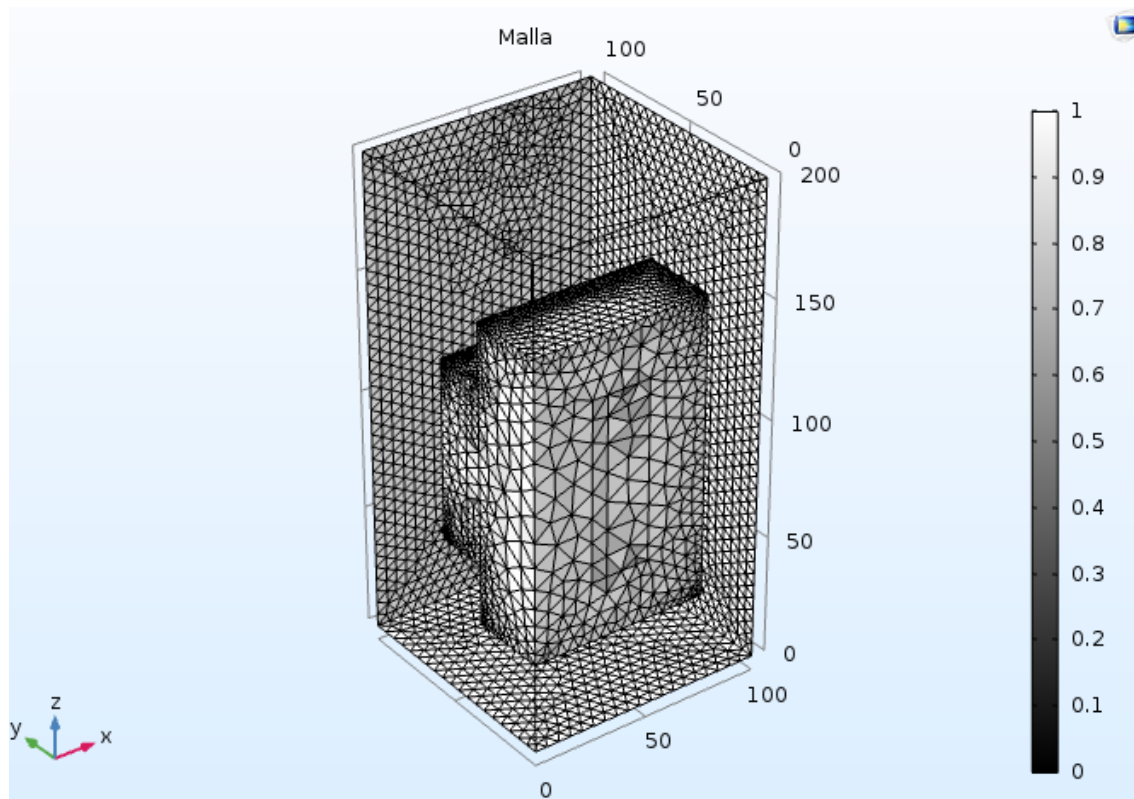
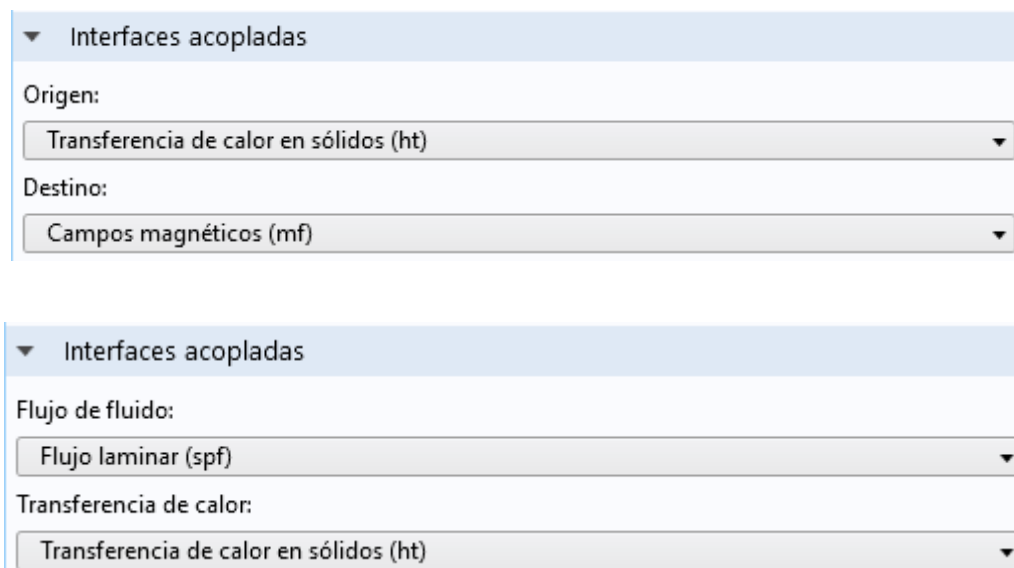


Figura 6.25: Grafico que muestra la calidad del mallado.

6.2.6 Multifísica

La “multifísica” es un punto de la simulación necesario y previo al estudio ya que define los distintos acoplamientos entre las físicas involucradas.



El primer panel, titulado "Interfaces acopladas", muestra la configuración de un acoplamiento entre "Transferencia de calor en sólidos (ht)" (origen) y "Campos magnéticos (mf)" (destino).

El segundo panel, también titulado "Interfaces acopladas", muestra la configuración de un acoplamiento entre "Flujo laminar (spf)" (origen) y "Transferencia de calor en sólidos (ht)" (destino).

Figura 6.26: Físicas relacionadas entre sí en la simulación.

En el primer acoplamiento se utiliza la temperatura de origen procedente del nodo transferencia de calor para evaluar las propiedades de los materiales del nodo destino campos magnéticos. El segundo acoplamiento es utilizado cuando las propiedades del fluido a simular dependen de la temperatura.

6.2.7 Estudio

Un estudio crea un conjunto de datos *solución* además de grupos *gráficos* con los resultados de las físicas para las que se calcula la solución. El estudio de la presente simulación consta de las siguientes fases:

- Análisis geométrico de las bobinas: se utiliza para calcular el flujo de corriente de una bobina modelada en 3D. Este es un paso de pre-procesamiento que debe resolverse antes de resolver el paso principal del estudio. Consta de dos partes diferenciadas en las que se analizan por separado la bobina de baja tensión y la de alta tensión.

Nombre de las bobinas:

▼ 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 (ht)	☐	Ajustes de la física ▼
	Flujo laminar (spf)	☐	Ajustes de la física ▼

Nombre de las bobinas:

▼ 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 ▼

Figura 6.27: Configuración del análisis geométrico de las bobinas.

- Análisis frecuencia-estacionario: En esta fase se calcula el campo de temperaturas cuando se ha alcanzado el equilibrio térmico además del campo magnético y el campo de velocidades y presiones.

▼ Configuración del estudio

Frecuencia:

► Resultados mientras resuelve

▼ 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 (ht)	☒	Ajustes de la física ▼
	Flujo laminar (spf)	☒	Ajustes de la física ▼

Figura 6.28: Configuración del análisis frecuencia-estacionario.

Capítulo 7: Resultados obtenidos

El nodo Resultados de COMSOL contiene las herramientas necesarias para el post-procesamiento y el análisis de los resultados de la simulación, incluyendo visualizaciones, animaciones y análisis de datos.

7.1 Valores derivados y tablas

En este sub-apartado de COMSOL se calculan integrales, promedios, medias cuadráticas, desviaciones estándar, varianzas, máximos o mínimos de cualquier serie de datos, obteniendo entonces valores derivados, que posteriormente aparecen en una o varias tablas en la ventana “Tabla”, donde a su vez existen diferentes opciones para ajustar la precisión y anotación de los valores derivados.

En la presente simulación los valores derivados obtenidos son los mostrados en la figura 7.1.

Velocidad de salida de la cuba (mm/s)	Temperatura media de la tapa (°C)	Temperatura media del aceite (°C)	Temperatura media de los devanados (°C)
55,2	20,5	21,6	42,7
Temperatura máxima de los devanados (°C)	Temperatura media del núcleo (°C)	Temperatura máxima del núcleo (°C)	
42,8	42,7	42,8	

Tabla 7.1: Valores derivados.

7.2 Densidad de flujo magnético

La densidad de flujo magnético es la cantidad de líneas de flujo que atraviesan perpendicularmente una unidad de área, es una magnitud que representa el campo magnético.

En la figura 7.1 se observa la densidad de flujo magnético resultante en la simulación.

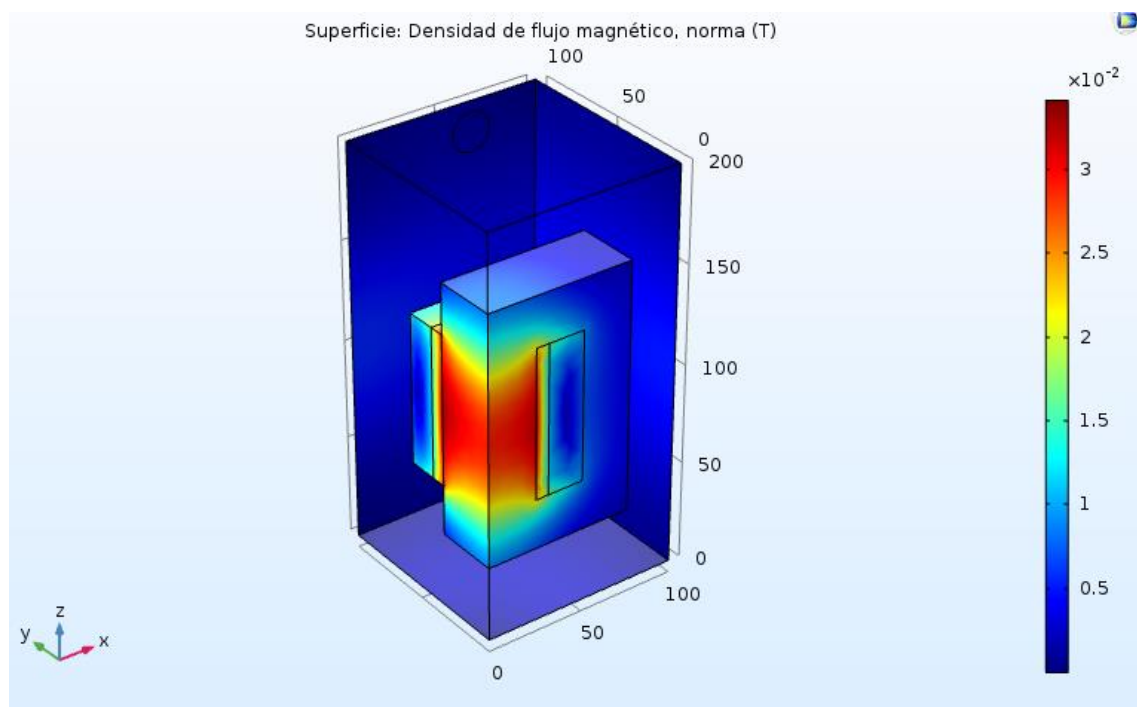


Figura 7.1: Densidad de flujo magnético. Vista isométrica de la geometría.

Por un lado, en las figuras 7.1 y 7.2 se observa que la densidad de flujo magnético tiene valores muy bajos en toda la geometría, esto es debido a que la excitación de los devanados es insuficiente. Por otro lado, los valores máximos que se encuentran situados en la columna central del núcleo del transformador y en la zona interior de los devanados son 6 veces mayores a los valores más bajos que se localizan en el aceite.

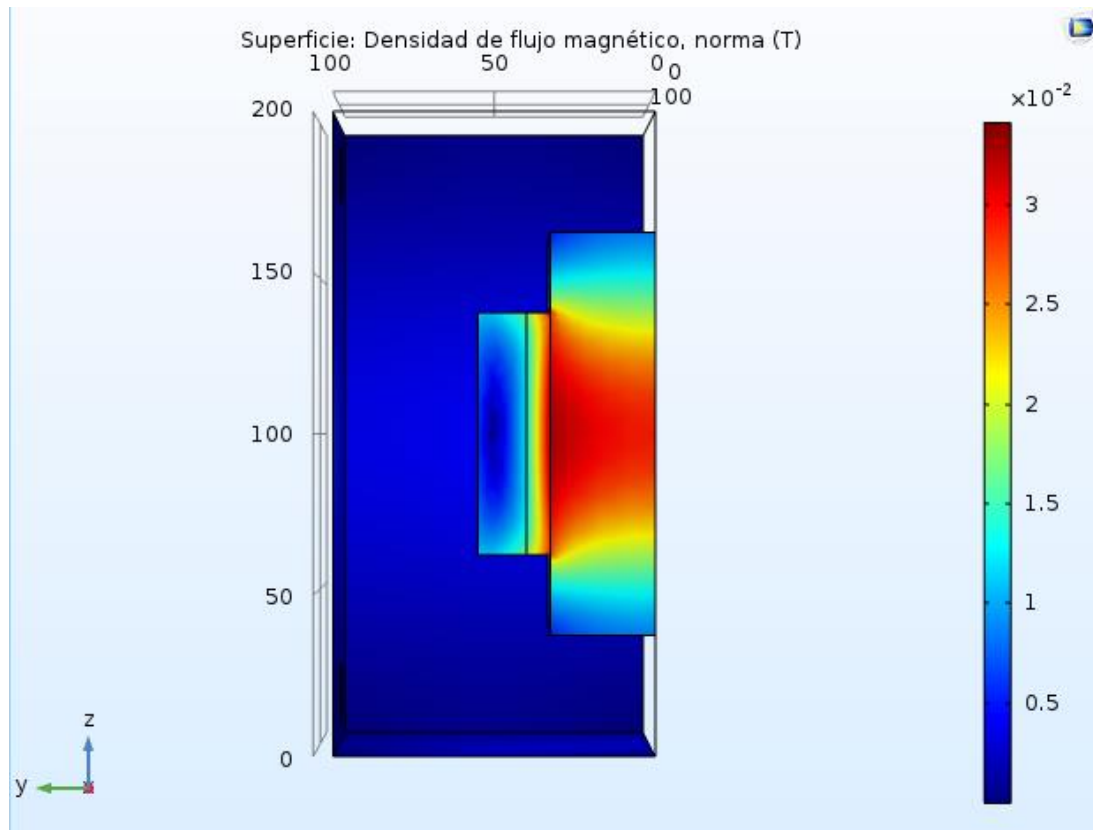


Figura 7.2: Densidad de flujo magnético. Vista lateral de la geometría.

7.3 Temperatura

En la figura 7.3 se observa la distribución de temperaturas en la geometría mediante un gráfico de isosuperficies, las cuales son superficies que representan puntos de un valor constante de una magnitud dentro de un volumen de espacio, siendo en este caso la magnitud objeto la temperatura.

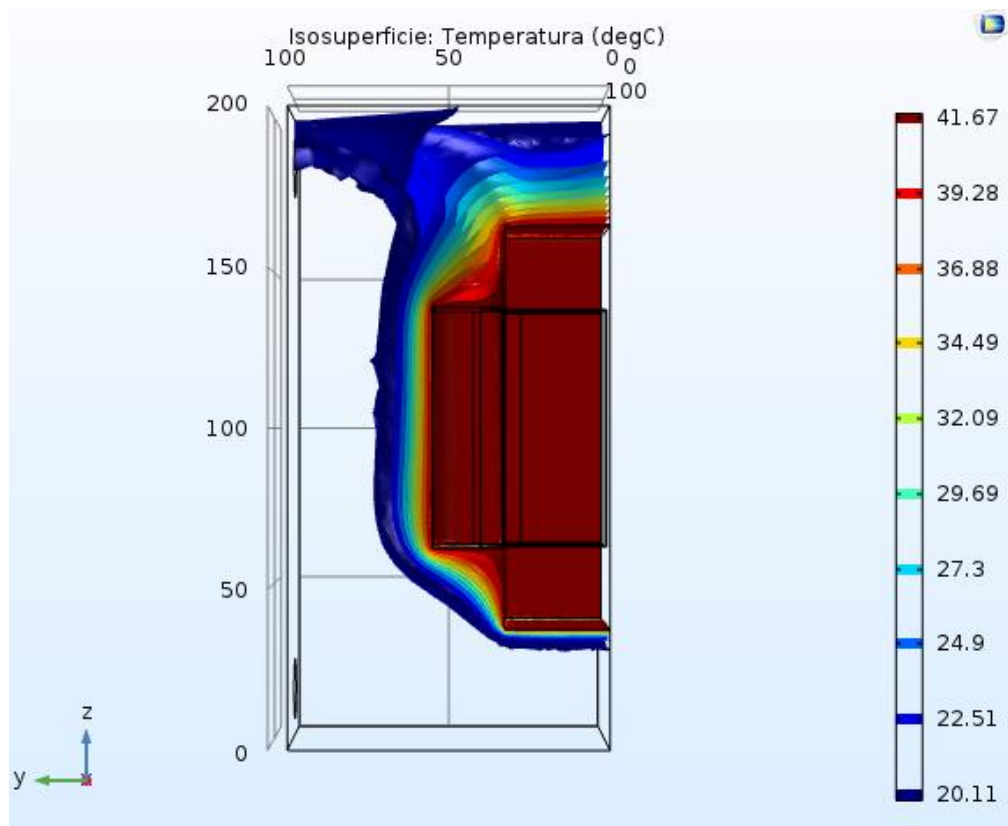
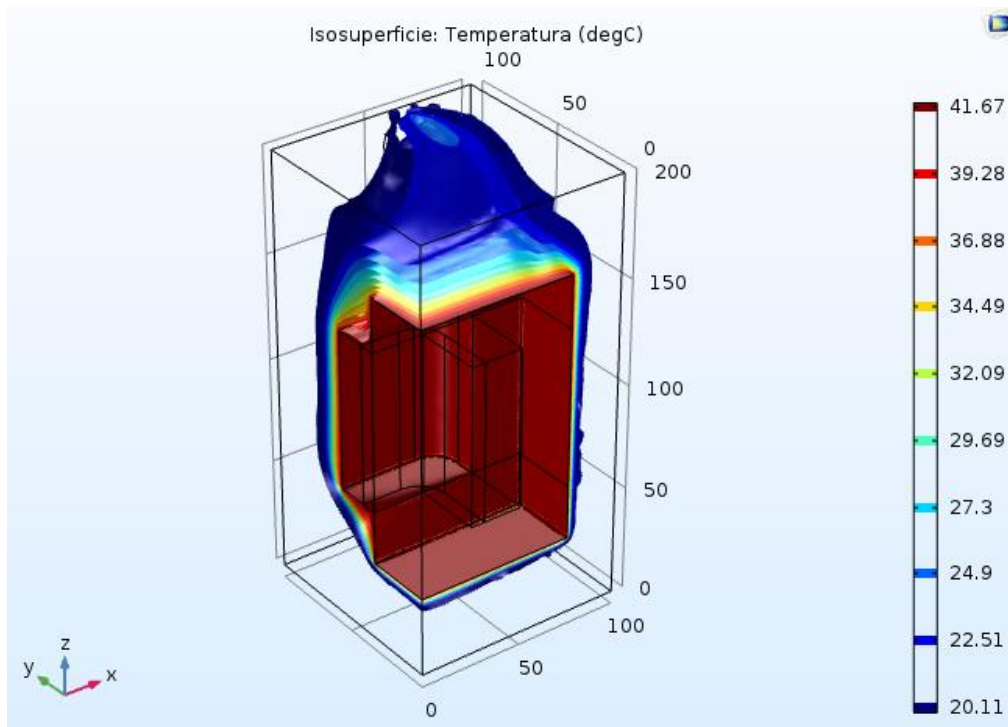


Figura 7.3: Gráfico de isosuperficies de temperatura a lo largo de la geometría.

En la figura 7.3 se observa como la parte central del aceite que es la que circula más cerca de del núcleo y de los devanados se encuentra a una temperatura mayor, ya que el aceite más alejado de estos se enfría al entrar en contacto con las paredes de la cuba.

En las zonas donde las isosuperficies se encuentran más juntas entre sí el gradiente de temperatura es mayor ya que la variación de temperatura por unidad de longitud es mayor.

En la figura 7.4 en una vista superior de la geometría se aprecian las capas de diferentes temperaturas que el aceite posee al llegar a la tubería de salida.

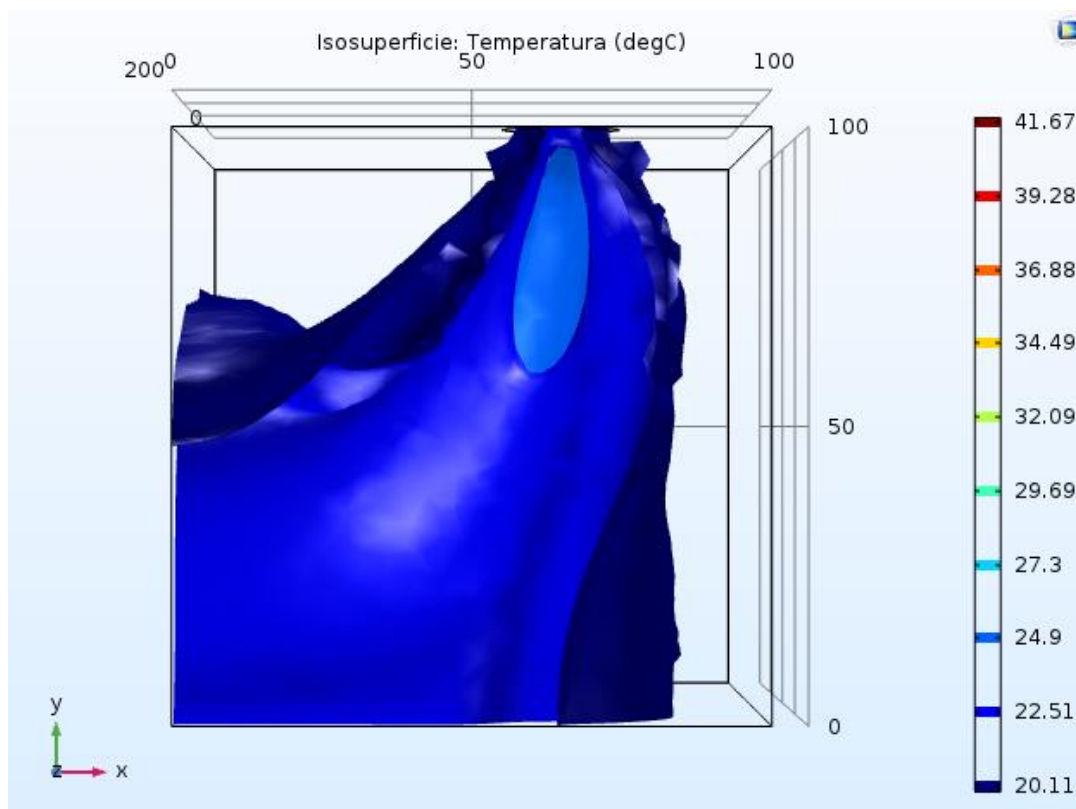


Figura 7.4: Temperatura en el aceite de salida.

7.4 Velocidad

Un campo de velocidad es un tipo de campo vectorial, matemáticamente se define como una función vectorial de las coordenadas y físicamente representa la distribución espacial de una magnitud vectorial que en este caso es la velocidad del fluido.

En este caso se ha representado el campo de velocidad del fluido mediante un gráfico de volumen de flechas, figura 7.5.

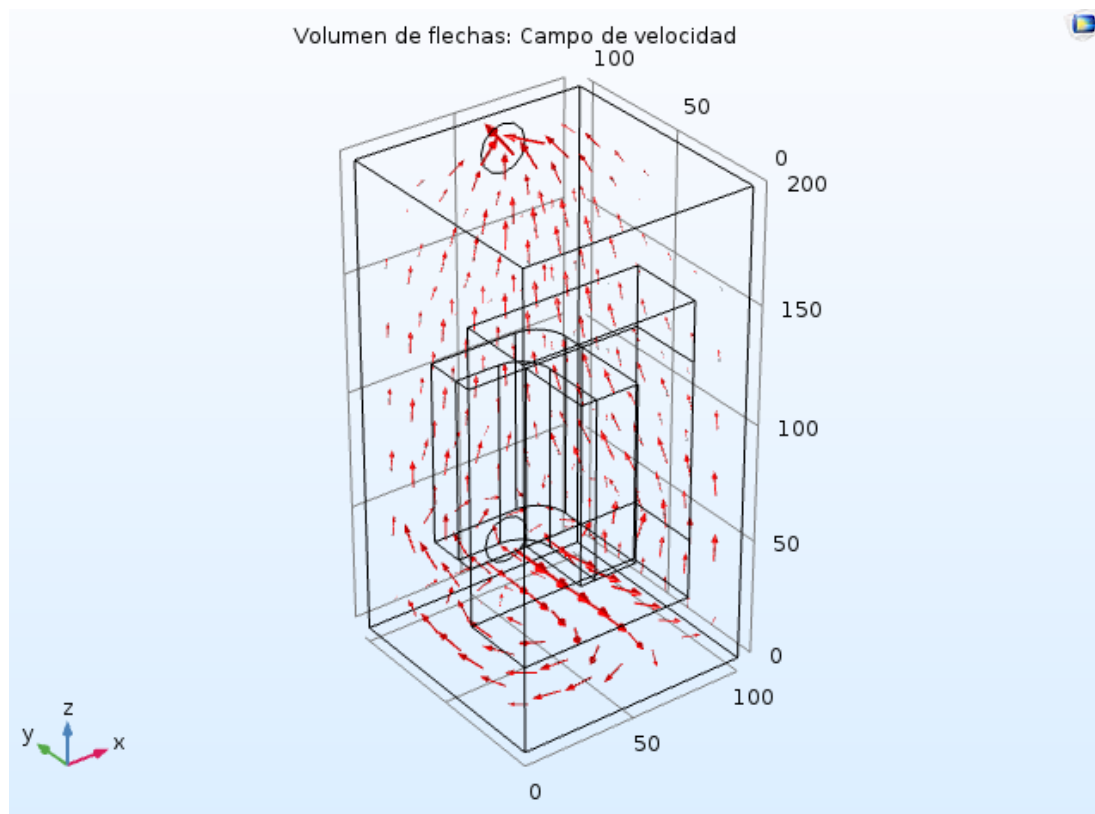


Figura 7.5: Vista isométrica del gráfico de velocidades mediante flechas.

Cada flecha indica la dirección del fluido en ese punto y la velocidad que es proporcional a su tamaño.

Como se puede apreciar en la vista superior de la geometría, figura 7.6, el fluido entra a la cuba por la tubería inferior y se bifurca en dos corrientes de sentido opuesto. La primera corriente asciende por la pared confluyendo en la tubería de salida con la segunda, que tras pasar por debajo del transformador asciende por la pared opuesta refrigerando los devanados y el núcleo del transformador capturando parte del calor que desprenden.

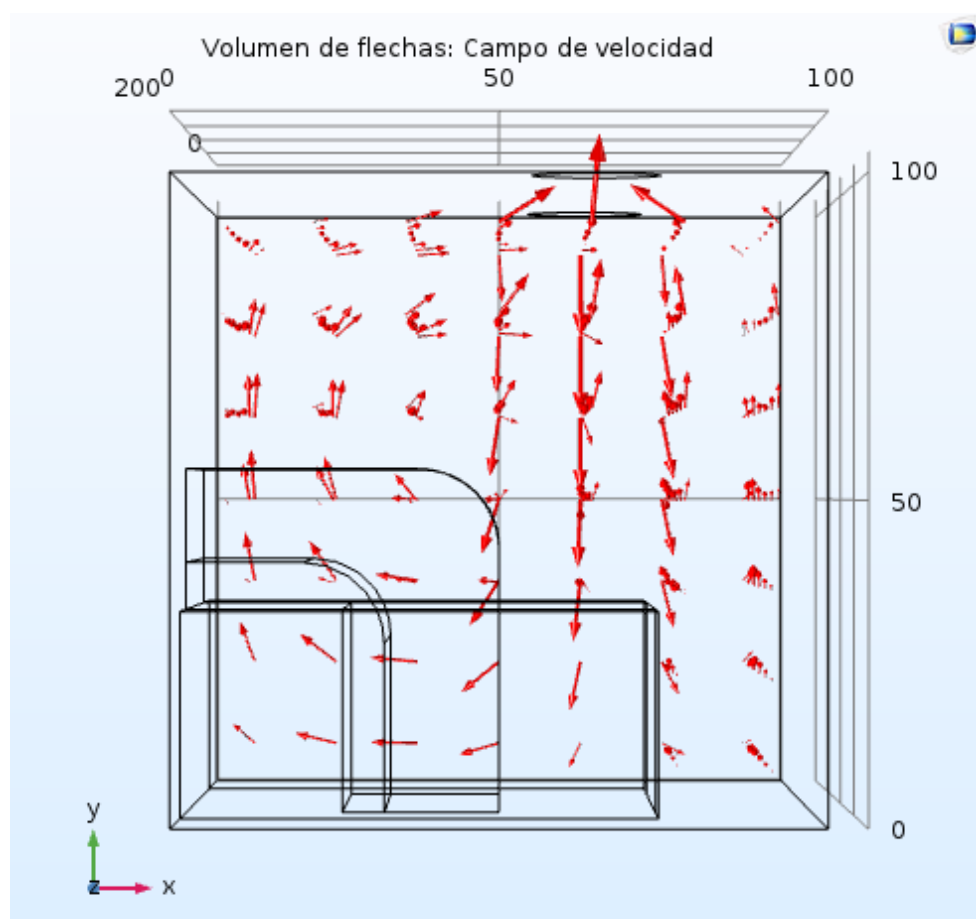


Figura 7.6: Vista superior del gráfico de volumen de flechas.

7.5 Presión

En la presente simulación la presión del fluido dentro de la cuba se ha representado mediante un gráfico de curvas de nivel, figura 7.7.

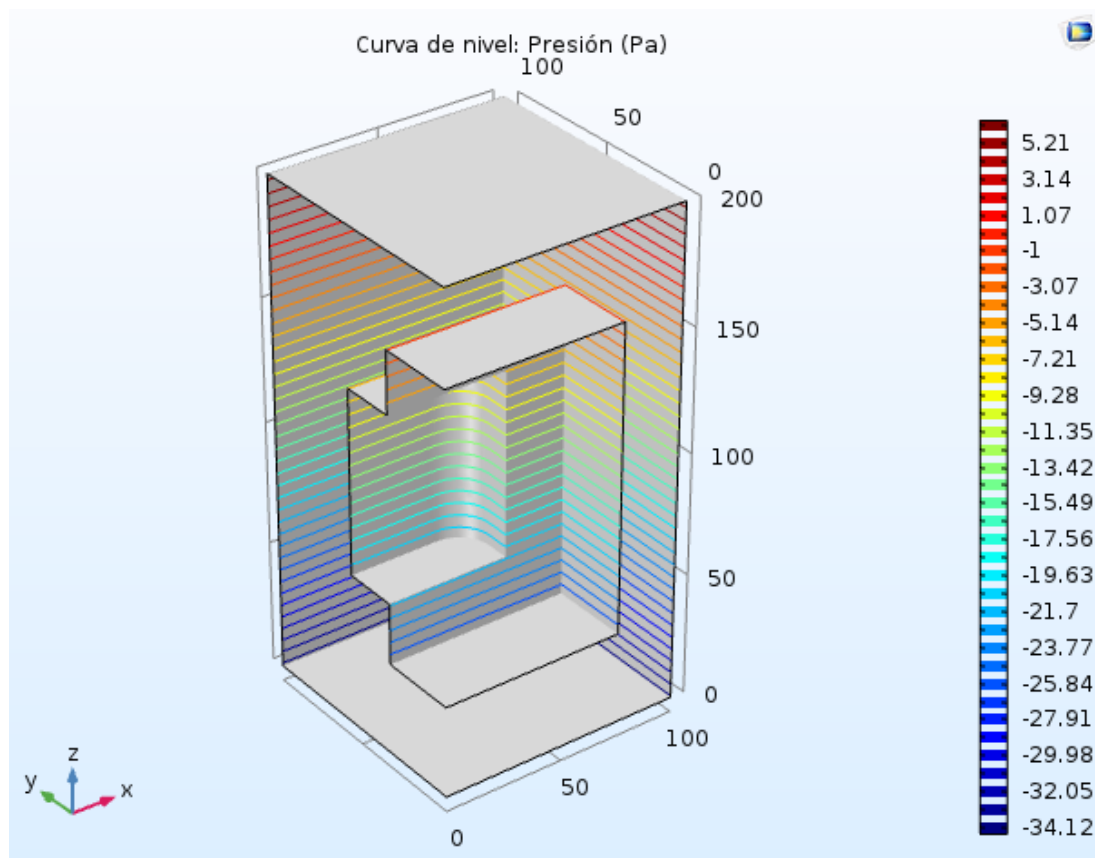


Figura 7.7: Vista isométrica del gráfico de curvas de nivel.

Las curvas de nivel son líneas que conectan puntos de presión constante y surgen de la intersección de planos horizontales de igual presión con las paredes exteriores de la cuba.

La diferencia de presiones a lo largo del fluido que se puede apreciar en el gráfico junto con las fuerzas volumétricas de flotabilidad, debidas a la perdida de densidad del fluido, generan la circulación del fluido dentro de la cuba.

7.6 Gráfico de tensiones

En la figura 7.8 se muestra el gráfico con las fuerzas electromotrices inducidas (f.e.m) en las bobinas del primario y del secundario.

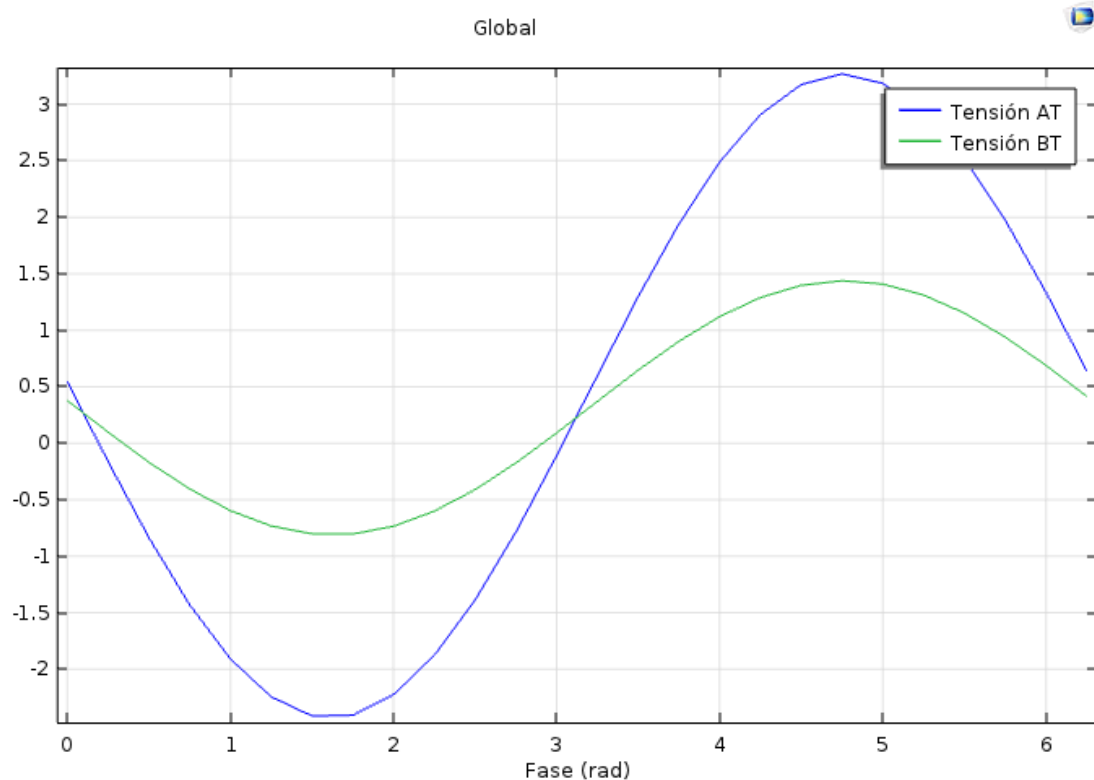


Figura 7.8: Gráfico de tensiones en las bobinas.

Como se puede observar, la relación de transformación entre las tensiones es 2.

Otro aspecto importante que se puede apreciar en el gráfico es que las tensiones no son las esperadas y son significativamente más pequeñas, esto es debido a que se desconoce el número de espiras que deben tener las bobinas tanto primaria como secundaria.

Capítulo 8: Conclusiones

Después de analizar los resultados aportados por el presente estudio realizado en régimen permanente, es posible concluir que el objetivo inicial se ha cumplido, ya que se ha conseguido que el modelo geométrico-numérico inicial combine con éxito las tres físicas (mecánica de fluidos, transferencia de calor y campos magnéticos) que posee el transformador, determinando la capacidad refrigerante de un aceite mineral.

Capítulo 9: Líneas de desarrollo futuras

A pesar de que el objetivo previamente fijado -desarrollo inicial de un modelo numérico fluido-térmico-magnético de un transformador monofásico bañado en aceite- ha sido alcanzado, se hace necesario continuar ajustando el mencionado modelo al experimento que se intenta replicar, realizando una serie de mejoras entre las que se encuentran las siguientes:

- Aproximar la geometría del modelo numérico a la geometría del transformador real
- Mejorar el modelo físico-matemático para que replique con mayor precisión los fenómenos físicos que realmente se producen en el experimento.
- Mejorar el nivel de mallado para obtener soluciones numéricas más fiables.

Todos estos trabajos tienen como finalidad última la validación del modelo geométrico-numérico mediante la comparación de sus temperaturas con las experimentales.

Referencias

1. *Prevention of hot spot temperature in a distribution transformer using magnetic fluid as a coolant.* **Patel, Jaykumar, Parekh, Kinnari y Upadhyay, R.V.** s.l. : ELSEVIER, 2016, International Journal of Thermal Sciences.
2. **Mora, Jesus Fraile.** *Máquinas Eléctricas.* s.l. : McGRAW-HILL, 2003.
3. **Barbeito, Pablo, Carrá, Martin y Sarlinga, Mariel.** Universidad de Buenos Aires. [En línea] Septiembre de 2009. <http://materias.fi.uba.ar/6210/Ferrofluidos%202.pdf>.
4. **Rodriguez, Paul Soto.** Universidad de Santiago de Chile-Facultad de Ciencia-Departamento de Física. *Propiedades magnéticas de los ferrofluidos.* Enero de 2006.
5. **Dpto. de Tecnología Electrónica - Universidad de Vigo.** [En línea] 11 de Octubre de 2011. [Citado el: 8 de Noviembre de 2016.] http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/magnetismo_materiales.htm#ferrofluido.
6. **Takeno, Minako.** Mathematical Institute of the Serbian Academy of Science and Arts. [En línea] 1999. <http://www.mi.sanu.ac.rs/vismath/takeno/index.html>.
7. **Rosenthal, A.** Department of Electrical Engineering and Computer Science. *Ferrofluid Flow and Torque Measurements in Rotating Magnetic.* 2002.

8. **Tejedor, Ascensión Sanz.** La industria de los agentes tensoactivos. [En línea] Escuela de Ingenierías Industriales- Universidad de Valladolid.
<https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-10.php>.

9. **Wenceslao Gonzalez-Viñas y Héctor L. Mancini.** *Ciencia de los materiales*. s.l. : Ariel, 2003.