

ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y
ENERGÍA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MAGNETO-
FLUIDO-TÉRMICO DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

MODELIZATION OF THE THERMAL-FLUID-MAGNETICAL BEHAVIOUR OF A SINGLE PHASE
TRANSFORMER



AUTOR: DAVID MARTÍNEZ ANTÓN

DIRECTOR DE PROYECTO: FERNANDO DELGADO

COORDINADOR: RAÚL HUSILLOS

FECHA: 12/09/2016

	Estudio de la modelización del comportamiento magneto fluido térmico de un transformador monofásico	
---	--	---

Agradecimientos:

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento en primer lugar a mis padres, por todo el apoyo proporcionado tanto afectiva como académicamente, a mis amigos, a mis compañeros de universidad por estos años inolvidables, a mi tutor, y a todo el profesorado de la facultad.

Gracias por todo.

Índice general:

Capítulo 1: Introducción	5
Capítulo 2: Objetivo.....	6
Capítulo 3: Antecedentes	7
Capítulo 4: Estado del arte	14
4.1. Fundamentos teóricos	14
4.1.1. Apartado electromagnético	14
4.1.2. Ecuaciones de Maxwell:	18
4.1.3. Ley de Gauss para el campo magnético:	19
4.1.4. Ley de Faraday-Lenz:	20
4.1.5. Ley de Ampère generalizada:	21
4.1.6. Conceptos básicos sobre transformadores:.....	23
4.1.7. Aspectos constructivos:.....	24
4.1.8. Historia de los fluidos refrigerantes:	35
4.1.9. Principales propiedades de los líquidos dieléctricos:.....	37
4.1.10. Fluidos refrigerantes alternativos en la actualidad:.....	44
4.1.11. Principio de funcionamiento de un transformador ideal:.....	47
4.2. Apartado de mecánica de fluidos:.....	50
4.2.1. Conceptos previos:.....	50
4.2.2. Hipótesis:.....	55
4.2.3. Ecuaciones de Navier – Stokes:.....	56
4.3. Apartado transferencia de calor:	60
4.3.1. Conceptos básicos:.....	60
4.3.2. Ecuación de la conducción térmica:	64
4.3.3. Ecuación de la convección térmica:	65
Capítulo 5: Metodología del modelo de elementos finitos:	66
Capítulo 6: Descripción del modelo geométrico:	69

Capítulo 7: Modelo numérico	73
7.1 Ecuaciones de gobierno:	73
7.2 Condiciones de contorno e iniciales:.....	75
7.3 Mallado:	78
7.4 Propiedades de los materiales:	80
Capítulo 8: Resultados obtenidos	84
Capítulo 9: Conclusiones	95
Capítulo 10: Artículos para el estado del arte	96
10.1 Artículos que han inspirado el proyecto:	96
Capítulo 11: Referencias.....	97
11.1 Referencias bibliográficas:	97

Capítulo 1: Introducción

El estudio versa sobre analizar el comportamiento de un transformador monofásico considerando 3 físicas diferentes: La de mecánica de fluidos, la cual nos permite modelar el movimiento del aceite dentro de la cuba del transformador y devanados, la física de transferencia de calor, que nos permite determinar la distribución de temperaturas tanto en las partes sólidas como líquidas del transformador y la electromagnética, con la que se modelan los campos magnéticos en el interior del transformador, tanto en el fluido refrigerante como en el núcleo de este.

Para realizar todo ello emplearé de un programa de software de análisis y solución por elementos finitos para varias aplicaciones físicas y de ingeniería conocido como Comsol Multiphysics 5.0. , el cual está también dotado de una interfaz a Matlab, así como a sus *toolboxes* las cuales proporcionan un amplio espectro de variedades de programación, así como pre y postprocesado.

El citado programa nos permite aplicar las físicas anteriormente comentadas sobre un modelo geométrico, el cual se trata de un transformador monofásico acorazado bañado en aceite.

Este modelo geométrico en cuestión, es una aproximación a la realidad ya que han sido realizadas ciertas consideraciones para simplificar tanto el estudio como la simulación del mismo; un ejemplo de esto será que el fluido, aceite mineral, no entra en la cuba de la manera que hemos simulado ya que se considera que entra por abajo, aunque en realidad este aceite entra lateralmente proviniendo de los radiadores, luego estará ya refrigerado, por lo tanto no se está considerando la influencia de estos radiadores.

Los elementos que entran en juego serán los siguientes:

El aceite, la cuba, los devanados y el núcleo.

Respecto a las fuerzas que influyen en el movimiento del fluido refrigerante encontramos que hay de dos tipos: las que favorecen el movimiento y las que se oponen.

El movimiento del aceite mineral es debido a la diferencia de presiones que se da en el transformador, conocido como fuerzas volumétricas de flotabilidad, que son las que se producen debido a la pérdida de densidad del aceite por aumento de la temperatura de este, que sumado a la fuerza con la que introducimos el aceite en la cuba por su parte inferior, conforman las dos fuerzas que contribuyen al movimiento de este fluido.

Por otro lado, las fuerzas que se oponen al movimiento son las de viscosidad.

Capítulo 2: Objetivo

La finalidad de este estudio es simular el comportamiento fluido-térmico-magnético de un transformador monofásico refrigerado por aceite mineral y situado en el interior de una cuba.

De la simulación se obtendrán resultados numéricos y gráficos que se interpretarán.

Capítulo 3: Antecedentes

Este apartado tratará sobre estudios previos en los que está basado este, sus diferencias y similitudes, así como su posible influencia.

Como principal antecedente de nuestro estudio está el modelo E-core transformer el cual será explicado a continuación.

El modelo de referencia utiliza un núcleo compuesto por tres columnas unidas por dos yugos por donde circula la mayoría del flujo magnético. Dicho núcleo está construido con un material ferromagnético -hierro dulce- que posee una curva de magnetización B-H no lineal.

Este modelo muestra la distribución espacial de los campos magnético y eléctrico, así como la saturación magnética, la respuesta temporal, y el flujo de dispersión.

Descripción del modelo:

El núcleo del modelo consiste en 2 “E-cores”, llamados así por la forma que tienen, los cuales forman un circuito cerrado de flujo magnético, las bobinas, primaria y secundaria, están dispuestas de manera que quedan arrolladas alrededor de la columna central del núcleo, tal como se aprecia en la Figura 1:

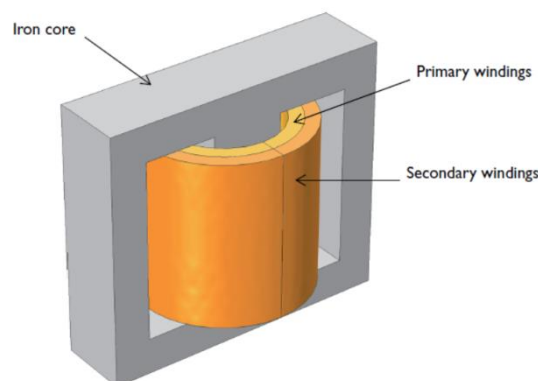


Figura 1. Esquema básico de transformador monofásico. Fuente:[1]

La curva B-H, la cual incluye los efectos de la saturación, es usada para emular el comportamiento magnético del núcleo de hierro dulce.

Por otro lado, se establece que los efectos de histéresis en el núcleo como despreciables, es decir, se prescinde de su consideración.

Las bobinas en este modelo están conformadas por varias vueltas resultando por lo tanto un arrollamiento múltiple, pero no se consideran las corrientes parasitas o de Foucault en cada una de las vueltas de la bobina. La frecuencia de la señal eléctrica son 50 Hz.

El circuito eléctrico equivalente del transformador es el que se muestra en la Figura 2. El primer devanado está conectado a una resistencia primaria la cual será denominada como " R_p " y una fuente de tensión alterna como " V_{ac} ", mientras que el arrollamiento secundario está conectado a la segunda carga resistiva, a la cual se la ha denominado como " R_s ".

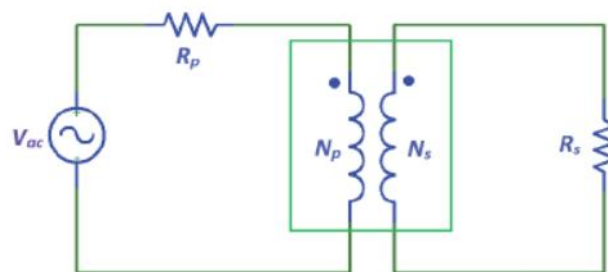


Figura 2: Circuito electromagnético de un transformador monofásico. Fuente [1]

Los resultados obtenidos en el estudio base se muestran gráficamente a continuación, de la Figura 3 a la Figura 10:

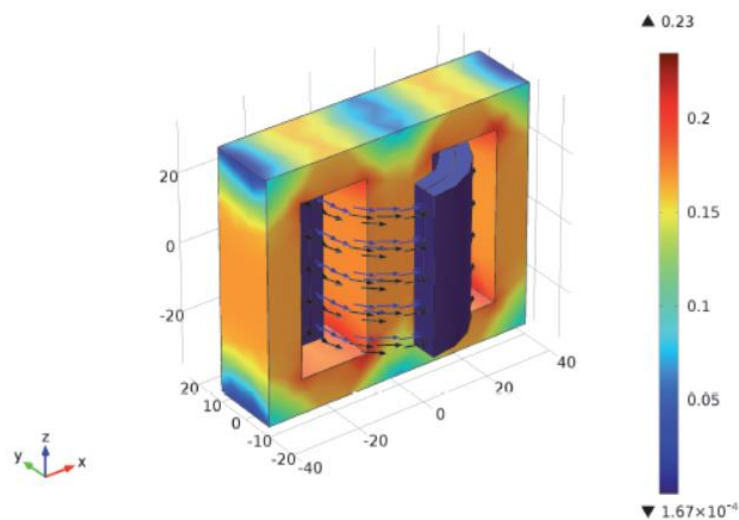


Figura 3: Densidad de flujo magnético en el núcleo del transformador así como la distribución de las corrientes en los bobinados para un tiempo $t=50$ ms. Fuente [1]

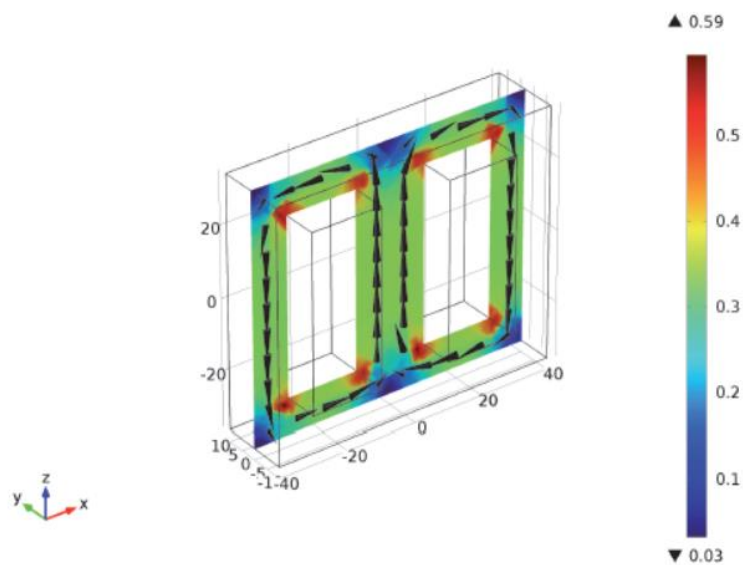


Figura 4: Densidad del flujo magnético en una lámina del núcleo para un tiempo de 50ms. Fuente [1]

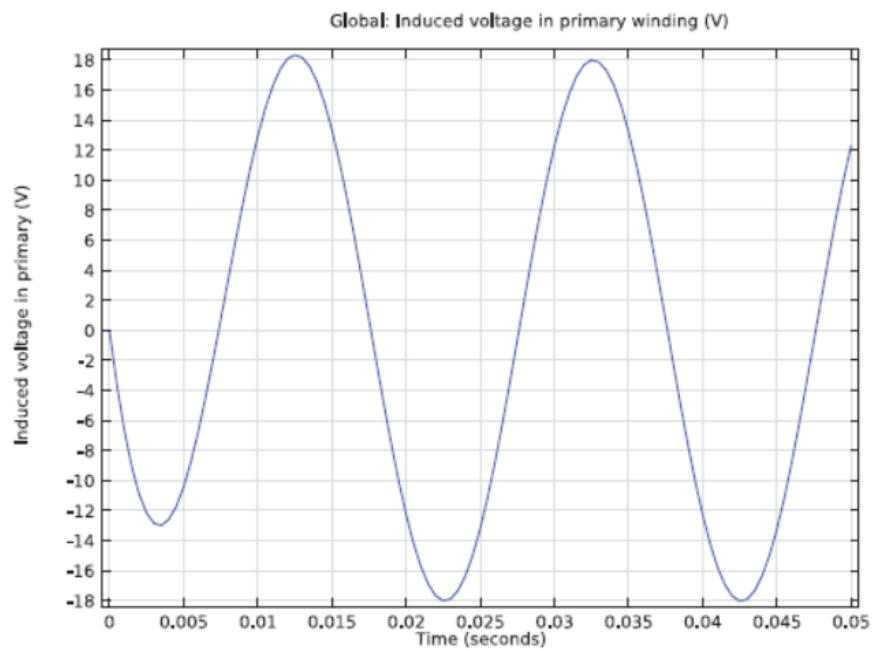


Figura 5: Tensión inducida en el devanado primario. Fuente [1]

En la figura 5 se muestra la evolución de la tensión inducida en el bobinado primario para un intervalo de tiempo de 5 centésimas de segundo. Como se puede apreciar, apenas supera los 18 voltios de tensión de pico.

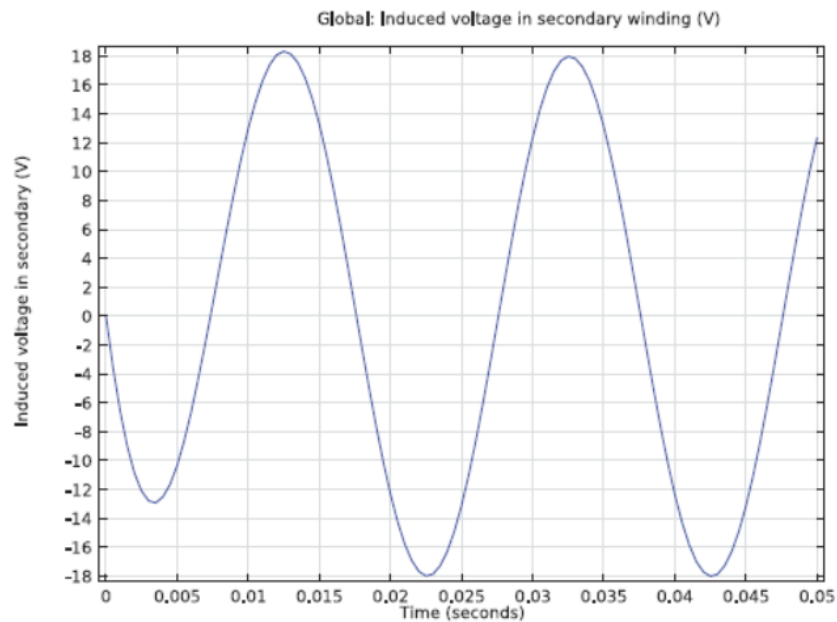


Figura 6: Tensión inducida en el secundario. Fuente [1]

La Figura 6 muestra lo mismo que la Figura 5 pero para el bobinado secundario.

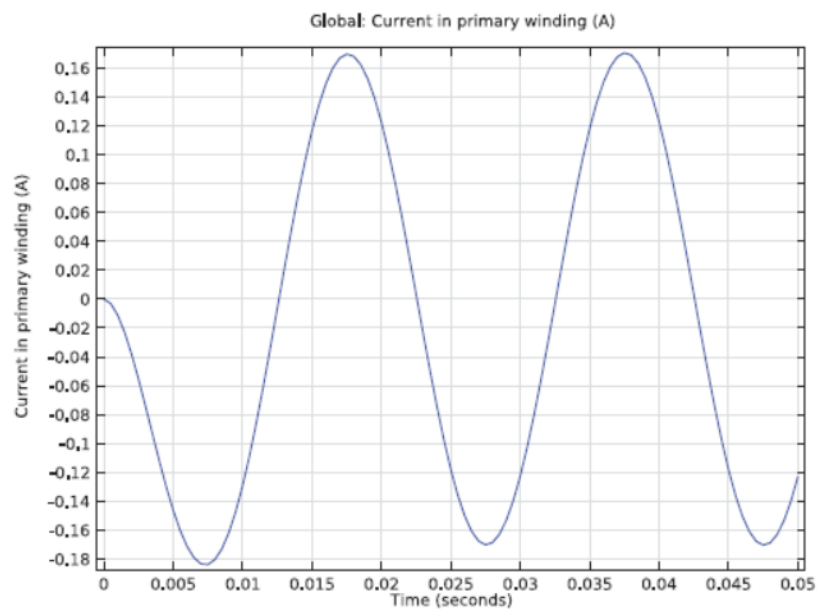


Figura 7: Intensidad en el devanado primario. Fuente [1]

En la Figura 7 se observa la corriente que circula por el primer bobinado, adquiere una amplitud constante a partir de la parte negativa de su primer período o ciclo, ya que durante su parte positiva la amplitud de la función adquiere un valor menor.

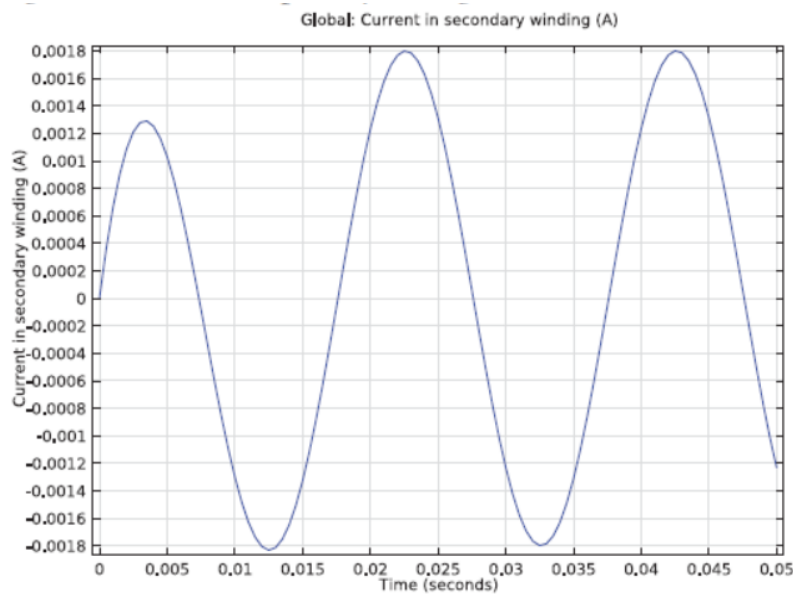


Figura 8: Intensidad en el devanado secundario. Fuente [1]

En la Figura 8 se muestra la corriente inducida que circula por el bobinado secundario. Se aprecia que es del orden de 100 veces más pequeña que la que circula por el bobinado primario.

Veamos ahora para el caso de un transformador reductor el comportamiento de la tensión inducida para el bobinado primario y secundario respectivamente:

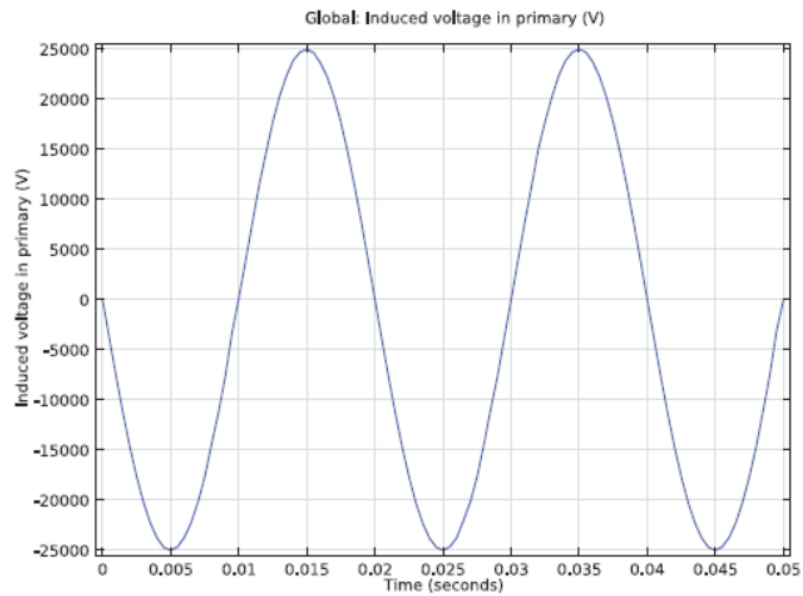


Figura 9: Voltajes inducidos en el bobinado primario de un transformador reductor.
Fuente [1]

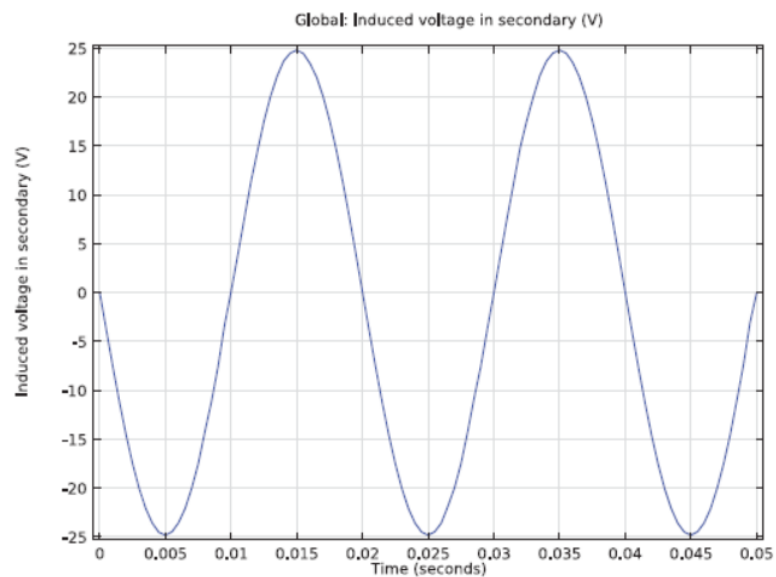


Figura 10: Voltajes inducidos en el bobinado secundario de un transformador reductor.
Fuente [1]

Capítulo 4: Estado del arte

4.1. Fundamentos teóricos

4.1.1. Apartado electromagnético

4.1.1.1. Materiales magnéticos

Tomando de base un material un material homogéneo e isótropo, se definen sus propiedades magnéticas en función de la susceptibilidad magnética, denotada como χ_m , que es un coeficiente que expresa la relación proporcional entre la magnetización “M” y la intensidad de campo magnético “H”.

Tenemos entonces que: $M = \chi_m \cdot H$

Sabiendo además que la inducción magnética “B” está relacionada con estos dos campos mediante la ecuación: $B = \mu_0(H + M)$

Tendremos combinando ambas ecuaciones que:

$$B = \mu_0(H + \chi_m \cdot H) = \mu_0(1 + \chi_m)H = \mu_0\mu_r H = \mu H$$

Donde se tiene entonces 3 permeabilidades magnéticas:

$\mu \rightarrow$ Permeabilidad magnética del medio, $\mu = \mu_0\mu_r$

$\mu_r \rightarrow$ Permeabilidad magnética relativa, $\mu_r = 1 + \chi_m$

$\mu_0 \rightarrow$ Permeabilidad magnética del vacío, tomada en unidades del SI como

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} * \text{N} * \text{A}^{-2}$$

De acuerdo con los valores de μ_r , los materiales se clasifican en 3 tipos:

- 1) Ferromagnéticos, cuyo valor de permeabilidad magnética relativa es muy superior a 1.
- 2) Paramagnéticos o no magnéticos, cuya permeabilidad relativa es aproximadamente 1.
- 3) Diamagnéticos, de permeabilidad magnética relativa inferior a 1.

La Figura 11 muestra las 3 permeabilidades en función del tipo de material y la del vacío.

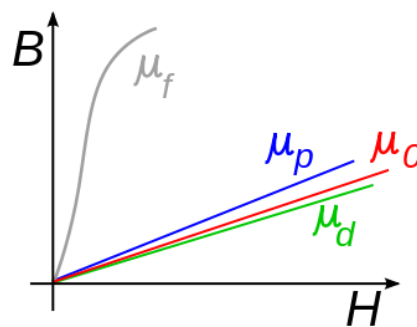


Figura 11: Comparación de permeabilidades. Fuente [2]

La base científica que explica el comportamiento magnético microscópico del material puede ser tomada del modelo atómico clásico de Bohr-Sommerfeld.

Acorde a este modelo, es supuesto que el átomo está compuesto por un núcleo central fijo que contiene protones y neutrones, alrededor del cual giran los electrones describiendo órbitas cerradas que pueden considerarse como circuitos eléctricos.

Cada uno de estos circuitos origina un momento magnético dipolar “m”, que es resultado del producto de la corriente por la superficie de la espira del circuito, que a su vez va asociado a un momento angular “L”, también entendido como momento de la cantidad de movimiento, siendo $L = m \cdot r^2 \cdot \omega$, resultando los parámetros como:

m = masa del electrón

r = radio de la órbita

ω = velocidad angular de giro

Se debe tener en cuenta que el electrón gira sobre sí mismo, esto se denomina “spin del electrón”, lo cual da lugar a un mayor momento angular y dipolar.

Esta interacción se denomina como “interacción spin orbital” que hace que el momento orbital de los electrones se enlace con su momento magnético o spin, formando así el momento magnético total del átomo.

Entonces la misma división hecha antes en lo que respecta a los tipos de materiales magnéticos, se puede hacer otra vez, esta vez explicada respecto al momento magnético:

Diamagnetismo:

En este tipo de materiales, el momento magnético neto resultante debido a los movimientos orbitales de los electrones y a sus spines es cero en ausencia de campo magnético externo.

Si se aplica un campo de inducción B, aparecerá una fuerza sobre los electrones que cumple la fórmula de Lorentz: $F_m = q(u \times B)$

Donde “q” es la carga del electrón y “u” su velocidad.

Esta fuerza provoca un cambio en la velocidad angular de los electrones, conocido como frecuencia de Larmor.

Como consecuencia del cambio de esta velocidad se modifica el valor de la corriente electrónica, lo cual da lugar a un momento magnético neto.

Paramagnetismo:

En estos materiales se tiene que los momentos magnéticos debido al movimiento de los electrones, es decir, el orbital y el spin, no se anulan el uno al otro al completo, resultando pues un momento magnético neto.

Si se aplica un campo magnético externo, este campo tiende a alinear los momentos magnéticos atómicos en su sentido, lo que provoca un aumento de la inducción.

Ferromagnetismo:

Este tipo de material es el más notable con respecto a aplicaciones tecnológicas.

Se trata de aquellos materiales que presentan imanaciones grandes aun estando en presencia de campos magnéticos débiles.

Esto es provocado por las fuerzas mecánico-cuánticas que tienden a alinear paralelamente entre sí a los spines atómicos próximos, aun existiendo ausencia de un campo magnético.

Pero esto no sucede en todo el volumen del material, existen zonas más concentradas conocidas como “dominios magnéticos”, cuyos volúmenes suelen oscilar entre 10^{-6} y 10^{-2} cm^3 , conteniendo del orden de entre 10^9 y 10^{15} átomos.

El resumen de la característica principal de este tipo de material, es que cuando se colocan dentro de un campo magnético, sus dominios magnéticos tienden a alinearse sumándose al campo externo y resultando en conjunto un campo total más fuerte.

4.1.2. Ecuaciones de Maxwell:

A continuación, se procede a realizar una descripción de las ecuaciones de Maxwell para entender mejor los fenómenos electromagnéticos que suceden en el transformador.

Ecuación de Gauss:

La ley de Gauss explica la relación existente entre el flujo del campo eléctrico y una superficie cerrada.

Se sabe que el flujo eléctrico es la cantidad de fluido eléctrico que pasa a través de una superficie determinada.

Al igual que sucede en mecánica de fluidos, este fluido eléctrico no transporta materia, pero ayuda a analizar la cantidad de campo eléctrico, denotado como “ $\vec{E}$ ”, que atraviesa una superficie determinada “ S ”.

Su expresión matemática resulta ser la siguiente:

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

Esta ley explica que el flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada es igual al cociente de la carga (denotada como “ q ”) o la suma de cargas que se encuentren en el interior de la superficie, y la permitividad eléctrica en el vacío, denotada como “ ϵ_0 ”:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Lo que expresa la forma diferencial de la ley de Gauss es que la divergencia del campo eléctrico es proporcional a la densidad de carga, esto es:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Donde “ ρ ” es la densidad de carga en el medio interior a la superficie cerrada.

Todo esto implica que el campo sale de una carga, es decir que diverge, por lo que se representa entonces como vectores que salen de la fuente que las genera en todas direcciones.

4.1.3. Ley de Gauss para el campo magnético:

En lo que respecta a los campos magnéticos, que difiere de los eléctricos, fue que estos no comienzan y terminan en cargas diferentes.

Lo que expresa esta ley es que las líneas de los campos magnéticos deben cerrarse sobre sí mismas.

Se acepta la no existencia de un monopolio magnético, sino que el campo magnético siempre tiene asociados dos polos magnéticos dado que sobre una superficie cerrada no es posible encerrar un sumidero de campo.

Cuando un dipolo magnético entra en una superficie cerrada, ni entra ni sale flujo magnético de ella, es decir, este no diverge puesto que no sale de la superficie.

Esto matemáticamente se expresa así:

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

Donde $\vec{B}$ es la inducción magnética o densidad de flujo magnético, y como se ha explicado con anterioridad, la divergencia es cero porque ni salen ni entran vectores de campo, este hace caminos cerrados.

Integralmente esto se expresa como:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Esta integral solo tiene validez sobre superficies cerradas.

4.1.4. Ley de Faraday-Lenz:

Esta ley habla sobre la inducción electromagnética, la resultante originada en un campo magnético por una fuerza electromotriz.

Primero de todo, si se tiene un campo magnético variable en el tiempo, una fuerza electromotriz “ $\mathcal{E}$ ” será inducida en cualquier circuito eléctrico.

La expresión matemática del campo eléctrico resulta entonces ser:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

Al ser el campo magnético dependiente de la posición, se tiene que el flujo magnético resulta ser:

$$\phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Por supuesto, si existe fuerza electromotriz implica que existe también un campo eléctrico, cuya expresión integral es:

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Combinando estas ecuaciones se tiene finalmente la ley de Faraday:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Lo que indica esta ley es que un campo magnético que varía o depende del tiempo implica la existencia de un campo eléctrico, cuya circulación por un camino cerrado es igual a la menos derivada temporal del flujo magnético en esa superficie limitada por el camino cerrado.

La explicación del signo negativo en la integral es que expresa que el sentido de la corriente inducida es tal que su flujo se opone a la causa que lo produce, compensando de esta manera la variación de flujo magnético.

Básicamente lo que expresa esta ley es que la tensión inducida es proporcional a la variación de flujo magnético y que se produce la inducción de una fuerza electromotriz en un conductor cuando este está expuesto a un campo magnético variable en el tiempo o bien cuando el conductor es un medio móvil respecto a un campo magnético estático no uniforme.

4.1.5. Ley de Ampère generalizada:

Esta ley está formulada para un campo magnético inmóvil y una corriente no variable en el tiempo.

Ampère expresa con esta ley que la circulación en un campo magnético “B” a lo largo de una curva cerrada C es igual a la densidad de corriente “J” sobre la superficie encerrada en la curva “C”, lo cual expresado matemáticamente es:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

Como se había explicado con anterioridad, μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío.

Sin embargo, cuando se consideran campos que si varían con el tiempo se llegan a cálculos erróneos, por ejemplo, se viola la conservación de la carga (no hay destrucción o creación de carga eléctrica).

Maxwell fue el que corrigió esta ecuación para adaptarla a los campos que no son estacionarios y con posterioridad fue comprobada por Heinrich Rudolf Hertz.

Maxwell reformuló esta ley de esta manera:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

En el caso de que el campo sea estacionario, correspondería esta ley a la de Ampère, Confirmando además que un campo eléctrico que varíe con el tiempo producirá un campo magnético y además será consecuente con el principio de conservación de la carga.

Su forma diferencial es la siguiente:

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

Esta ecuación expresa que si se tiene un conductor, por ejemplo un alambre recto de densidad de corriente “J”, esta entonces provocará la aparición de un campo

magnético “B” que rote alrededor del alambre y cuyo sentido corresponda a la regla de la mano derecha, o regla del sacacorchos.

Gráficamente resultaría como en la Figura 12:

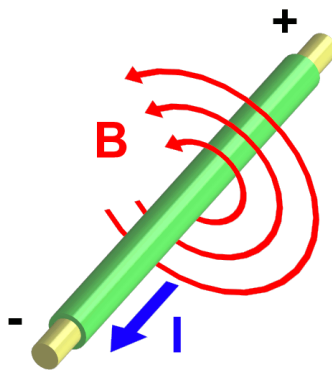


Figura 12: Regla del sacacorchos para campos magnéticos. Fuente [3]

4.1.6. Conceptos básicos sobre transformadores:

Definición:

El transformador puede ser definido como una máquina eléctrica y estática, la cual utiliza la corriente alterna en para su funcionamiento, constando de 2 bobinados arrollados a un armazón o núcleo, los cuales mediante el fenómeno de la inducción electromagnética permiten transformar la tensión y la intensidad de este circuito en otros valores de salida distintos manteniendo constante la potencia.

Gracias a estas máquinas se ha podido desarrollar a grandes niveles el uso de la energía eléctrica haciendo que sea posible práctica y económicamente el transporte de energía a grandes distancias.

Esto es debido a que el transporte de electricidad desde las zonas de producción hasta las zonas de consumo resulta más económico cuanto más alta es la tensión de las líneas, ya que esto hace que la corriente que circula por ellas sea menor con la consecuente disminución de las dimensiones de los conductores que la transportan.

Los aparatos que requieren energía eléctrica para su funcionamiento requieren tensiones bajas, de tal forma y como se ha explicado antes, los transformadores realizan una primera elevación de la tensión al principio de las líneas a valores del orden de 380-400kV, existiendo en los centros receptores otros transformadores que realizan entonces el proceso inverso, reduciendo así la tensión a valores que sirvan para el consumo y distribución de esta energía.

El rendimiento de este proceso suele tener valores de entorno al 99% pudiendo llegar en ciertos casos al 100% debido a que la máquina no dispone de brazos o demás extremidades móviles.

4.1.7. Aspectos constructivos:

El esquema básico de un transformador consta de dos conductores arrollados sobre un núcleo ferromagnético, contando a su vez con un sistema de refrigeración y unos aisladores pasantes de salida.

En este estudio, el transformador solo contará con los bobinados, el núcleo y el sistema de refrigeración para simplificar los cálculos y la emulación.

Núcleo:

Es el sistema que forma su circuito magnético, que en el caso del estudio, está constituido de hierro dulce.

Este circuito magnético está formado por las columnas o partes donde se encuentran los devanados, y las culatas, o zonas que unen las columnas.

Los espacios entre las columnas y las culatas se denominan ventanas, y dependiendo de cómo estén dispuestas clasificaremos a los transformadores en dos tipos:

1º) Acorazados: Están en su mayor parte abrazados por el núcleo magnético.

2º) De columnas: Son los devanados los que rodean casi por completo al núcleo magnético.

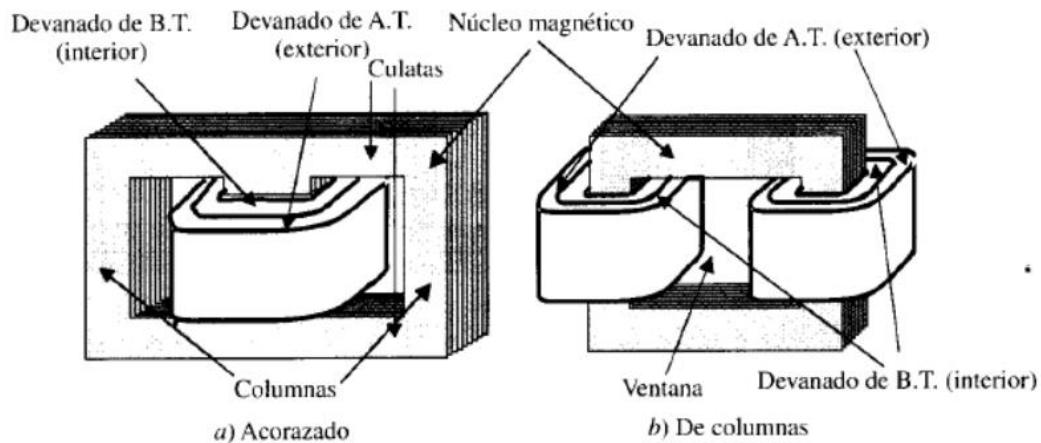


Figura 13: Tipos de transformadores según la disposición de las ventanas. Fuente [4]

En esta última imagen apreciamos mejor las diferencias de diseño existentes entre dos transformadores monofásicos, uno de columnas y otro acorazado.

Respecto a las diferencias entre ellos, el acorazado supone más firme en lo que respecta a las espiras pero el de columna resulta de construcción más sencilla y aguanta mejor las altas tensiones debido a que la superficie que ha de aislarse es más reducida.

En transformador del estudio es acorazado monofásico.

Es importante destacar que el flujo magnético que circula por un transformador acorazado no resulta la misma en sus tres columnas ya que en la columna central, es decir, en aquella en la que está el arrollamiento, circula el doble de flujo magnético que por las laterales ya que su superficie es el doble que la de las laterales.

En cambio, tanto en el transformador monofásico de columnas como en el transformador trifásico convencional, las secciones de las columnas serán idénticas.

A continuación, la Figura 14 muestra la disposición de las fases y devanados en un transformador trifásico convencional:

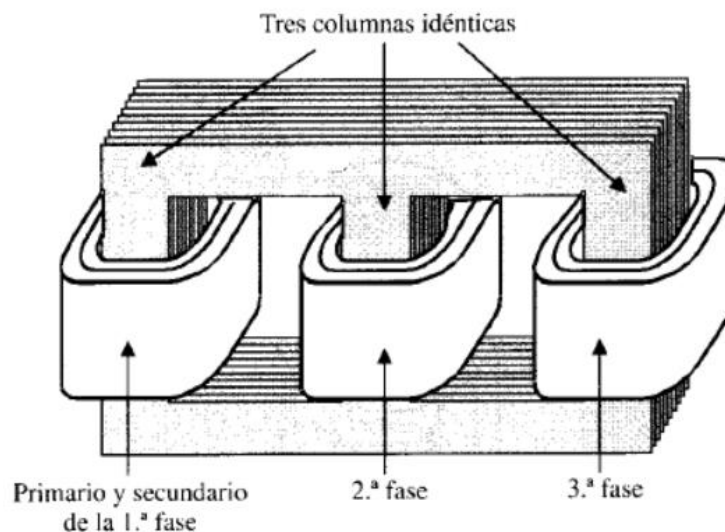


Figura 14: Fases en un transformador trifásico. Fuente [4]

Devanados:

Son el circuito eléctrico del transformador, se realizan mediante hilos o pletinas de cobre, las cuales serían de sección rectangular cuando son requeridas secciones mayores.

Los conductores están compuestos de una capa aislante, que en el caso de pequeños transformadores suele ser barniz, y que en el caso de pletinas está formada por una o varias capas de fibra de algodón o también puede ser cinta de papel.

Puede haber 2 disposiciones de los devanados en función de la posición que ocupe el devanado de alta tensión frente al de baja, distinguiendo entonces entre devanados concéntricos o alternados:

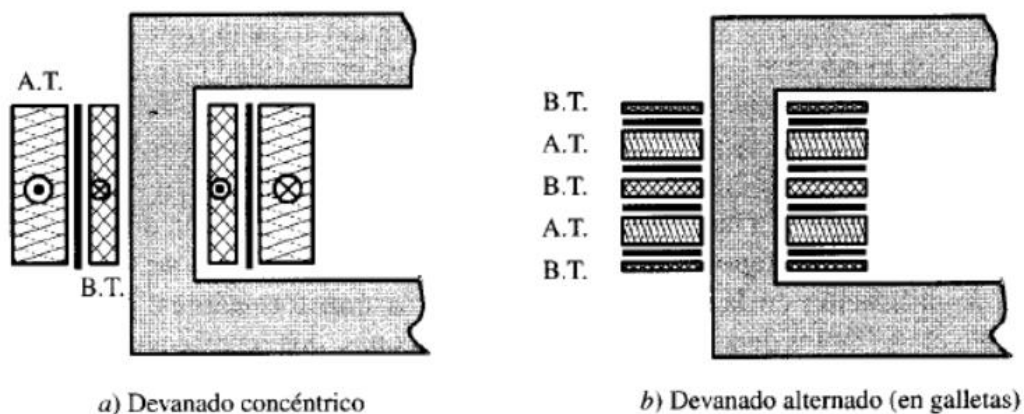


Figura 15. Tipos de transformadores según la posición de sus devanados. Fuente [4]

Como se puede apreciar en la figura, en el caso de los devanados concéntricos, su forma es la de un cilindro coaxial, siendo además frecuente que se encuentre en el interior el devanado de baja tensión, además se intercala entre ambos un cilindro aislante de cartón o papel baquelizado.

Los devanados alternados toman también el nombre de “devanados de galletas”

ya que los arrollamientos de alta y baja tensión están intercalados verticalmente a lo largo de la dirección de la columna como se puede apreciar en la figura anterior.

En el estudio, será utilizado como modelo un devanado concéntrico.

Sistema de refrigeración:

En un transformador existen como en toda máquina eléctrica, una serie de pérdidas que se transforman en calor y contribuyen al calentamiento de la máquina, es por lo tanto preciso, dotar al transformador de un sistema de refrigeración adecuado.

Para potencias pequeñas, la superficie externa del transformador es suficiente para la evacuación de calor necesaria, denominándose este tipo de máquinas “transformadores en seco”.

Por otro lado, para potencias elevadas, se emplea como medio refrigerante el aceite, resultando entonces los denominados “transformadores bañados en aceite”.

La misión del aceite es doble; refrigerante y aislante, ya que está dotado de una capacidad térmica y rigidez dieléctrica superior a la del aire.

En estos transformadores, la parte activa se introduce en una cuba de aceite mineral, cuya forma puede ser entre otras plana y ondulada, con tubos y radiadores, realizándose entonces la eliminación del calor por radiación y convección natural.

Para el transformador del modelo, la cuba simplemente se tratará de un hexaedro de dimensiones suficientes para contener al propio transformador.

La problemática que presentan los aceites es que ven mermadas sus cualidades refrigerantes y aislantes con el paso del tiempo, esto se debe a que al ser un producto de la destilación fraccionada del petróleo, que con el tiempo experimenta un proceso de envejecimiento, el cual es activado con la temperatura, la humedad y el contacto con el oxígeno del aire. Para atenuar este efecto se le suelen añadir al aceite productos químicos inhibidores y también se le puede dotar a la cuba de un depósito de expansión colocado en la parte alta del transformador, el cual sirve para que la cuba este completamente llena de aceite y para absorber las dilataciones del aceite al calentarse este.

Cuando el transformador se enfría el aire penetra por él, pero al llevar el aire humedad, esta es absorbida por el aceite, lo que se evita colocando a la entrada un desecador de cloruro cálcico o un gel de sílice.

El uso de las dos funciones del aceite mineral, es decir, como refrigerante y como aislante, hizo posible el desarrollo de los transformadores de gran potencia. Sin embargo, el aceite mineral presenta dos inconvenientes notables a saber:

1º) Es inflamable.

2º) Sus vapores pueden formar mezclas explosivas con el aire.

Esto nos lleva a ciertas restricciones en su uso.

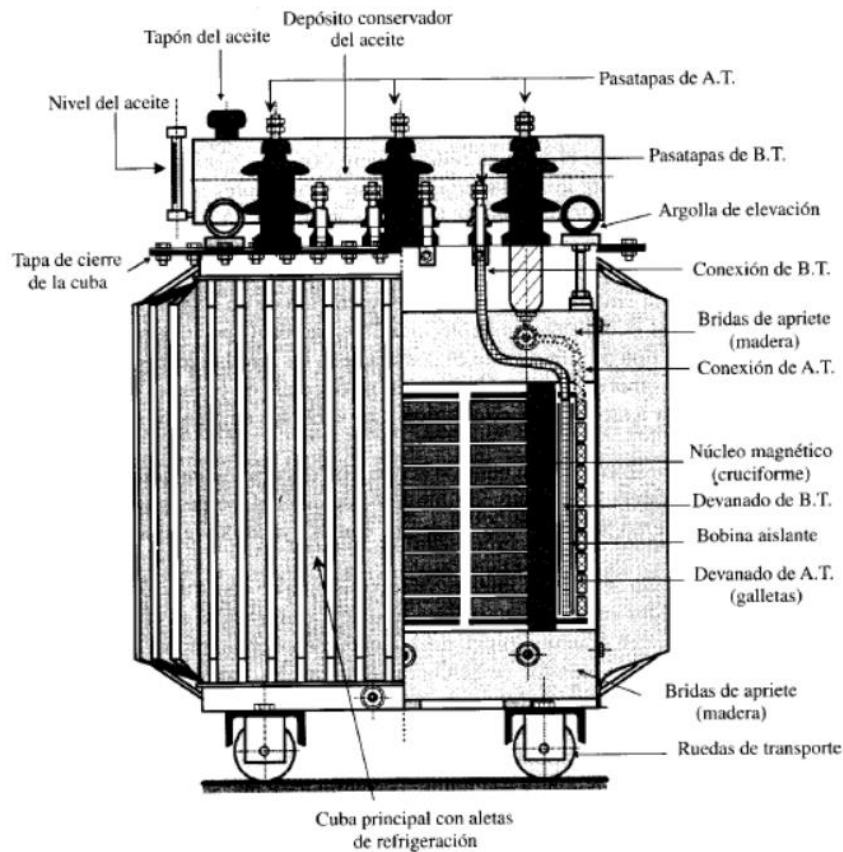


Figura 16: Vista genérica de un transformador trifásico. Fuente [4]

Los transformadores de más de 200kV están normalmente sumergidos en aceite dentro de la cuba principal, que suele ser de acero.

El aceite transmite calor a la cuba, desde donde se dispersa por radiación y convección al aire al exterior.

Conforme la potencia del transformador va aumentando, se le van añadiendo radiadores externos con el fin de aumentar la superficie de enfriamiento de la cuba, que como ya se ha explicado antes, está llena de aceite. El aceite circula alrededor de los devanados hacia los radiadores, donde se cede el calor hacia el aire exterior.

En caso de potencias todavía más elevadas, se insufla aire sobre los radiadores mediante ventiladores adecuados.

Cuando tenemos transformadores del orden de MVA se puede refrigerar mediante un intercambiador de calor aceite-agua.

El aceite caliente se bombea a lo largo de un serpentín el cual está en contacto con agua fría, lo malo de este sistema, pese a ser muy eficaz es muy costoso, ya que también debe enfriarse el agua para ponerla de nuevo en circulación.

Nomenclatura de los tipos de refrigeración:

Para la definición correcta de un transformador se indican una serie de valores.

Lo primero que se hace es proporcionar el valor de su capacidad nominal, luego se indican sus tensiones nominales y por último se facilitan una serie de letras que dan información sobre el tipo de refrigeración utilizado por el transformador.

La definición del sistema de refrigeración viene dada por la norma IEC 60076-2.

Esta norma indica que, para aquellos transformadores bañados en aceite, el método de refrigeración viene indicado por un código constituido por cuatro letras, el cual se muestra a continuación en las tablas de la 1 a la 4:

La 1ª letra muestra el medio refrigerante en contacto con los devanados:

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

Tabla 1: Tipo de refrigerante en contacto con los devanados. Fuente [5]

La 2ª letra indica el mecanismo de circulación del fluido refrigerante del interior.

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

Tabla 2: Tipo de circulación en un transformador. Fuente [5]

La 3ª letra muestra el tipo de refrigeración externo:

LETRA	SIGNIFICADO
A	Aire
W	Agua

Tabla 3. Tipo de refrigeración externo. Fuente [5]

La 4ª letra representa el tipo de circulación del medio refrigerante externo:

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

Tabla 4: Tipo de circulación del medio refrigerante externo. Fuente [5]

Aisladores pasantes y otros elementos:

Los bornes de los transformadores de media tensión se llevan al exterior mediante unos aisladores pasantes, conocidos como “pasatapas”, los cuales son de porcelana y pueden estar rellenos de aire o aceite.

Si se utilizan altas tensiones, aparece un fuerte campo eléctrico entre el conductor terminal y el borde del orificio en la parte superior de la cuba, y para evitar la perforación del aislador este se realiza con una serie de cilindros que rodean el borne metálico dentro del espacio cerrado que contiene el aceite.

La diferencia primordial que existe entre los pasatapas de alta y baja tensión es la altura, siendo más altos los de A.T. que los de B.T., es decir, siendo mayores cuanto mayor es la tensión.

Otro elemento notable en los transformadores de gran potencia es el relé de gas, mejor conocido por el nombre de relé Buchholz, cuya misión es proteger a la máquina contra fallos de aislamiento, y sobredescarga (ver Figura 17).

La colocación del relé es sobre el tubo que une la cuba principal con el depósito de expansión, y su funcionamiento es debido a movimiento del vapor del aceite que surge por un calentamiento anómalo del transformador que hace bascular un sistema conformado por dos flotadores.

El primero de estos flotadores, el cual es sensible a sobrecargas ligeras, al descender de la posición mostrada en la figura que se presenta a continuación, provoca la activación de una alarma acústica.

El segundo, el cual es sensible a las sobrecargas elevadas las cuales dan lugar a una formación agitada de gas en la cuba principal la cual al empujar al flotador provoca el cierre del circuito de unos relés que controlan el disparo de unos disyuntores de entrada y salida del transformador.

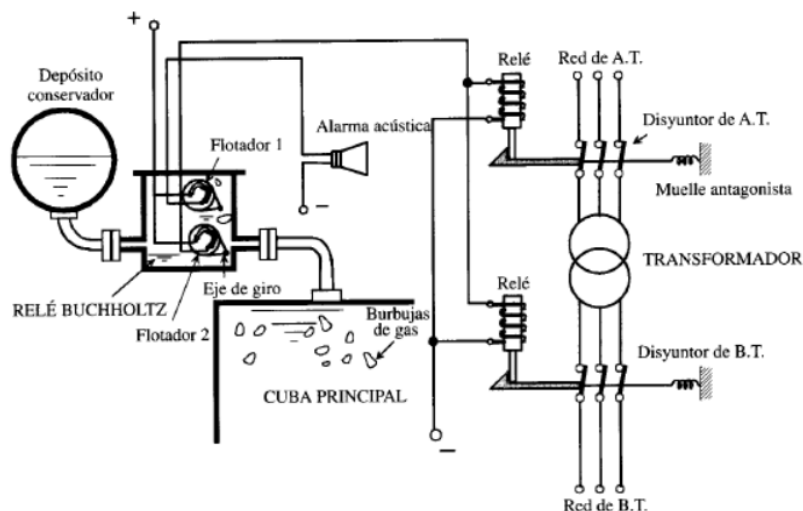


Figura 17: Esquema del relé Buchholtz en un transformador. Fuente [4]

La siguiente imagen muestra 3 proyecciones para una mejor comprensión del esquema básico de un transformador, donde se pueden ver los elementos mencionados antes.

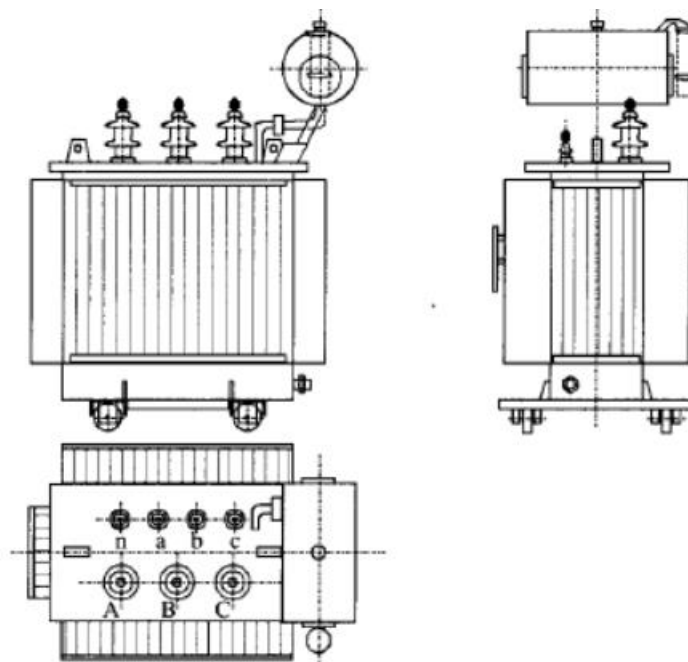


Figura 18: Vistas de un transformador trifásico. Fuente [4]

Si se observa el transformador en su vista de planta, podemos apreciar las zonas de entrada y salida de alta y baja tensión respectivamente (en el caso de que sea un transformador reductor).

Los bornes de alta tensión estarán representados por letras mayúsculas (A,B,C), mientras que la baja tensión por minúsculas (a,b,c), el neutro se señalará como “N” o “n” e irá colocado a la izquierda del terminal “A” o “a” respectivamente.

4.1.8. Historia de los fluidos refrigerantes:

Los primeros transformadores eran de pequeñas potencias y para la refrigeración bastaba el aire del ambiente. A medida que se fueron consiguiendo transformadores de mayores potencias hubo que buscar soluciones, la primera encontrada para una mayor refrigeración, que se vino usando desde comienzos del siglo XX, fue el uso de aceite mineral obtenido de la destilación del petróleo. Sin embargo, rápidamente se descubrían problemas en el uso de este líquido, su peligrosidad debido a un potencial peligro de explosión e ignición, ya que inicialmente no se tenía en cuenta la dificultad de eliminación que pudiese presentar.

En intento de mejorar las condiciones de seguridad en lo que respectaba al funcionamiento de los transformadores, a comienzos de la década de los 30 se desarrolló un aceite de origen sintético el cual conseguía las propiedades aislantes del aceite mineral mejorando además la seguridad contra incendios y explosiones en una avería del transformador.

Este aceite, nombrado como “Askarel”, se trata de un hidrocarburo aromático nitrado que ofrecía grandes ventajas frente a los aceites clásicos de los transformadores, los cuales eran hidrocarburos puros.

El nombre que han recibido en el mercado estos aceites sintéticos han sido tales como “pyranol”, “pyraleno”, “interteen”... pero no todo son ventajas, ya que la reducción y eliminación del pyraleno presenta grandes dificultades, dando lugar entonces a un impacto ecológico importante.

Entorno a la década de los 70, después de algunos accidentes que sucedieron con este líquido en Estados Unidos y Europa, comenzó entonces a considerarse su peligrosidad en lo que respectaba al contacto con personas y como ya se ha dicho antes, con el medio ambiente, resultando peligroso para la salud incluso para cortas exposiciones de baja concentración prohibiéndose su uso en los transformadores a partir de la década de los años ochenta.

Se mantuvo por otro lado el uso de aceites minerales mientras se investigaba con otros líquidos y fue entonces hacia 1980 cuando comenzó el uso de una nueva alternativa con aislantes secos como resina epoxi, encontrándose así los devanados del transformador completamente encapsulados en esta resina.

La ventaja que presenta este método de refrigeración es que es apropiado para condiciones que requieran de gran seguridad, ya que a diferencia de los otros aislantes anteriormente usados, este es sólido, por lo tanto en caso de avería no producía derrames, teniendo además unas propiedades óptimas contra el fuego ya que al ser autoextinguible no podía propagarlo, consiguiendo también un muy buen aislamiento frente a la humedad y la suciedad.

No obstante, las contrapartidas principales de este aislante son su construcción, y adquisición, ambas suponen un coste elevado.

Al mismo tiempo y paralelamente, se ha estado ensayando para ciertas aplicaciones, con otros líquidos tales como ésteres sintéticos y naturales, los cuales fueron usados a partir de los años 70 y 90 respectivamente, o aceites de silicona, los cuales fueron empezados a ser usados a partir de la prohibición del uso del “Askarel”.

Lo que ha favorecido entre otras cosas las investigaciones a día de hoy sobre estos últimos líquidos mencionados, han sido entre otras cosas el crecimiento del interés en aspectos medioambientales y la seguridad, buscando la limitación de los costes económicos.

Es por eso que se está evaluando la posible sustitución del aceite mineral por uno de estos a día de hoy.

4.1.9. Principales propiedades de los líquidos dieléctricos:

Para poder simplificar este apartado, se dividirá en dos grandes grupos de propiedades de estos fluidos, por un lado el de las físico-químicas y por otro el de las eléctricas.

4.1.9.1. Propiedades físico-químicas:

Serán desarrolladas a continuación las más destacables:

Composición química:

El aceite mineral es una mezcla de hidrocarburos procedente de la destilación del petróleo.

Por ello, tanto el aceite de silicona como los ésteres sintéticos son productos químicos.

El aceite de silicona es una mezcla de polímeros inorgánicos y orgánicos, por otro lado, los ésteres sintéticos son obtenidos por la unión química de un alcohol con un ácido graso.

Los aceites naturales son obtenidos por refinado de diversos aceites, entre ellos la soja, colza o el aceite de girasol.

Impacto y seguridad medioambiental:

Dos factores importantes a tener en cuenta a la hora de evaluar un líquido como aislante son la toxicidad y la biodegradabilidad, especialmente en áreas que sean catalogadas como sensibles medioambientalmente, donde un accidente pudiese

ocasionar daños significativos en las personas así como elevados costes medioambientales.

Por norma general, los líquidos con una biodegradabilidad elevada y baja toxicidad son considerados en lo que respecta al medio ambiente como respetuosos.

Debido a estas propiedades que poseen, los ésteres naturales y los sintéticos están catalogados como de fácil biodegradabilidad y no dañinos, siendo por otro lado catalogados los minerales y los de silicona muy resistentes a la biodegradación y más nocivos para el medio ambiente.

Viscosidad:

Es una variable a tener muy en cuenta a la hora de determinar la capacidad de un líquido como refrigerante.

Valores bajos de viscosidad facilitan la impregnación de aislantes sólidos por parte del líquido dieléctrico expulsando de esa manera el aire contenido en ellos y mejorando por lo tanto su comportamiento dieléctrico así como su vida útil.

El fluido que presenta menor valor para este parámetro es el aceite mineral, si no se tiene en cuenta el aceite de silicona.

La mayor o menor viscosidad de los líquidos alternativos produce en primera instancia una disminución de la capacidad de refrigeración, lo cual lleva a un aumento de la temperatura de funcionamiento del transformador que a su vez dificulta la impregnación de los aislantes sólidos, tanto en su proceso de fabricación como en su instalación y puesta en marcha.

Oxidación:

La presencia de oxidación puede provocar la modificación de las propiedades iniciales del líquido en base a las que se querían para el diseño inicial, ya que aparecerán subproductos de la oxidación que deteriorarán las propiedades dieléctricas, originando además posiblemente cierta corrosión en la cuba, aumentando la viscosidad...propiciando todo ello el deterioro del funcionamiento del transformador.

Ciertos estudios indican que el aceite de silicona es químicamente inerte y que tiene buena resistencia a la oxidación, produciéndose por lo tanto este proceso muy lentamente y a temperaturas no inferiores a 175 °C sin que se generen ácidos o lodos peligrosos.

Contrariamente, en el caso de los ésteres sintéticos el proceso se produce con temperaturas que sean superiores a los 125 °C, generándose además ácidos orgánicos.

Respecto al aceite mineral, este se empieza a oxidar y volatilizar con temperaturas superiores a los 105°C, produciéndose gran cantidad de subproductos que resultan de la degradación, entre ellos ácidos orgánicos y lodos, también produciéndose la separación del azufre que está inicialmente en su composición, el cual es propenso a favorecer la corrosión.

En último lugar, mencionar que los ésteres naturales son los más susceptibles a la oxidación, dependiendo no obstante de su composición química en ese preciso momento.

A pesar de lo dicho antes, es decir, independientemente de la composición del éster natural, su oxidación produce por norma general, geles y otros subproductos como alcoholes, ácidos o lodos entre otros, los cuales aumentan su viscosidad.

Seguridad contra incendios:

Es un factor realmente importante, especialmente en aquellas aplicaciones sensibles, donde la generación y propagación de un incendio pueda llegar a poner no solo la propia instalación, sino incluso vidas humanas.

El aceite mineral posee un punto de inflamación e ignición mucho más bajo con respecto a los de los líquidos alternativos.

Tales líquidos reciben una clasificación “clase K” en la normativa de mercancías peligrosas dado que son muy seguros contra incendios, además de por su baja susceptibilidad al fuego en caso de que se dé un fallo eléctrico.

Además, el humo producido en caso de ignición no es tóxico y de baja densidad.

Las ventajas que poseen los líquidos alternativos hacen que además sus instalaciones tengan menos exigencias de diseño, con la legislación y las compañías aseguradoras, siendo por lo tanto sus costes de mantenimiento e instalación de los equipos de seguridad notablemente menores.

Miscibilidad:

Es una propiedad importante a la hora de proceder a una sustitución de uno de ellos:

El procedimiento de lavado del transformador será sustancialmente más eficaz si el líquido sustitutivo es miscible en aceite usado.

Se tiene que por ejemplo a temperatura ambiente, tanto los ésteres como el aceite de silicona son miscibles con el aceite mineral, pero los ésteres con los aceites de silicona no lo son.

De hecho, pequeñas cantidades de aceite de silicona pueden dar lugar a la formación de espuma.

También se produce este efecto entre el aceite de silicona y el mineral, pese a que son miscibles entre ellos.

A continuación se presenta la Tabla 5 que resume esta información:

Aceite mineral			Aceite de silicona		Éster sintético
Aceite de silicona	Éster sintético	Éster natural	Ester sintético	Ester natural	Ester natural

Miscible	No miscible
----------	-------------

Tabla 5: Tipos de fluidos refrigerantes y sus miscibilidades. Fuente [5]

Absorción de humedad:

Es importante que el líquido se mantenga estable frente a la presencia de humedad, por un lado, los ésteres sintéticos y naturales, por su mayor grado de polaridad, son capaces de disolver mayor cantidad de H₂O que la silicona y los aceites minerales.

A temperatura ambiente (para mayor exactitud a 25°C), los aceites minerales son capaces de realizar una absorción que es del orden de 20 o incluso 30 veces mayor que las siliconas antes de llegar a la saturación.

	Estudio de la modelización del comportamiento magneto fluido térmico de un transformador monofásico	
---	--	---

Los efectos positivos que esto produce, son entre otros la mayor duración de la vida útil del aislamiento sólido y el mantenimiento de las tensiones de ruptura, cuyo valor se ve inalterado ante la presencia de H₂O al haber sido disuelta en el líquido alternativo.

A continuación se presenta la Tabla 6 que resume las propiedades de los refrigerantes mencionados con anterioridad:

Nombre	Aceite mineral	Aceite de silicona	Éster sintético	Éster natural
Tipo	Destilado del petróleo	sintético	Sintético	Aceite vegetal refinado
Componentes principales	Mezcla compleja de hidrocarburos	Siloxanos o polisiloxanos polimerizados	Un poliol con ácidos carboxílicos naturales o sintéticos enlazados	Cadena central de glicerol con 3 ácidos grasos naturales enlazados
Fuente	Petróleo	Producto químico	Producto químico	Extraído de cultivos
Biodegradabilidad	Muy baja	Muy baja	Muy alta	Muy alta
Estabilidad frente a la oxidación	Aceite de silicona (Exc.)>éster sintético (Exc.)>aceite mineral (Buena)>éster natural (susceptible)			
T ^{ra} de inflamación °C	160-170	>300	>250	>300
T ^{ra} de ignición °C	170-180	>350	>300	>350
Clasificación frente al fuego (IEC 61100)	O	K3	K3	K2
Saturación de agua a T _{ambiente} (ppm)	55	220	2600	1100

Viscosidad	Mineral < silicona baja viscosidad < éster sintético < silicona < éster natural
------------	---

Tabla 6: Principales propiedades de los líquidos refrigerantes. Fuente [5]

4.1.10. Fluidos refrigerantes alternativos en la actualidad:

Como se ha explicado con anterioridad, debido a las ventajas que presentan los fluidos alternativos (medioambientales, contra incendios...) este grupo, el cual entendemos que está formado por los ésteres naturales, los sintéticos y los aceites de silicona, van a desempeñar cada vez un papel más importante en los transformadores y por la tanto, en la distribución de la energía eléctrica.

Las pruebas realizadas en los laboratorios en los últimos años, donde ya se han estado utilizando tales aceites, ha demostrado que su uso en los transformadores resulta viable.

De esta manera, cada vez se están utilizando con más frecuencia en transformadores de alta tensión y de elevadas potencias.

Esto ha dado lugar a una expansión en el ámbito de estos fluidos, sobretodo en el que respecta al de la investigación.

En lo referente a los ésteres naturales, con los cuales se consideró trabajar como fluido dieléctrico desde la invención de los transformadores bañados en aceite sobre aproximadamente finales de 1880, ciertas incompatibilidades que presentaba con los equipos de respiración libre debido a su inestabilidad química hizo que fueran remplazados gradualmente por los aceites minerales.

Desde finales de los 90, está surgiendo el interés comercial por tal fluido, debido a que es considerado como más “ecológico”.

El uso principal que se le da es en transformadores de distribución, aunque diversos estudios realizados en laboratorios, así como distintas pruebas prácticas de sustitución del aceite mineral en transformadores operativos hasta 200MVA y 242 kV, demostraron la viabilidad de su uso en los transformadores de potencia.

En lo relativo a los ésteres sintéticos, son utilizados con éxito durante estos últimos 40 años, creciendo en aceptación y popularidad.

Su uso principalmente está en la distribución, así como en transformadores donde se consideran de gran importancia la protección medioambiental y la seguridad contra incendios.

Su uso cada vez se acepta más en sustitución del aceite mineral, en aquellos transformadores ya operativos.

En cuanto al aceite de silicona, se utiliza desde los 70 en sustitución de aceites con PCBs.

Al igual que los ésteres sintéticos, como es un fluido altamente estable y resistente al fuego, se usa por lo tanto en aplicaciones en las que la seguridad contra incendios es un requisito imprescindible.

Debido a estas características que posee, se utiliza también en transformadores de tracción, aquellos empleados en redes ferroviarias, dado que ambos suelen operar con temperaturas elevadas y también empleado en el transformador de distribución, entendiéndose por transformador de distribución como aquel con una potencia máxima asignada de 2500 KVA trifásica o 833 KVA monofásica.

Sin embargo, hasta día de hoy no existen transformadores de potencia con este líquido dieléctrico, salvo en Japón, donde recientemente han desarrollado un transformador 66kV/30MVA con aceite de silicona de baja viscosidad.

La siguiente tabla muestra el grado de implantación de los diferentes líquidos en función de sus aplicaciones, observándose en esta que el aceite mineral es el predominante y que los líquidos alternativos todavía no son utilizados en aplicaciones de instrumentación, es decir, transformadores de pequeña potencia.

La norma IEC 60076-1 considera como transformador de potencia a aquel que supera los 2.5 MVA, siendo de distribución aquellos con menor potencia.

Aceite mineral	Distribución	Tracción	Instrumentación	Potencia
Aceite de silicona	Distribución	Tracción	Instrumentación	Potencia
Éster sintético	Distribución	Tracción	Instrumentación	Potencia
Éster natural	Distribución	Tracción	Instrumentación	Potencia

Muy usado	Uso menos común	No usado actualmente
-----------	-----------------	----------------------

Tabla 7: Uso de los líquidos refrigerantes en los distintos tipos de transformadores según potencia. Fuente [5]

Se entiende como transformador de potencia aquellos cuya potencia sea superior a 1 MW y como transformadores de media potencia a aquellos con una potencia máxima asignada de 100 MVA en trifásica o bien 33,33 MVA en monofásica.

4.1.11. Principio de funcionamiento de un transformador ideal:

A continuación se procederá a explicar el principio de funcionamiento de un transformador en condiciones ideales, expresando conforme avance la explicación, las consideraciones que se realizan en este supuesto.

Consideraciones realizadas en el transformador ideal:

1º) Los devanados primario y secundario tienen resistencias óhmicas despreciables, lo que quiere decir que no hay pérdidas por efecto Joule, y no existen caídas de tensiones resistivas en la máquina.

En el caso de que fuera un transformador real, estas resistencias serían muy pequeñas pero no nulas.

2º) Se considera que no existen flujos de dispersión, lo cual implica que todo el flujo magnético está confinado al núcleo, y enlaza los dos devanados (primario y secundario).

En el caso del transformador real, existen pequeñas partes del flujo que solamente atraviesan a cada uno de los arrollamientos, llamados “flujos de dispersión” que se cierran o completan su circuito a través del aire.

Se parte de un transformador monofásico constituido por un núcleo magnético de permeabilidad finita, el cual presenta unas pérdidas en el hierro “ P_{fe} ”, y unos arrollamientos primarios y secundarios denotados como “ N_1 ” y “ N_2 ” respectivamente.

Se supone para este ejemplo que la máquina va a trabajar como reductor, ya que el transformador se estará alimentado por el devanado de tensión más elevada.

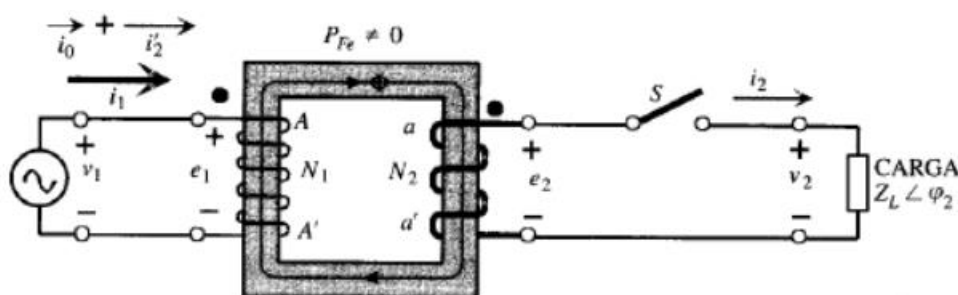


Figura 19: Esquema y funcionamiento de un transformador ideal. Fuente [4]

El papel que jugarán los devanados será de receptor para el primario, por lo que absorberá una corriente y una potencia y generará una fuerza contraelectromotriz, mientras que el secundario se comportará como un generador respecto a la carga que se conecte en sus bornes, suministrando por lo tanto corriente y potencia e induciéndose en él una fuerza electromotriz.

Se sabe entonces que aplicando una tensión alterna V_1 al primario circulará por él una corriente alterna, la cual a su vez producirá un flujo alterno en el núcleo cuyo sentido vendrá determinado por la ley de Ampère aplicada a este arrollamiento.

En la figura anterior se pueden observar los sentidos de las corrientes y el flujo debido a la polaridad que tiene la tensión aplicada.

El hecho de que el flujo sea variable producirá fuerzas electromotrices inducidas en los arrollamientos, las cuales cumpliendo la ley de Faraday explicada con anterioridad presentarán la siguiente ecuación:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad ; \quad e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Las polaridades de estas f.e.m.s. se pueden apreciar también en la figura anterior, donde se aprecia que su sentido es el que dicta la ley de Lenz, es decir, de oposición al cambio del flujo.

Lo más correcto sería denotar que en realidad “ e_1 ” se comporta realmente como una fuerza contraelectromotriz ya que se opone a la tensión aplicada V_1 y limita la corriente del arrollamiento primario.

La explicación de la polaridad de “ e_2 ” según la figura anterior reside en que al cerrar el interruptor “S” del secundario se tendería a producir una corriente “ i_2 ” cuyo sentido es el mostrado en la figura, de tal modo que al circular por el devanado secundario se opondría al flujo primario cumpliendo la ley de Lenz (de hecho, ese es el motivo de que no se incluya el signo negativo en la anterior ecuación, porque ya se ha tenido en cuenta su sentido en la figura).

Lo que se tiene en definitiva, es que la fuerza magnetomotriz del secundario produce un efecto desmagnetizante sobre la del primario.

Por otro lado, en la figura también se pueden observar que se ha indicado que se trata de un transformador reductor ya que el convenio indica que las mayúsculas (A, A') corresponden a A.T. mientras que las letras minúsculas (a,a') el lado de B.T. , siendo a su vez los extremos positivos los que carecen de apóstrofe (A,a) y los negativos los que lo tienen (A',a'), todo ello requerido para conocer la polaridad y condición de los devanados.

La relación que guardan los voltajes de alimentación y el de bornes de la carga del circuito secundario, es decir, V_1 y V_2 , el número de espiras de ambos devanados, N_1 y N_2 y las fuerzas electromotrices en bornes del primer arrollamiento e inducida en el segundo o e_1 y e_2 cumplen la propiedad de tener el mismo valor, el cual es conocido como “relación de transformación”.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m$$

4.2. Apartado de mecánica de fluidos:

En este apartado se desarrollarán los conceptos físicos para una mejor comprensión de la movilidad del líquido refrigerante en el interior del transformador, los cuales versaran sobre las ecuaciones de Navier-Stokes y sobre la ecuación de continuidad, la cual se puede incluir también dentro de las ecuaciones de este autor.

4.2.1. Conceptos previos:

Viscosidad:

Se entiende por viscosidad de un fluido la medida a su resistencia a las deformaciones, bien sean ocasionadas por tensiones cortantes o de tracción, surgiendo esta propiedad de las colisiones entre las partículas del fluido que se mueven a diferentes velocidades, provocando de esta manera su resistencia al movimiento, siendo por lo tanto una propiedad de los fluidos que solo se presenta en ellos cuando estos se encuentran en movimiento.

Un ejemplo de este fenómeno es cuando el fluido se ve sometido a moverse a través de un tubo, moviéndose las partículas cercanas a las paredes más lentamente que las que se encuentran cerca del eje longitudinal del tubo.

Se tendrá como fluido ideal aquel que no tenga viscosidad.

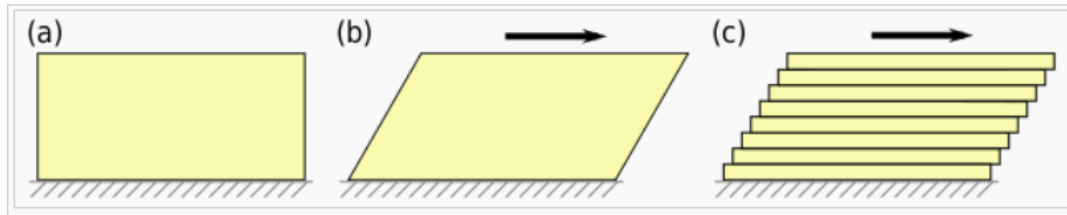


Figura 20: Deformación de un sólido por aplicación de fuerza tangencial. Fuente [13]

Aquí se puede apreciar el efecto de la viscosidad al existir rozamiento entre las “capas” de un fluido.

Sabiendo que además la viscosidad queda definida como la relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad, se tendrán 2 tipos de viscosidades:

1º) Viscosidad absoluta o dinámica:

Es la definida anteriormente, es decir, la relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Representada por “ μ ”.

2º) Viscosidad cinemática:

Aquella que resulta de dividir la dinámica entre la densidad del fluido.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Parámetros para la caracterización de un fluido:

Los siguientes parámetros mostrados determinan el régimen de flujo de un fluido, es decir, si este se encuentra en flujo laminar o turbulento, y también la eficacia de la transferencia de calor.

Número de Reynolds:

Este parámetro relaciona la viscosidad, velocidad, densidad y dimensión característica de un flujo en una expresión adimensional.

Se establece por tanto mediante este parámetro una comparación entre las fuerzas inerciales y las de viscosidad del flujo del fluido.

Sirve para determinar entonces el tipo de flujo que tendrá el fluido, que podrá ser laminar o turbulento.

Si el sistema estudiado es abierto, se tiene que el flujo comienza a ser laminar a partir de que se tenga un número de Reynolds inferior a 3×10^5 .

Si por el contrario, el fluido estudiado circula por el interior de conductos, el flujo se considerará laminar si el parámetro es inferior a 2100 y turbulento si es superior a 4000, se tendrá entonces una zona de transición entre esos dos valores.

Vendrá determinado por la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

Donde “D” es el diámetro de la tubería por la que circula el fluido y “v_s” su velocidad característica.

También puede ser visto como la relación entre las fuerzas inerciales y las de viscosidad predominando la importancia de las de viscosidad en el régimen laminar y las inerciales en el turbulento.

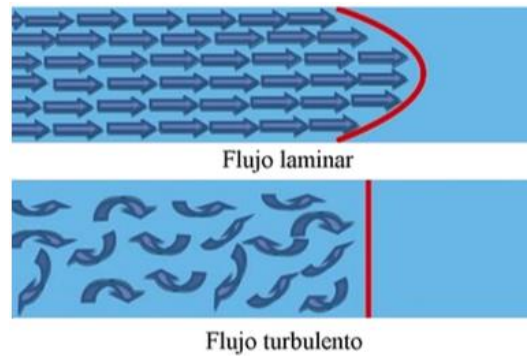


Figura 20: Deformación de un sólido por aplicación de fuerza tangencial. Fuente [14]

Número de Prandtl:

Se trata de otro parámetro adimensional que resulta de la relación de la viscosidad y la difusividad térmica.

La difusividad térmica se representa por la expresión:

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho c_p}$$

Donde en el numerador tenemos la conductividad térmica (κ) y en el denominador la densidad del medio y el calor específico del mismo (c_p).

La difusividad térmica es una medida de la velocidad a la cual la temperatura cambia en el interior de una sustancia, en otras palabras, mide la tasa de cambio del aumento de temperatura de un material al ser puesto en contacto con una fuente de calor.

Con lo que este parámetro adquiere la siguiente expresión:

$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular del momento}}{\text{Difusividad térmica}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k}$$

En este caso “Cp” es la capacidad calorífica y no el calor específico, siendo la primera una magnitud que depende de la cantidad de sustancia (magnitud extensiva) y la segunda independiente de la cantidad de masa del material en cuestión (magnitud intensiva).

Un ejemplo claro de lo que expresa este parámetro sería comparar dos fluidos; el mercurio y el aceite de motor.

En el primero, la transferencia de calor por conducción es muy efectiva respecto de su transferencia de calor por convección lo que hace que su número de Prandtl sea bajo, mientras que en el aceite de motor pasa al revés, su transferencia de calor por convección es mucho más efectiva que su transferencia de calor por conducción, lo cual da lugar a un número de Prandtl elevado.

En los fluidos, este parámetro puede ir desde valores por debajo de 0,01 para los metales líquidos hasta valores superiores a 1×10^5 para el caso de aceites pesados.

Número de Grashof:

Es otro parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de flotabilidad y las de viscosidad en un fluido.

Se usa en forma de producto con el número de Prandtl para dar lugar al número de Rayleigh, otro parámetro adimensional empleado en cálculos de transferencia de calor por convección natural.

La ecuación del número de Grashof es la siguiente:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

La utilidad de este parámetro, es que se emplea con el número de Reynolds mediante la relación Gr/Re^2 para determinar el tipo de convección que tendrá lugar, siendo convección forzada si el cociente es mucho menor que la unidad y siendo convección natural si este supera ampliamente la unidad.

4.2.2. Hipótesis:

En la mecánica de fluidos se asume que estos cumplen las siguientes leyes:

- 1º) Conservación de la masa y de la cantidad de movimiento.
- 2º) Primera y segunda ley de la termodinámica.

Hipótesis del medio continuo:

Con esta hipótesis, se presupone que el fluido es continuo a lo largo de todo su volumen, ignorando por lo tanto su estructura molecular y sus discontinuidades, con lo que las propiedades del fluido se podrán considerar como funciones continuas.

Concepto de partícula fluida:

Se entiende como partícula fluida la masa elemental de fluido que en un instante determinado se encuentra en un punto concreto del espacio.

El tamaño de dicha masa debe ser lo suficientemente pequeña para considerar que en su interior no hay variaciones de las propiedades macroscópicas del fluido y lo suficientemente grande para garantizar que esta contenga un gran número de moléculas, lo cual resulta en que a cada partícula se le puede asignar un valor de estas propiedades.

También es importante remarcar que la partícula fluida se mueve a la velocidad macroscópica del fluido, lo que implica que siempre va a estar formada por las mismas moléculas.

Un punto del espacio en diferentes instantes estará ocupado por lo tanto por distintas partículas fluidas.

Movimiento euleriano y lagrangiano de un fluido:

La descripción lagrangiana del movimiento de un fluido implica seguir a cada partícula en su movimiento, para ello se buscarán funciones que proporcionen datos sobre la posición y propiedades de la partícula en cada instante.

En cambio, en la descripción euleriana, se asignan a cada punto del espacio y en cada instante un valor para las magnitudes fluidas, por lo tanto en esta suposición el valor de las propiedades en un punto e instante determinado es el de la partícula fluida que ocupa dicha ubicación (punto) en ese instante.

La descripción euleriana será la empleada con mayor frecuencia, ya que en la mayoría de aplicaciones y casos resulta más útil.

4.2.3. Ecuaciones de Navier – Stokes:

Se trata de un conjunto de ecuaciones derivadas parciales no lineales las cuales describen el movimiento de un fluido.

Sirven para describir cualquier fenómeno en el que se involucre un fluido newtoniano, a saber, aquellos cuya viscosidad se puede considerar como constante en el tiempo.

Tales ecuaciones son obtenidas mediante la aplicación de los principios de la mecánica y la termodinámica a un determinado volumen de fluido, con lo que se obtiene la formulación integral de las ecuaciones, realizando para ello ciertos supuestos o consideraciones, como por ejemplo que los esfuerzos tangenciales guardan una relación lineal con el gradiente de velocidad.

Sin embargo, para este tipo de ecuaciones no se dispone de una solución general, por lo que se suele recurrir al análisis numérico para determinar una solución aproximada,

empleando la rama de la mecánica de fluidos conocida como “dinámica de fluidos computacional”, cuyo acrónimo en inglés es CFD (Computational Fluid Dynamics).

Se le añaden a las ecuaciones de Euler las que ocasiona la viscosidad, para obtener las ecuaciones de Navier-Stokes, el elemento diferencial de cálculo será un hexaedro infinitesimal.

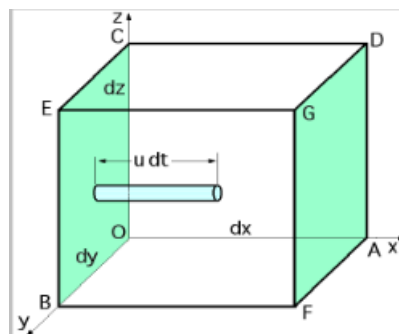


Figura 20: Paralelepípedo elemental para fluidos reales. Fuente [14]

Se tiene en cuenta entonces la ecuación de Newton de la viscosidad para la velocidad “u”, que tendrá de componentes (T_{ux}, T_{uy}, T_{uz})

$$\tau_{ux} = \eta \frac{\partial u}{\partial x}; \tau_{uy} = \eta \frac{\partial u}{\partial y}; \tau_{uz} = \eta \frac{\partial u}{\partial z}$$

Esto sería para las caras del paralelepípedo ECOB, EGFB y ECDG.

Por otro lado, para las caras restantes, las tensiones de cortadura son las siguientes:

$$\begin{aligned}\tau_{ux} - \frac{\partial \tau_{ux}}{\partial x} dx &= \eta \frac{\partial u}{\partial x} - \eta \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx \\ \tau_{uy} - \frac{\partial \tau_{uy}}{\partial y} dy &= \eta \frac{\partial u}{\partial y} - \eta \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} dy \\ \tau_{uz} - \frac{\partial \tau_{uz}}{\partial z} dz &= \eta \frac{\partial u}{\partial z} - \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz\end{aligned}$$

Entonces se operan las expresiones anteriores con las opuestas de su eje, es decir con las primeras, quedando las siguientes resultantes:

$$\begin{aligned}\eta \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx dy dz &= dF_{ux} \\ \eta \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} dx dy dz &= dF_{uy} \\ \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dx dy dz &= dF_{uz}\end{aligned}$$

Sumando estas 3 fuerzas de las 3 componentes, se obtiene la fuerza total debida a la viscosidad, para la velocidad denotada como “u”:

$$dF_u = dF_{ux} + dF_{uy} + dF_{uz} = \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) dx dy dz = \eta \nabla^2 u dx dy dz$$

1º Ecuación:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2\mu (e_{ij} - \Delta \delta_{ij}/3)]$$

Esta expresión resulta de la aplicación del principio general de conservación del momento lineal aplicado a un fluido.

2º Ecuación:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$$

Esta expresión representa la conservación de la masa.

Tendremos entonces que:

La densidad estará representada por ρ , la velocidad y sus componentes cartesianas serán u_i ($i = 1,2,3$), las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo, como por ejemplo la de la gravedad, serán expresadas como F_i , P será la presión del fluido y μ la viscosidad dinámica.

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

e_{ij} es la divergencia del fluido y δ_{ij} es un parámetro denominado “delta de Kronecker” que puede tomar valores de 0 ó 1 dependiendo de si las variables “i” y “j” de las que depende son distintas o iguales respectivamente.

D / Dt es la derivada material temporal siguiendo el fluido, que resulta ser el operador siguiente:

$$\frac{D}{Dt}(\cdot) \equiv \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)(\cdot)$$

4.3. Apartado transferencia de calor:

4.3.1. Conceptos básicos:

El calor se puede transferir por 3 procesos distintos:

1º) Conducción:

Es la transmisión del calor por contacto sin transferencia de materia.

2º) Convección:

Es la transmisión del calor mediante la transferencia de la propia materia portadora del calor.

3º) Radiación:

Se trata de la transmisión de energía o calor por medio de ondas electromagnéticas o también fotones.

Cuando la energía térmica es transferida entre dos cuerpos por conducción o convección es necesario entonces el contacto directo entre las moléculas de los diferentes cuerpos, y la diferencia primordial entre ambas formas de transmisión del calor es que en la primera no hay un movimiento macroscópico de la materia mientras que sí lo hay en el caso de la convección.

En lo que respecta a la materia ordinaria, son la conducción y la convección los principales mecanismos de transferencia de calor representando solamente una pequeña parte de la energía transferida la radiación, siendo solo importante para temperaturas de miles de kelvin.

La forma de transmitirse el calor en cuerpos sólidos es la siguiente:

Aquellas moléculas que reciben directamente el calor aumentarán su vibración chocando por este motivo con mayor facilidad con las que las rodean, harán lo mismo a su vez estas con sus vecinas hasta que finalmente todas las moléculas integrantes del cuerpo se agitan, lo cual es el motivo de que cuando se calienta un cuerpo por un extremo, por ejemplo, una varilla, transcurrirá cierto tiempo hasta que llega el calor al otro extremo.

Al igual que no todos los materiales son buenos conductores de electricidad, tampoco todos lo son del calor, los hay por lo tanto buenos y malos conductores del calor.

Definiciones previas:

Es preciso un entendimiento previo de los conceptos como en los otros apartados físicos del estudio, viniendo así explicados los correspondientes al modelado térmico descritos en la norma IEC-60076.

En tal norma vienen desarrollados algunos conceptos básicos importantes para la definición de los transformadores bañados en aceite, aquí se presentan brevemente a continuación:

Medio de refrigeración externo:

Es el medio externo al sistema de refrigeración del transformador, es decir, aquel al cual se le transfiere el calor proveniente de las pérdidas del transformador, se puede tratar de agua o aire. En el estudio el medio de refrigeración es el aceite.

Medio de refrigeración interno:

Se trata del líquido que está en contacto con los devanados y otras partes del transformador que le transmiten calor y por medio de él va a ser transferido al medio de refrigeración externo. En el estudio el medio de refrigeración es el aceite.

Calentamiento:

Se trata de una diferencia de temperaturas entre una parte elegida del transformador y la temperatura del medio de refrigeración interno, la cual se considera que es de 25°C.

Temperatura del líquido en la parte superior:

Es la temperatura del líquido aislante en la parte superior de la cuba.

Calentamiento del líquido en la parte superior:

Es la diferencia de temperatura existente entre la temperatura del líquido en la parte superior y la del medio de refrigeración externo.

Temperatura del líquido en la parte inferior:

	Estudio de la modelización del comportamiento magneto fluido térmico de un transformador monofásico	
---	--	---

Se trata de la temperatura que posee el líquido aislante en la parte inferior de los arrollamientos.

Calentamiento del líquido en la parte inferior:

Se trata de la diferencia de temperatura que posee el líquido en la parte inferior y la del medio de refrigeración externo.

Temperatura media del líquido:

Es la temperatura media de las temperaturas del líquido en la parte superior e inferior.

Calentamiento medio del líquido:

Es la diferencia de temperatura existente entre la media del líquido y la del medio de refrigeración externo.

Temperatura media del arrollamiento:

Es la temperatura del arrollamiento determinada al final del ensayo de calentamiento a partir de la obtenida de la resistencia en corriente continua del arrollamiento.

Calentamiento medio del arrollamiento:

Se trata de la diferencia entre la temperatura media del arrollamiento y la del medio de refrigeración externo.

Gradiente medio del arrollamiento:

Es la diferencia entre la temperatura media del arrollamiento y la media del líquido aislante.

Temperatura del punto caliente del arrollamiento:

Se trata de la temperatura más elevada de los conductores del arrollamiento que están en contacto con el aislamiento sólido o con el líquido aislante.

Factor Q:

Se trata de un factor adimensional empleado para estimar el incremento del gradiente medio del arrollamiento que se debe al incremento local de las pérdidas adicionales.

Factor S:

Es un factor adimensional empleado para la estimación del incremento local del gradiente medio del arrollamiento propiciado por el incremento local de las pérdidas adicionales.

Factor de punto caliente (H):

Se trata de un factor adimensional empleado para estimar el incremento local del gradiente del arrollamiento debido al incremento de las pérdidas adicionales y también a la variación experimentada en el caudal del líquido.

Es el producto de los factores Q y S.

4.3.2. Ecuación de la conducción térmica:

Este fenómeno de transmisión del calor está regulado por la ley de Fourier, la cual establece que en un medio isotrópo, la transferencia de calor por conducción, es decir, su flujo, es de sentido contrario y proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección, siendo de forma vectorial:

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

Siendo “q” el flujo de calor por unidad de superficie, “k” la conductividad térmica o capacidad de conducción del calor, es decir, análoga a la conductividad eléctrica y “ ∇T ” el gradiente del campo de temperatura en el interior del material.

En forma integral, es el calor que atraviesa una superficie “S” por unidad de tiempo:

$$\frac{dQ_s}{dt} = \int_S \mathbf{q} \cdot d\mathbf{S} = -k \int_S \nabla T \cdot d\mathbf{S}$$

4.3.3. Ecuación de la convección térmica:

Este fenómeno de transmisión de calor está regulado por la Ley de enfriamiento de Newton, la cual establece que la pérdida de calor de un cuerpo guarda relación de proporcionalidad con la diferencia de temperatura entre el cuerpo y sus alrededores.

Se tiene un fluido que se pone en contacto con una superficie sólida que está a diferente temperatura, con lo que se produce el fenómeno de la convección, habiendo además 2 tipos de esta, la natural y la forzada.

Es en el primer caso, es decir, en la natural, la diferencia de densidad del fluido resultante del contacto con una superficie a distinta temperatura la que da lugar a las fuerzas de movimiento del fluido, o fuerzas ascensionales, mientras que en el segundo caso es una fuerza motriz exterior la que mueve el fluido.

Se tiene según Isaac Newton que, la velocidad de enfriamiento de un cuerpo cálido en un ambiente más frío de temperatura “ T_m ” y temperatura del cuerpo “ T ”, es proporcional a la diferencia de temperatura instantánea entre la del cuerpo y la del ambiente, en forma de ecuación exponencial que resuelve esta primera ecuación diferencial es:

$$T(t) = T_m + (T_0 - T_m) e^{-rt}$$

Donde “ r ” es una constante de proporcionalidad.

Capítulo 5: Metodología del modelo de elementos finitos:

Es preciso definir primero algunos conceptos para un mejor entendimiento de esta metodología:

1º) Dominio:

Es el espacio geométrico en el cual se va a analizar el sistema.

2º) Condiciones de contorno:

Son aquellas variables conocidas que condicionan los posibles cambios que se puedan dar en el sistema, como por ejemplo desplazamientos, focos de calor, temperaturas etcétera.

3º) Incógnitas:

Son las variables del sistema que se desean conocer una vez que las condiciones de contorno ya hayan actuado sobre el sistema o dominio.

Estas incógnitas reciben el nombre de grados de libertad de cada nodo del modelo, siendo entonces los grados de libertad de un nodo las variables que determinan la posición y/o el estado del nodo.

Conocido por las siglas MEF, el método de los elementos finitos es un procedimiento que permite obtener soluciones numéricas aproximadas sobre un determinado dominio, cuerpo o estructura, sobre los cuales están definidas una serie de ecuaciones diferenciales que se encargan de caracterizar el comportamiento físico del problema que se quiere resolver, dividiéndolo para ello en un número sustancialmente elevado de subdominios, los cuales son no intersectantes entre ellos y son conocidos bajo el nombre de “elementos finitos”.

A su vez, dentro de cada elemento se puede distinguir una serie de puntos denominados nodos, que son representativos del elemento en sí.

Si dos de estos nodos son adyacentes entre sí, entonces pertenecerán al mismo elemento finito, es más, un nodo que se encuentre en el límite o frontera de un elemento finito podrá pertenecer a varios elementos.

Los nodos formarán un conjunto denominado “malla”.

Los cálculos son realizados sobre una malla de nodos o puntos que sirven además para la discretización del dominio de elementos finitos.

En función de las relaciones de adyacencia y/o conectividad se tendrá el valor de un conjunto de variables en cada nodo, a los que se les denomina grados de libertad.

Se podrá entonces escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales las relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos, y la matriz que conformen este grupo de ecuaciones se denominará matriz rigidez del sistema, además el número de ecuaciones del sistema es proporcional al de nodos.

Para el caso de sólidos deformables o más a grandes rasgos, para un problema de mecánica de medios continuos, el análisis de elementos finitos es programados computacionalmente para primero calcular el campo de desplazamientos y mediante las relaciones cinemáticas posteriormente las deformaciones y tensiones correspondientes.

Se trata de un método muy empleado debido principalmente a la facilidad y posibilidad de introducir dominios de cálculo complejos, en 2 o 3D.

Es un método además bastante versátil ya que se puede adaptar con facilidad a problemas como la mecánica de fluidos para realizar el cálculo de campos de velocidades y presiones (lo que se conoce como mecánica de fluidos computacional CDF), a problemas de transmisión de calor o incluso a aquellos de campo electromagnético.

Se trata además de un método muy recurrido en el ámbito ingenieril, tanto los métodos numéricos como más concretamente el modelo de elementos finitos ya que

resulta imposible encontrar solución analítica a estos problemas, convirtiéndose por lo tanto en la única alternativa útil de cálculo.

El método además posee una interesante propiedad, la de la convergencia; considerando particiones de elementos finitos que son cada vez más finas, la solución numérica calculada terminará por convergir rápidamente a la solución exacta del sistema de ecuaciones.

Básicamente la idea general de este método se basa en la partición o división de un conjunto continuo en uno conformado por pequeños elementos que están interconectados por lo que se ha descrito antes como nodos, rigiendo la ecuaciones del comportamiento continuo también las del comportamiento de los elementos, pasando de esta manera de un sistema que posee infinitos grados de libertad, es decir, de un sistema o medio continuo, que está descrito por una ecuación o sistema de ecuaciones diferenciales a un sistema que ya tiene un número de grados de libertad delimitado o finito y cuyo comportamiento es modelado por un sistema de ecuaciones, las cuales podrán ser lineales o no.

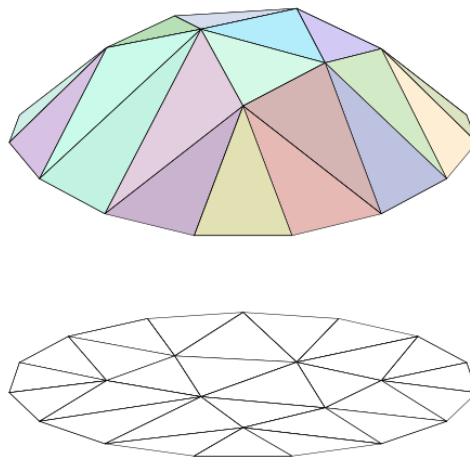
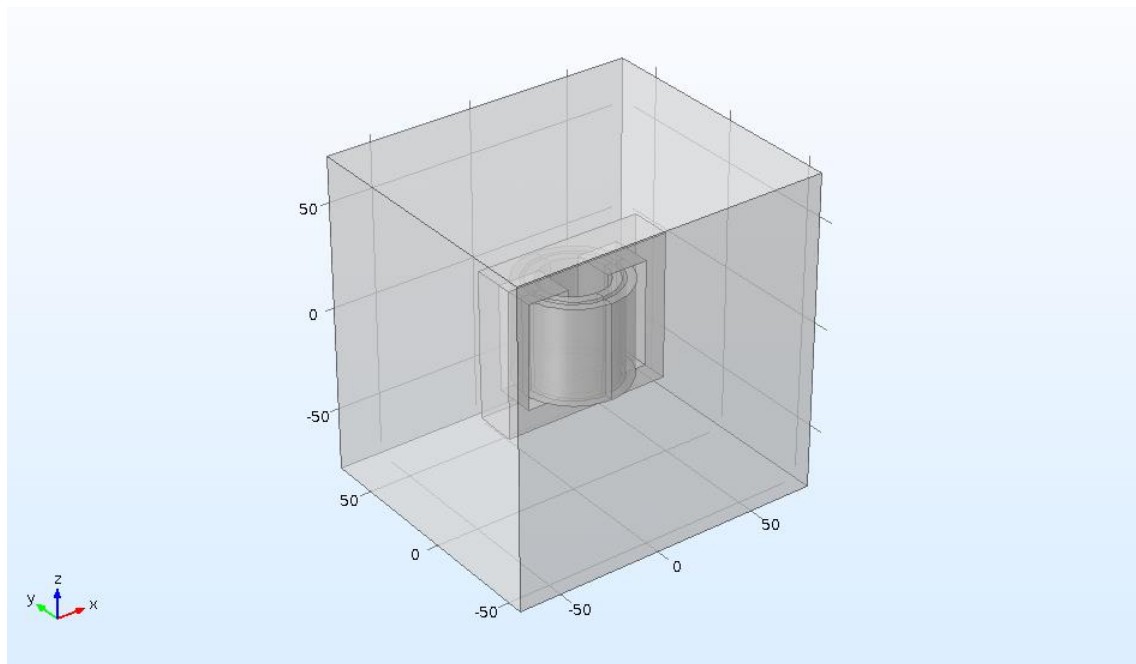


Figura 21: Ejemplo triangulación en modelado de elementos finitos. Fuente [15]

Capítulo 6: Descripción del modelo geométrico:

El modelo objeto de estudio se trata de como se ha explicado con anterioridad, de la representación simplificada de un transformador monofásico, omitiendo la parte de refrigeración externa, el depósito expansión, aisladores y radiadores a grandes rasgos.

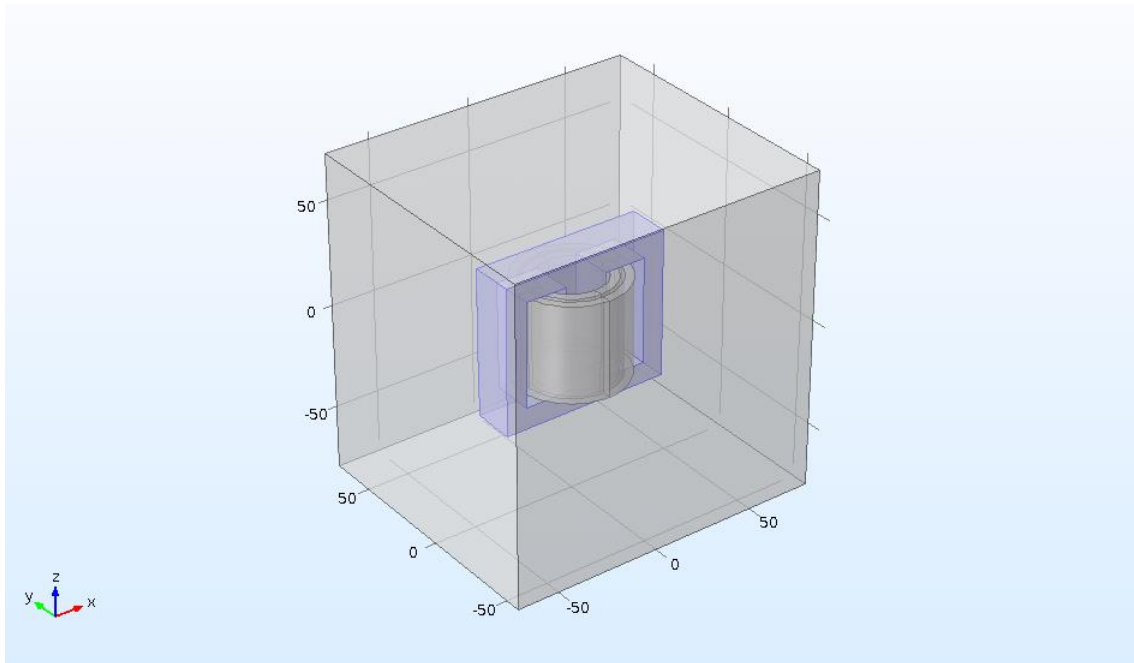
El núcleo y los canales de refrigeración de los devanados han sido simplificados para facilitar el trabajo y simulación del modelo.



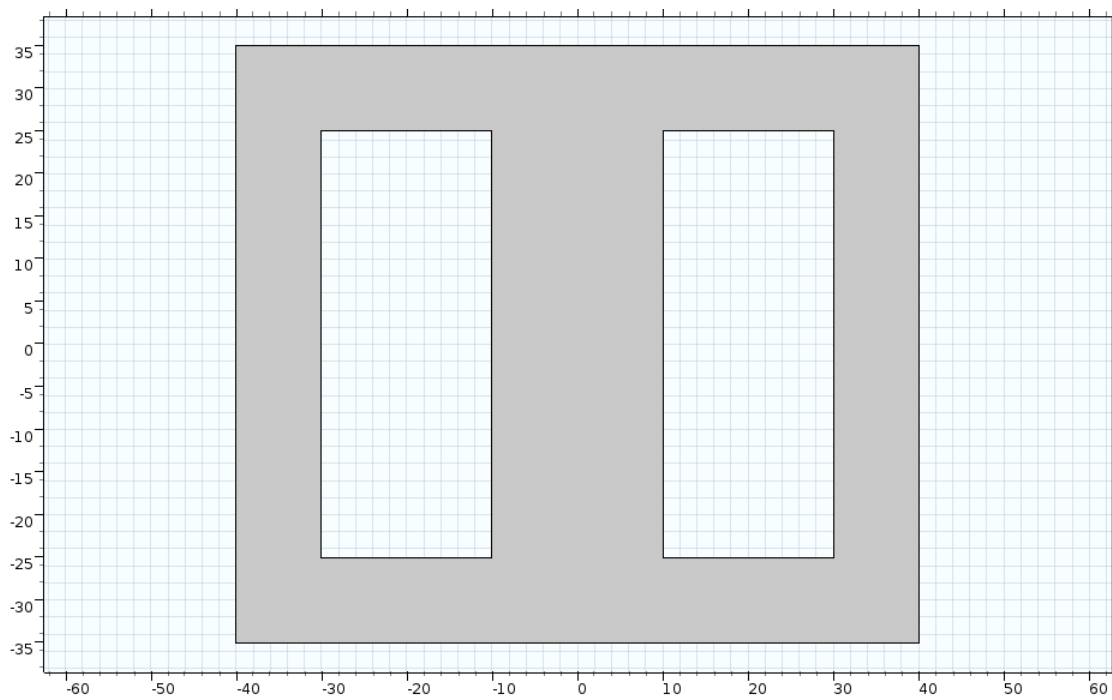
Modelo 1. Vista isométrica transformador monofásico simulado.

Básicamente, esa es la descripción gráfica del transformador objeto de estudio.

Esta figura muestra la disposición del núcleo, cuya sección se muestra a continuación.



Modelo 2. Vista isométrica del núcleo.

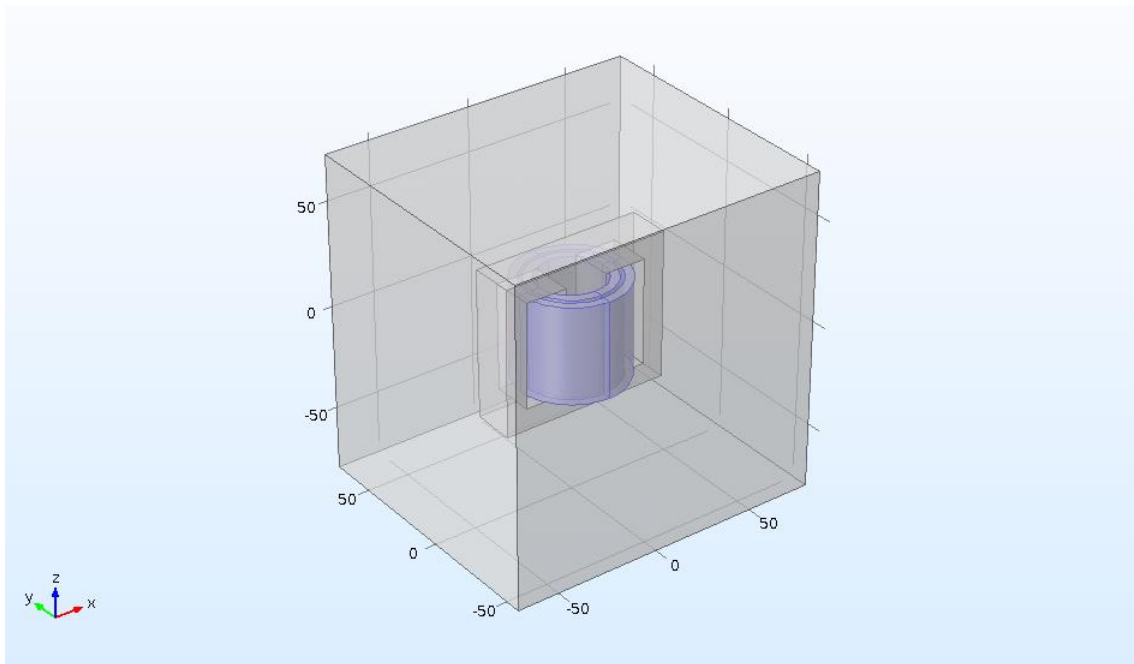


Modelo 3. Sección del núcleo.

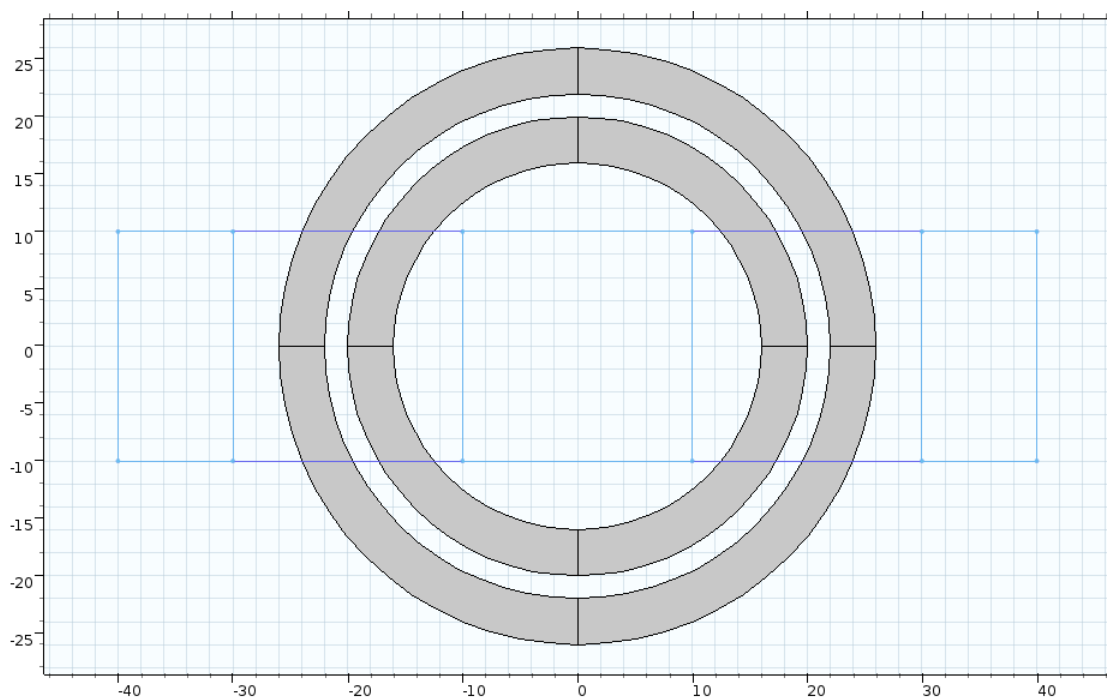
Se aprecia que el la columna central del núcleo tiene el doble de ancho que las laterales, dado que circulará por esta una mayor cantidad de flujo magnético que por las otras dos.

La forma rectangular en la sección es la habitual en este tipo de transformadores.

En esta figura se aprecia la disposición de los devanados primario (interior) secundario (exterior), y su correspondiente sección en verdadera magnitud.



Modelo 4. Vista isométrica devanados.



Modelo 5. Sección devanados.

La sección de los devanados se trata de dos anillos concéntricos cuyo centro coincide con el eje del centro de gravedad del núcleo, con lo que la figura tiene dos ejes de simetría, representados en esta figura por las rectas negras que pasan por el valor 0 del eje X e Y.

Capítulo 7: Modelo numérico

7.1 Ecuaciones de gobierno:

Se ha establecido en el modelo que la ecuación que rige la conservación de la masa (o ecuación de continuidad) es la siguiente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

A continuación se muestra la otra ecuación empleada por el programa para la resolución del apartado de la mecánica de fluidos, la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] + \mathbf{F}$$

Donde se tiene que “u” es la velocidad del fluido, “p” se refiere a la presión del mismo, “ρ” su densidad y “μ” su viscosidad dinámica.

El primer término de la ecuación, es decir, aquel que se encuentra a la izquierda del signo “=” recoge las fuerzas inerciales, el término “F”, las fuerzas volumétricas o de flotabilidad, y el resto de la expresión que queda en medio de estos dos términos hace referencia a las fuerzas de presión y de viscosidad.

Por otro lado, en lo que respecta al campo magnético, la ecuación de gobierno empleada por el simulador es la ley de Ampère, donde se reúnen las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E}\end{aligned}$$

Siendo “H” la intensidad de campo magnético o excitación magnética, “J” la densidad de corriente, “B” la inducción magnética, “A” el potencial vectorial electromagnético, “σ” la conductividad eléctrica y “E” el campo eléctrico.

En lo referente a la transferencia de calor, la ecuación de gobierno que rige el comportamiento del transformador y su refrigerante de acuerdo con Comsol es la siguiente:

$$\begin{aligned}\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} &= Q + Q_{\text{ted}} \\ \mathbf{q} &= -k \nabla T\end{aligned}$$

Donde “ρ” es la densidad del sólido, “Cp” la capacidad calorífica del sólido a presión constante, “k” es la conductividad térmica del sólido, “u” el campo de velocidades, “q” el flujo de calor por unidad de superficie.

La parte sombreada en la primera ecuación, hace referencia a la transferencia de calor en sólidos, mientras que la transferencia de calor en fluidos quedaría regida por la siguiente ecuación:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_p + Q_{vd}$$

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

En el modelo, todas las pérdidas de calor que encontramos en estas ecuaciones, es decir, “Q”, “Qted”, “Qp” y “Qvd” quedan aunadas por un único parámetro nombrado simplemente como “Q”, que recoge las pérdidas de corrientes parasitarias e histéresis, también conocidas este tipo de pérdidas como pérdidas en el hierro, y también recoge las pérdidas por efecto joule o pérdidas en el cobre.

7.2 Condiciones de contorno e iniciales:

Se han realizado las siguientes suposiciones, y se han impuesto los siguientes criterios para facilitar la simulación del modelo:

Para la transferencia de calor:

1º) Se considera que la totalidad del transformador está a una temperatura inicial de $T = 293.15K$

2º) Se considera que no hay pérdidas de calor en las paredes de la cuba del transformador, salvo en las horizontales, donde en la horizontal inferior tenemos una temperatura de $293.15K$ y en la horizontal superior evacua el calor por convección, por salida de masa.

3º) Las caras verticales de la cuba gozan de un aislamiento térmico, donde se ha supuesto que no se evacúa el calor, ya que este lo hace en la horizontal superior por convección el aceite.

Para el dominio magnético:

1º) Se considera que el vector potencial magnético, representado como se ha explicado anteriormente como A (wb/m), tiene un valor de 0 en las 3 coordenadas espaciales para $t=0$.

2º) Las paredes de la cuba se han considerado que cuentan con un aislamiento magnético, considerando que las líneas de campo no salen fuera de esta.

Para el movimiento del refrigerante:

1º) En lo que respecta al movimiento del refrigerante en el transformador, en todas las caras tanto de este como en las 4 paredes verticales de la cuba, se cumple la condición de no deslizamiento, donde los gradientes de velocidad son significativos.

2º) Se asume que el campo de velocidades y la presión tienen valores nulos para $t=0$.

3º) La velocidad de entrada por la parte de debajo de la cuba U_0 se considera igual a 0,05 m/s.

4º) La presión en la parte superior de la cuba se considera de 0 pascales.

5º) Se ha considerado las fuerzas de flotabilidad como fuerza ascensional, que depende de la diferencia de densidades. $-9,81*((\text{densidad en punto})-900[\text{kg/m}^3])$ en el eje z .

La curva de magnetización o curva inducción-intensidad magnética del núcleo, que está conformado por hierro dulce, es la presentada a continuación:

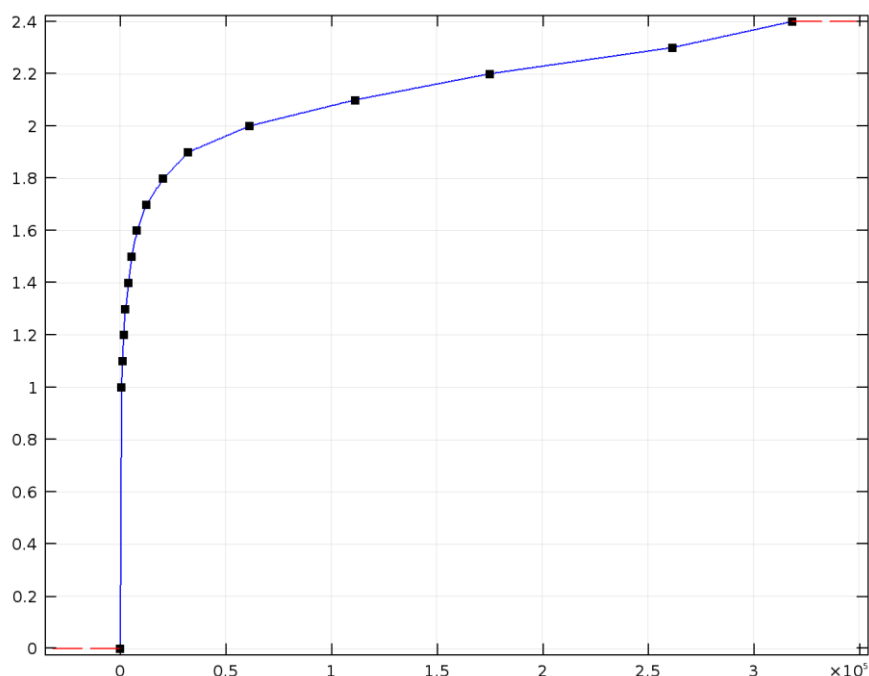


Figura 22. Curva BH del núcleo del modelo.

Los parámetros eléctricos iniciales del transformador son los siguientes:

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
R_p	100	100 Ω	Resistencia del bobinado primario
R_s	100	100 Ω	Resistencia del bobinado secundario
N_p	3e5	300000	Nº bobinas devanado primario
N_s	300	300	Nº bobinas devanado secundario
nu	50	50 Hz	Frecuencia de la fuente de voltaje
V_p	25000	25 KV	Tensión devanado primario

m	-	1000	Relación de transformación
Vs	25	25 V	Tensión devanado secundario
A_{coil1}	1e-6	10 ⁻⁶ m ²	Sección transversal bobinado primario
σ_{coil1}	6e7	6*10 ⁷ S/m	Conductividad eléctrica bobinado primario
A_{coil2}	1e-6	10 ⁻⁶ m ²	Sección transversal bobinado secundario
σ_{coil2}	6e7	6*10 ⁷ S/m	Conductividad eléctrica bobinado secundario

Tabla 8. Parámetros eléctricos del transformador modelado.

7.3 Mallado:

En este apartado se recoge la información del mallado empleado, que como se ha explicado con anterioridad, se trata este de un método aproximativo que divide el modelo en pequeños elementos compuestos de simples formas geométricas, donde en cada una de estas, un conjunto de ecuaciones polinómicas se emplea para aproximar las físicas o parámetros estudiados.

Estas son las características de la malla empleada:

Elementos geométricos	
Tetraedros	10576
Triángulos	2464

Aristas	484
Vértices	64

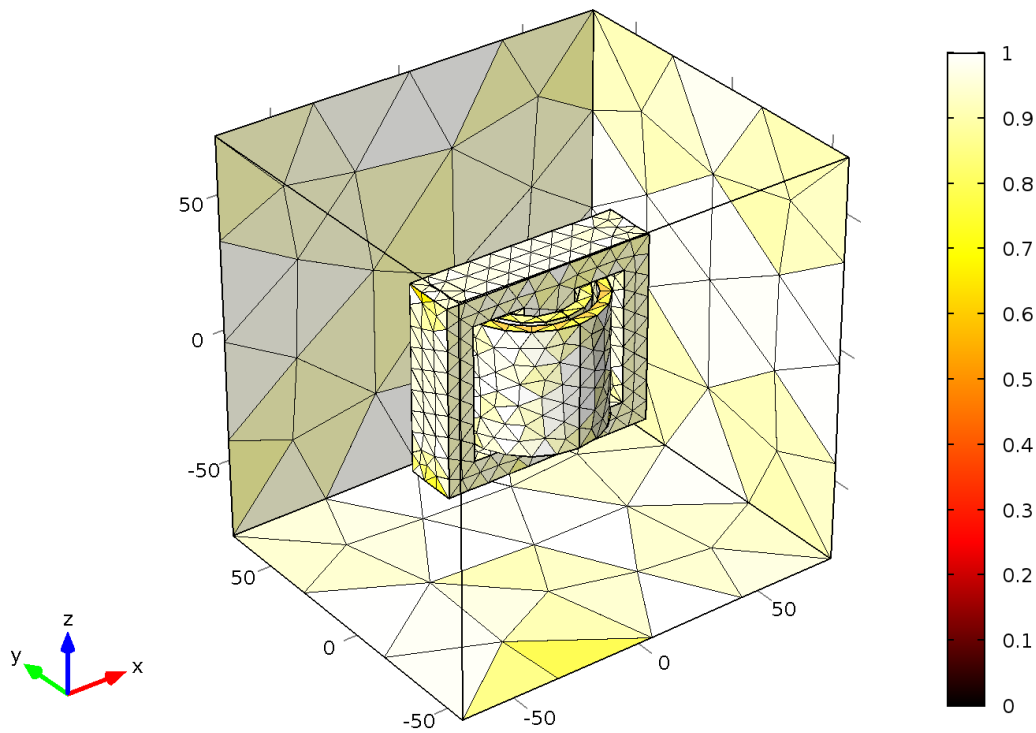
Tabla 9. Características mallado del modelo.

Estadísticas del mallado	
Número de elementos	10576
Mínima calidad del elemento	0,01745
Calidad media del elemento	0,6066
Ratio de volumen de elemento	$3,084 \cdot 10^{-4}$
Volumen del mallado	2925000 mm^3
Ratio de máximo crecimiento	5,668
Ratio de crecimiento medio	2,218

Tabla 10. Estadísticas del mallado del modelo.

Se presenta a continuación una figura que resume la calidad empleada en el mallado.

Entendiéndose por calidad como el grado de no deformación de la geometría de los elementos del mallado, encontrándose este parámetro entre los valores 0 y 1 como se puede observar en la siguiente figura:



Modelo 6. Distribución de la calidad del mallado del modelo.

7.4 Propiedades de los materiales:

Se presenta en este apartado las propiedades de los materiales que forman parte del modelo, los cuales son los siguientes:

	Estudio de la modelización del comportamiento magneto fluido térmico de un transformador monofásico	
---	--	---

Aire:

Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
Permeabilidad relativa	mur	1	-
Permitividad relativa	epsilon _r	1	-
Viscosidad dinámica	mu	$\eta(T[1/K])[Pa \cdot s]$	Pa*s
Ratio de calor específico	gamma	1,4	-
Conductividad eléctrica	sigma	10[S/m]	S/m
Capacidad calorífica a presión constante	Cp	$C_p(T[1/K])[J/(kg \cdot K)]$	J/(Kg*K)
Densidad	Rho	$\rho(pA[1/Pa], T[1/K])[kg/m^3]$	Kg/m ³
Conductividad térmica	k	$k(T[1/K])[W/(m \cdot K)]$	W/(m*k)
Velocidad del sonido	c	$c_s(T[1/K])[m/s]$	m/s
Índice de refracción (parte real)	n	1	-
Índice de refracción (Parte imaginaria)	Ki	0	-

Tabla 11. Propiedades de material del modelo (aire).

Hierro dulce:

Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
Conductividad eléctrica	sigma	1.12e7[S/m]	S/m
Permitividad relativa	epsilon _r	1	-
Conductividad térmica	K	400	W/(m*K)
Densidad	rho	8700	Kg/m ³
Capacidad calorífica a presión cte	Cp	385	J/(Kg*K)
Campo magnético (módulo)	normH	HB(normB[1/T])[A/m]	A/m
Flujo de campo magnético (módulo)	normB	BH(normH[m/A])[T]	T
normH	normH	$\sqrt{H_1^2+H_2^2+H_3^2}$	A/m
normB	normB	$\sqrt{B_1^2+B_2^2+B_3^2}$	T

Tabla 12. Propiedades de material del modelo (hierro dulce).

Cobre:

Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
Permeabilidad relativa	mu _r	1	-
Capacidad calorífica a presión cte	Cp	385	J/(Kg*K)
Permitividad	epsilon _r	1	-

	Estudio de la modelización del comportamiento magneto fluido térmico de un transformador monofásico	
---	--	---

relativa			
Densidad	rho	8700	Kg/m ³
Conductividad térmica	K	400	W/(m*K)
Conductividad eléctrica	Sigma	5.998e7	S/m
Coefficiente de expansión térmica	Alpha	17e-6	1/K
Módulo de Young	E	110e9	Pa
Ratio de poisson	nu	0,35	-
Resistividad de referencia	Rho0	1.72e-8	ohm*m
Coefficiente térmico de resistividad	Alpha	0.0039	1/K
Temperatura de referencia	Tref	298	K

Tabla 13. Propiedades de material del modelo (cobre).

Aceite de transformador:

Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
Viscosidad dinámica	Mu	$\eta(T[1/K])[Pa*s]$	[Pa*s]
Capacidad calorífica a presión cte	Cp	$C_p(T[1/K])[J/(kg*K)]$	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)
Conductividad eléctrica	Sigma	10	S/m

Permitividad relativa	epsilon _r	1	-
Permeabilidad relativa	mu _r	1	-
Ratio de calor específico	Gamma	1	-

Tabla 14. Propiedades de material del modelo (aceite).

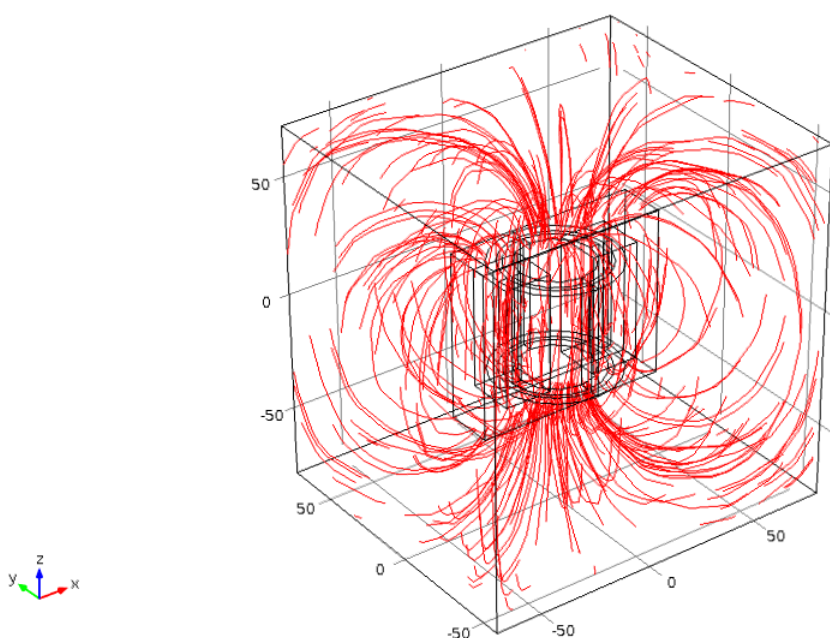
Capítulo 8: Resultados obtenidos

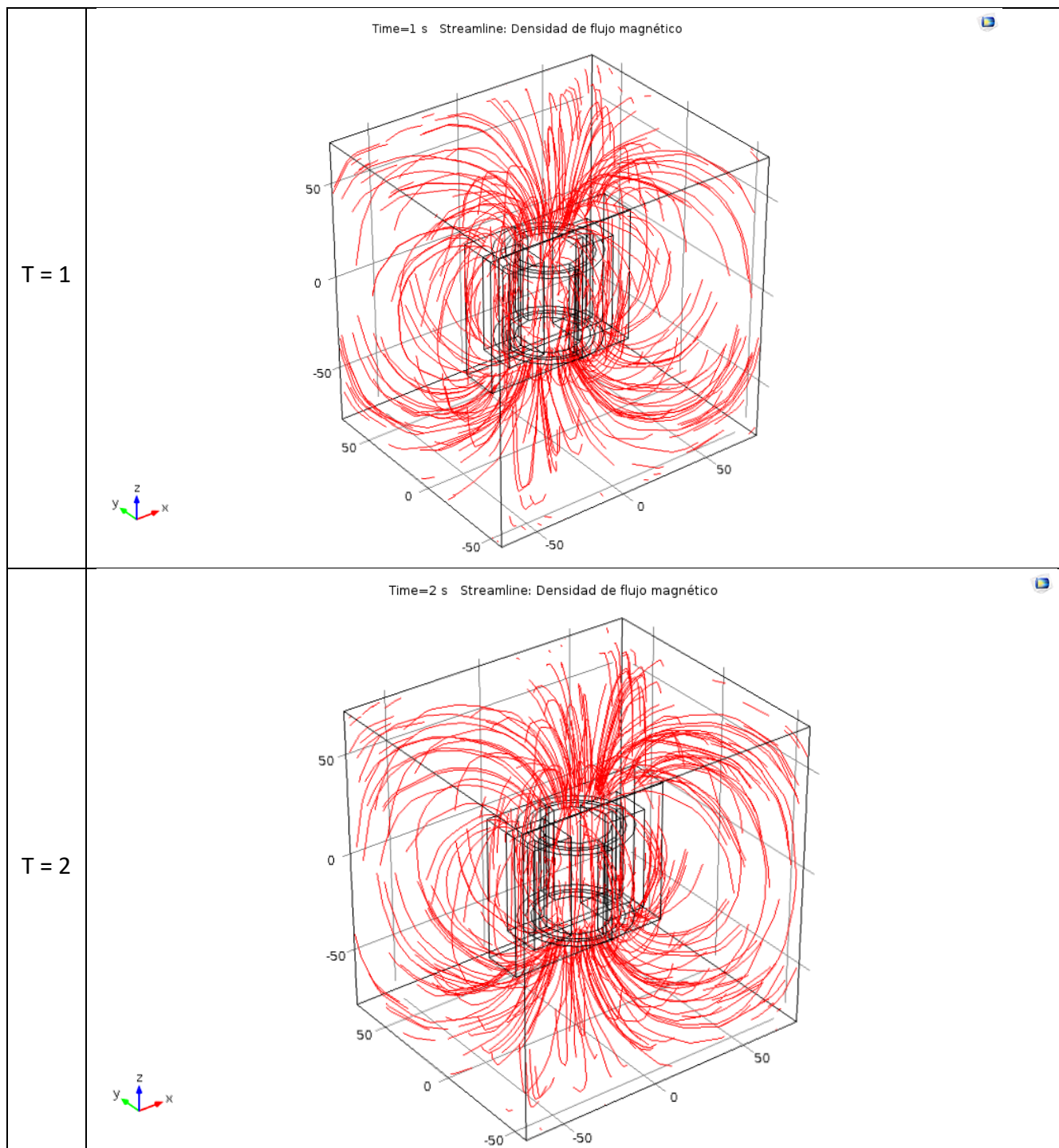
En la siguiente figuras se presenta la evolución de la densidad del flujo magnético en el tiempo, para los intervalos de 0, 1 y 2 segundos:

Densidad de flujo magnético

Time=0 s Streamline: Densidad de flujo magnético

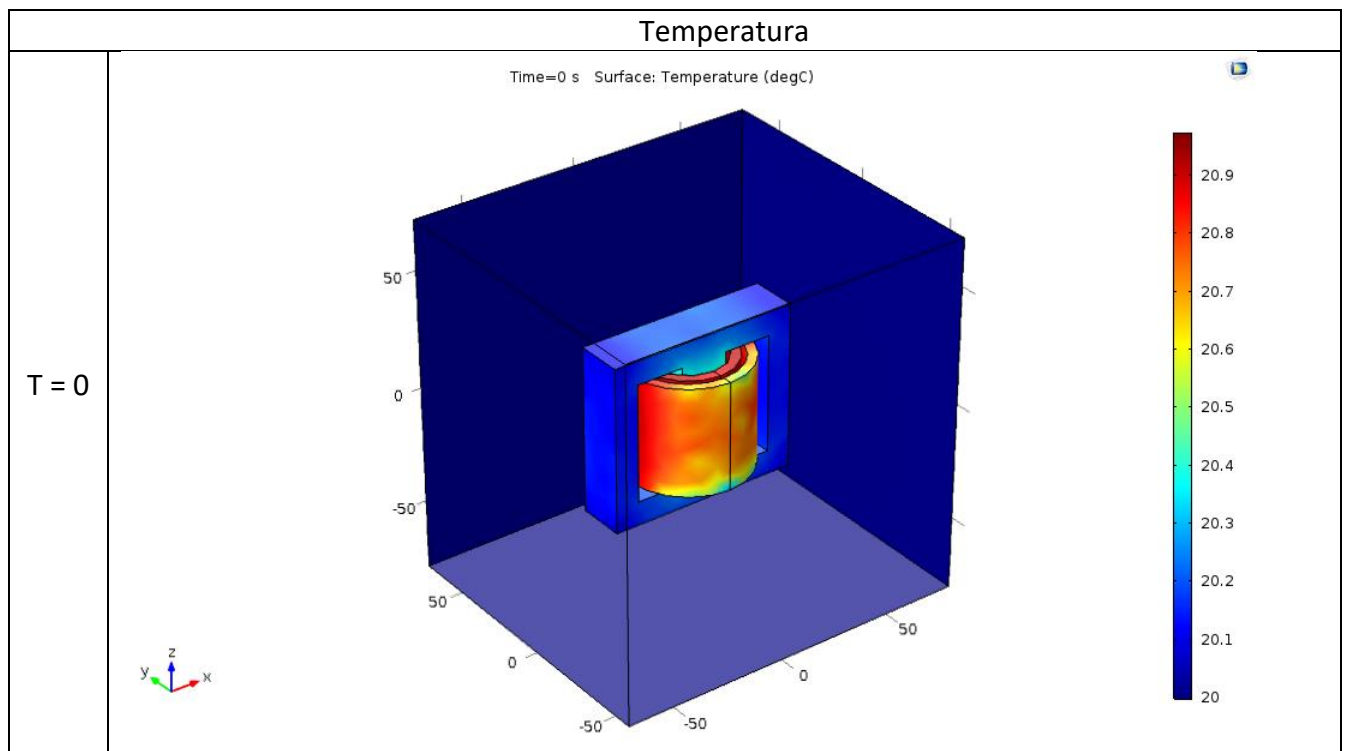
$T = 0$

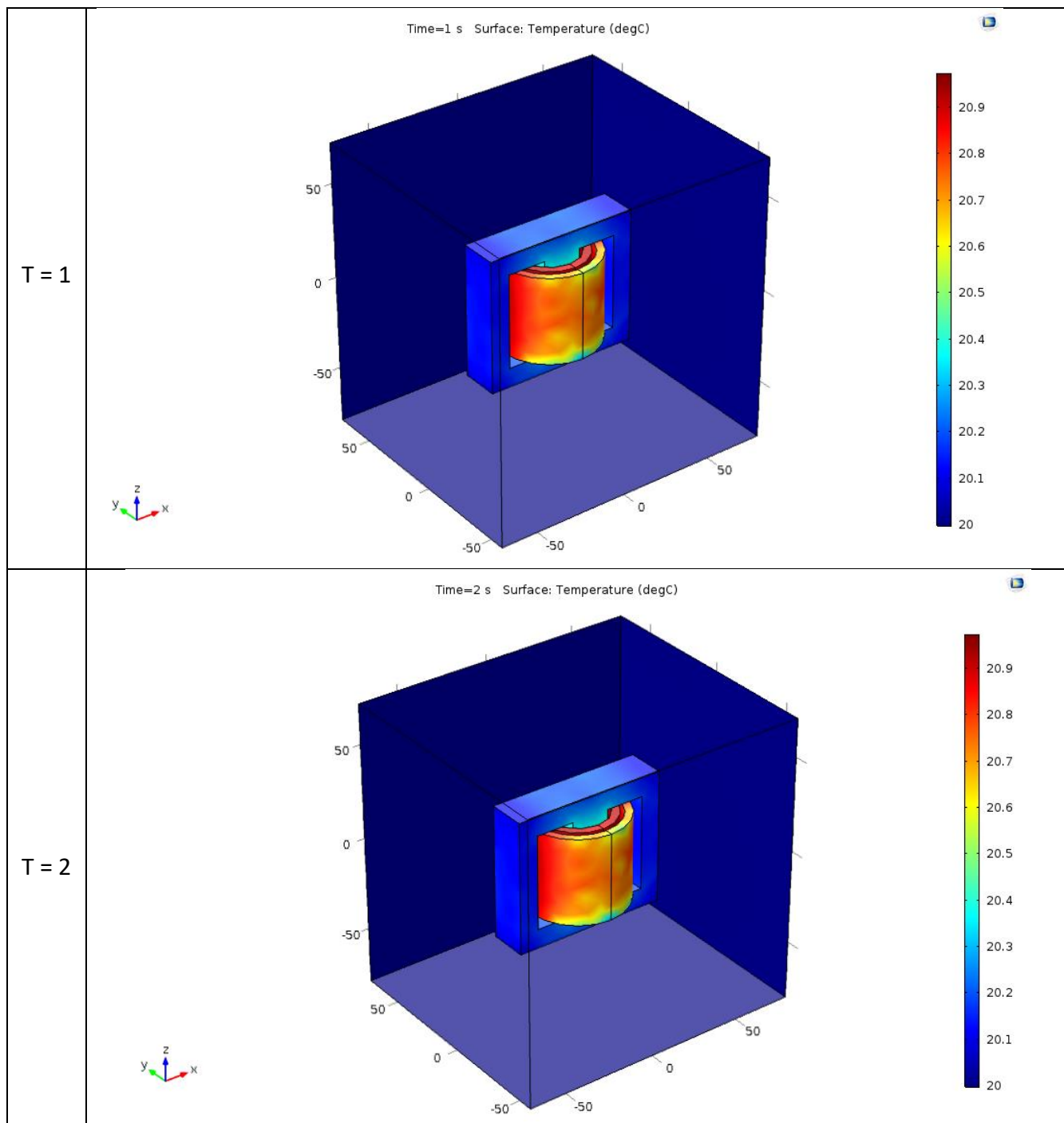




Modelo 7. Evolución de la densidad del flujo magnético del modelo.

A continuación se presenta la evolución de la temperatura (en Celisus) para los mismos tiempos:

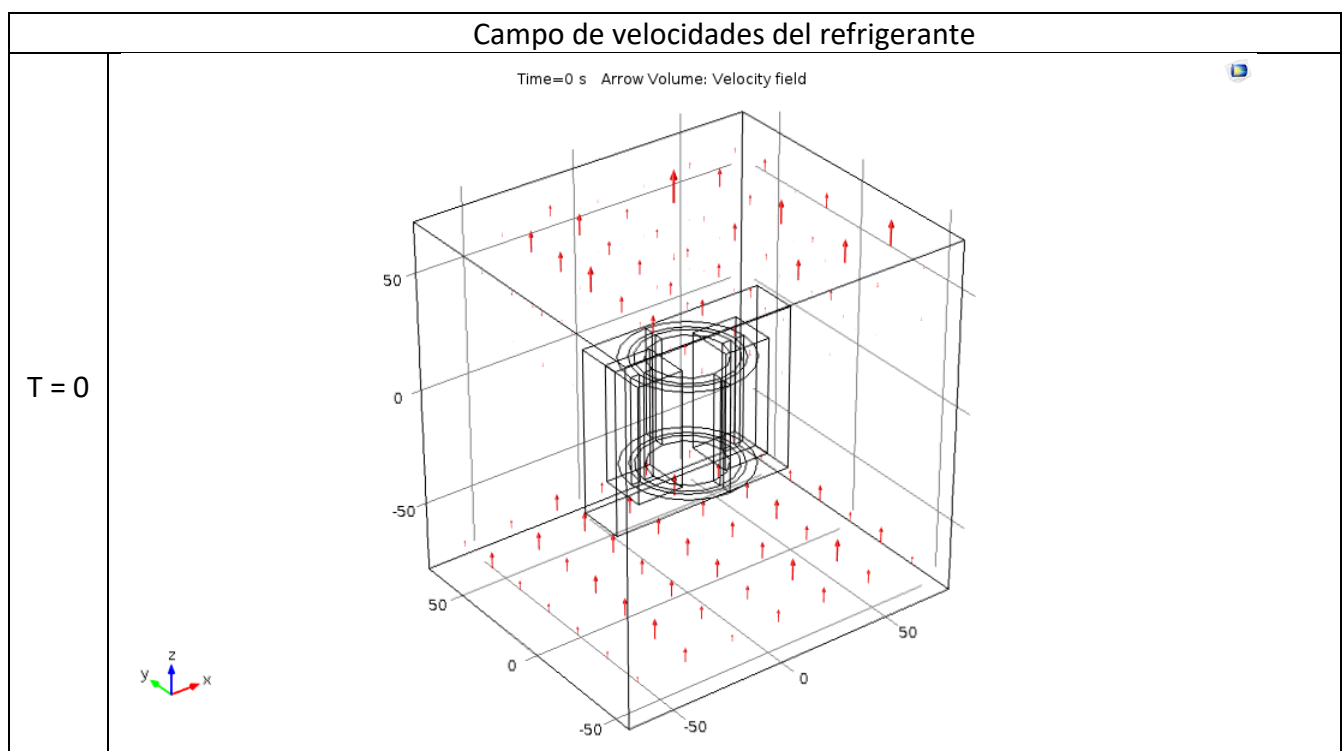


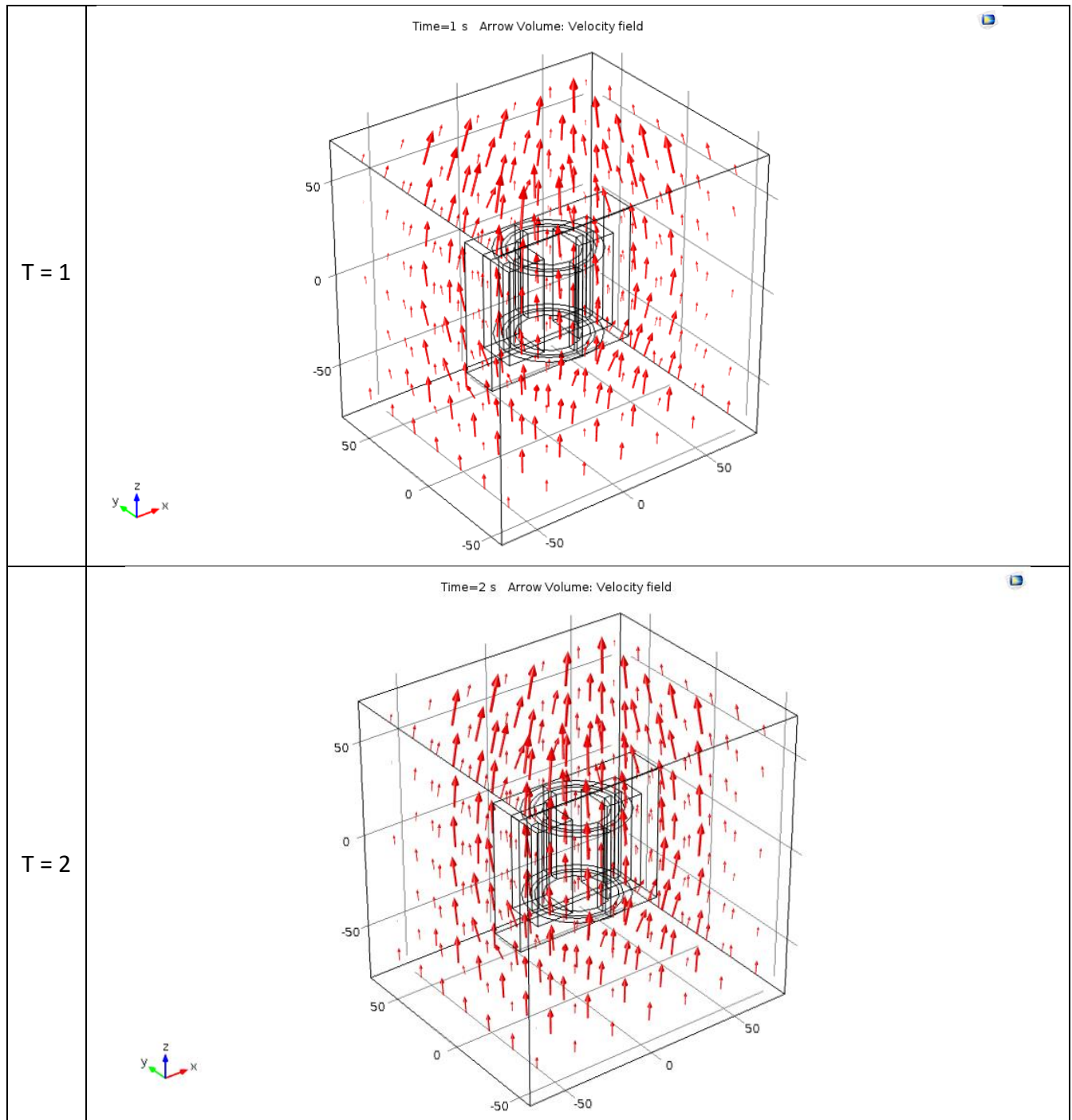


Modelo 8. Evolución de la temperatura del modelo.

Se puede observar que apenas cambia con el tiempo esta variable, dado que para agilizar la simulación como se ha explicado antes, en este período de tiempo apenas se aprecia cambio en la temperatura del transformador.

Comparación de la evolución del campo de velocidades del fluido refrigerante:

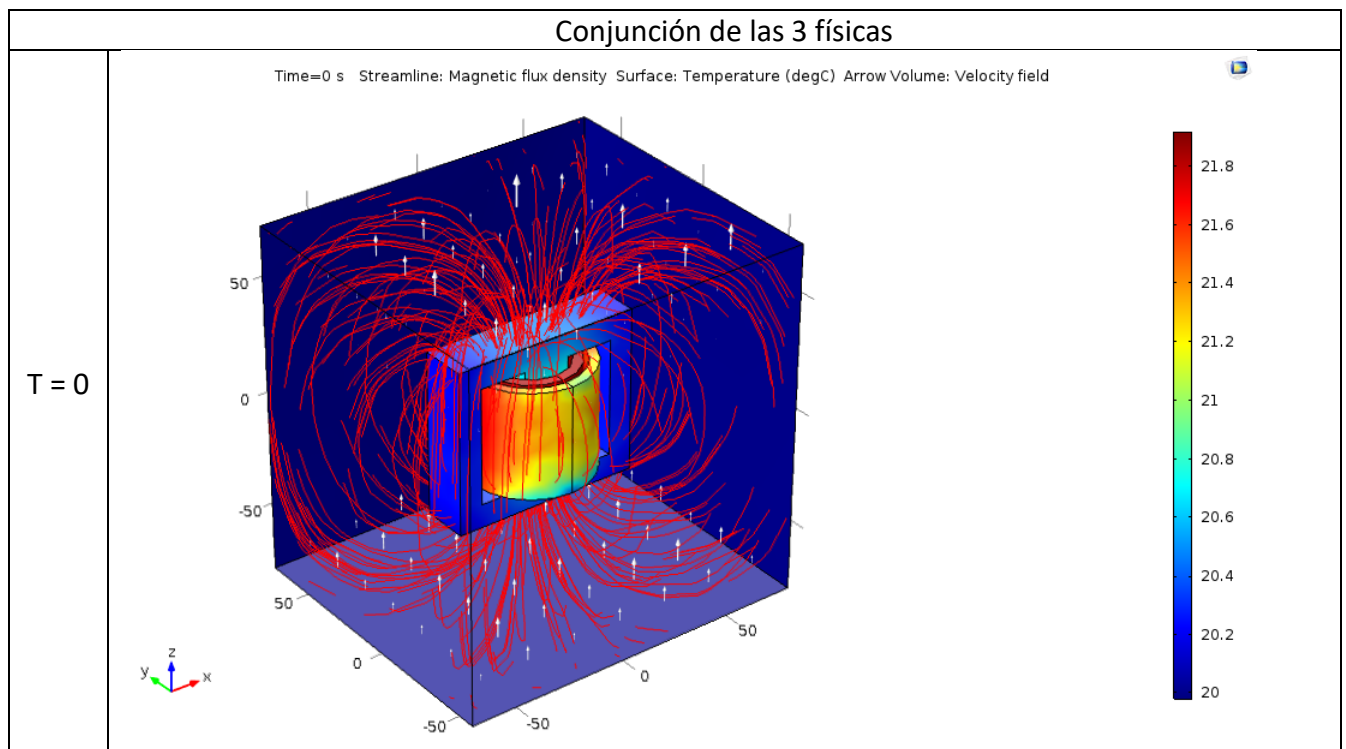


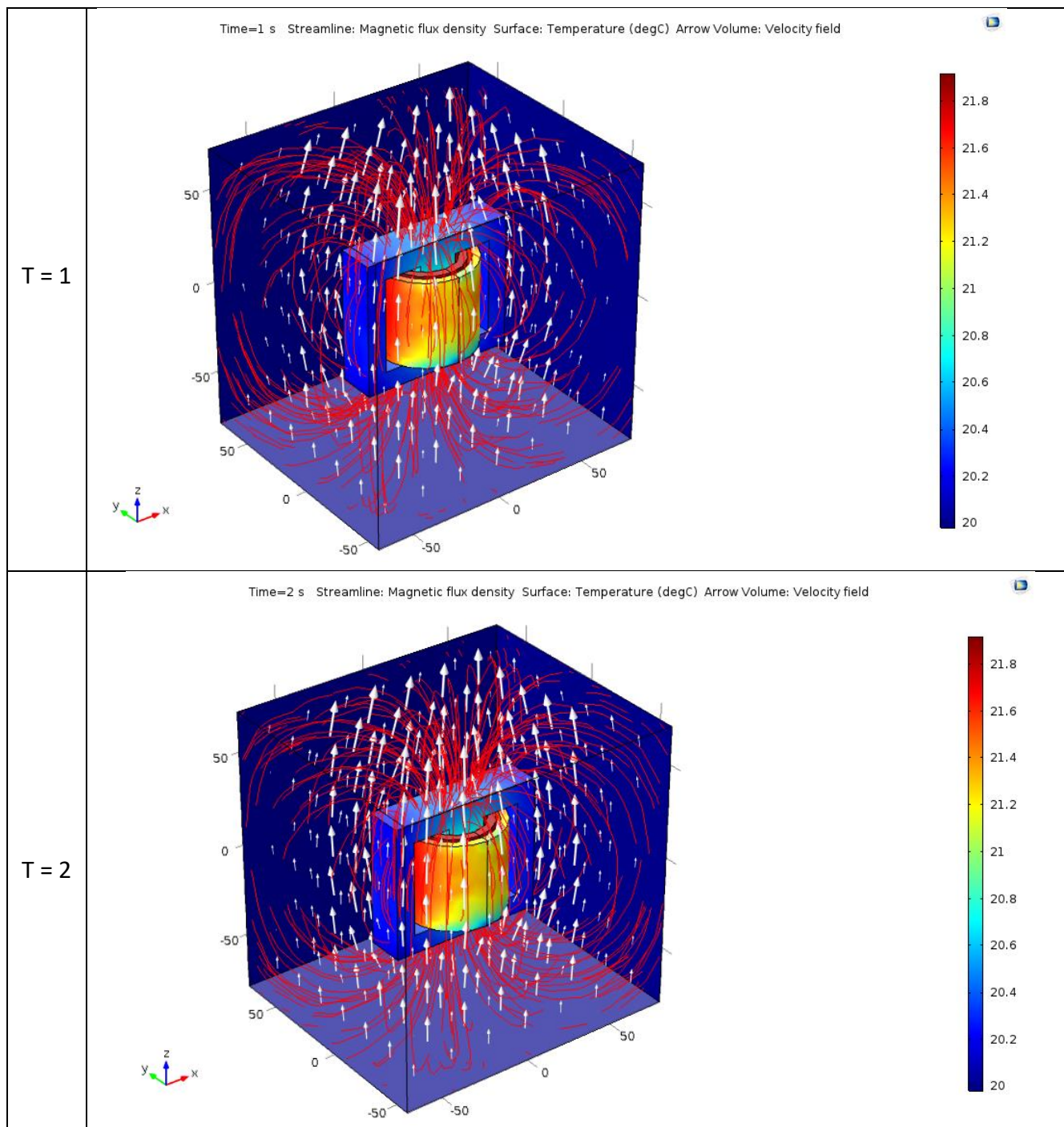


Modelo 9. Evolución campo de velocidades del modelo.

Es más notable la variación del campo de velocidades del refrigerante que la evolución en el tiempo de las dos variables antes desarrolladas, dado que en el instante $t = 0$ solo hay movimiento del fluido en la cara inferior, ya que es una condición de contorno establecida.

La mayor cantidad del aceite tenderá a irse hacia los laterales ya que se encuentra con un obstáculo que es el transformador haciendo este que aumente la velocidad de paso por los laterales del mismo.



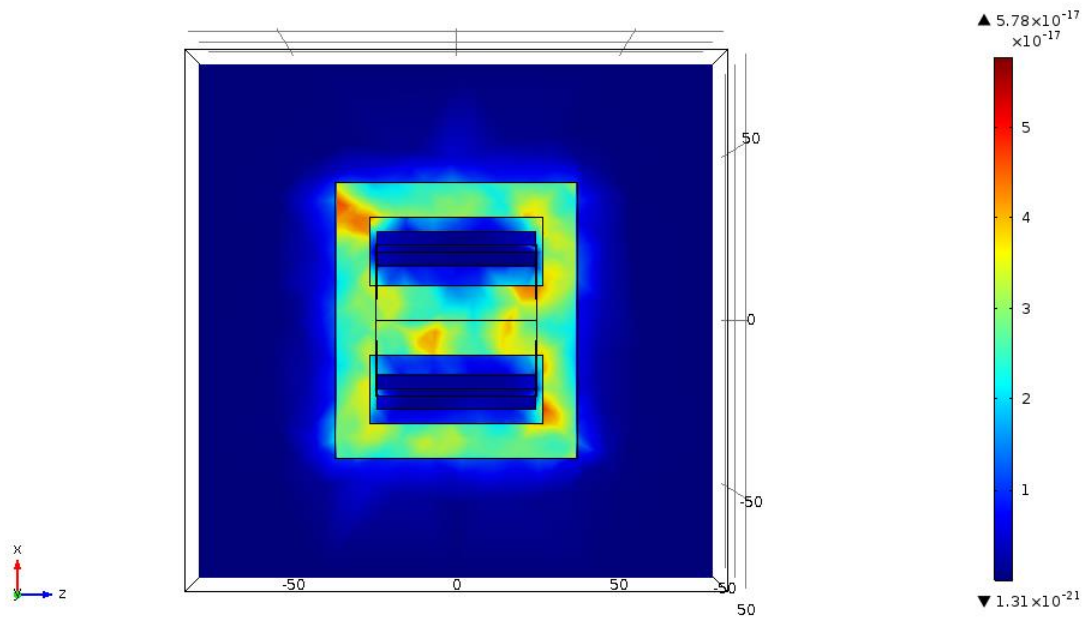


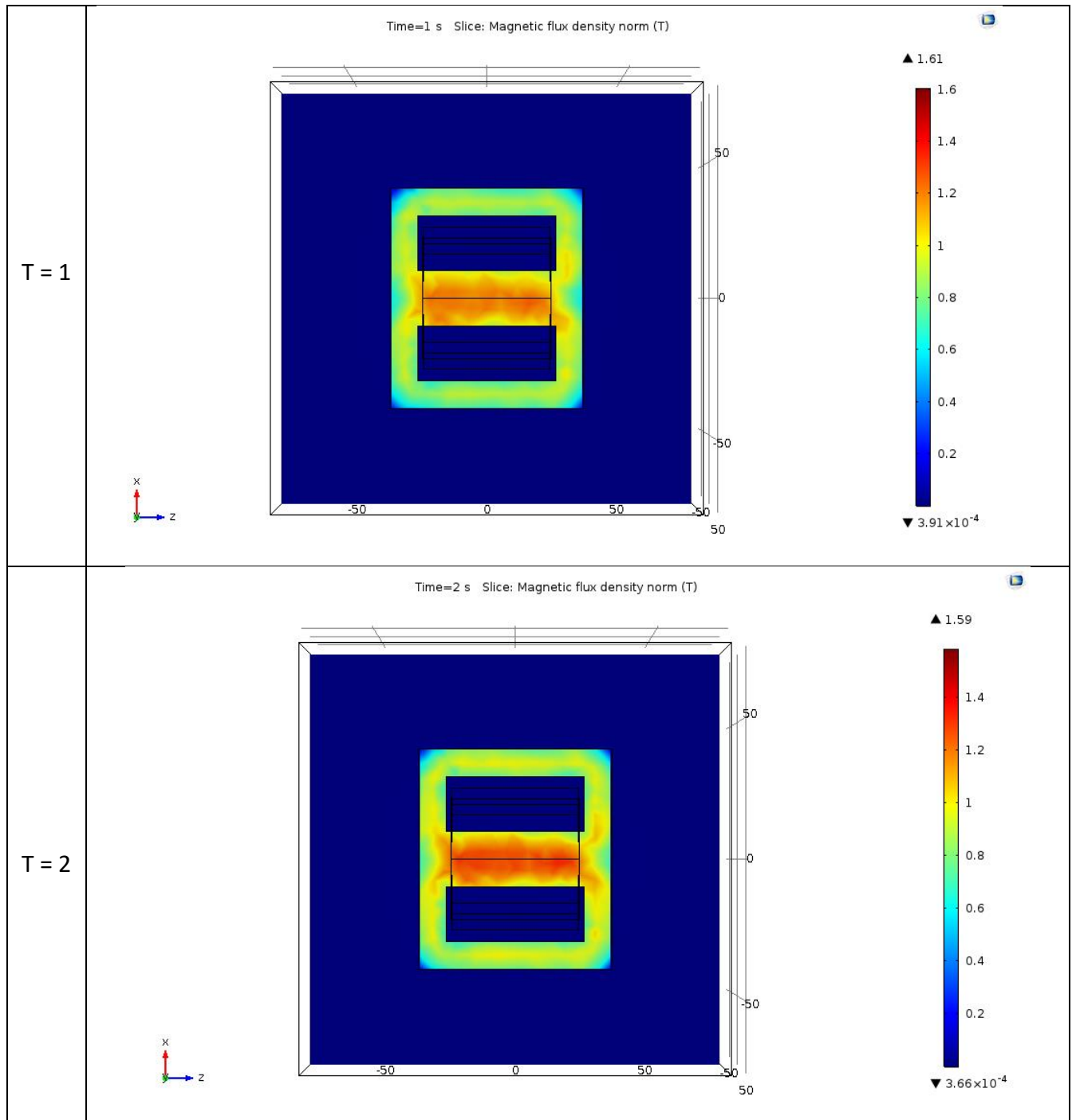
Modelo 10. Evolución conjunta de las 3 físicas del modelo.

Flujo magnético 2D

Time=0 s Slice: Magnetic flux density norm (T)

T = 0





Modelo 11. Evolución del flujo magnético del modelo.

En las figuras se muestra la sección principal del transformador para mostrar la evolución de la densidad del flujo magnético con el tiempo.

Como se puede observar, para $t = 2$, el valor de la densidad de flujo en la columna central del transformador es aproximadamente el doble el de las columnas laterales debido a que el área de la columna central es el doble que las de las columnas laterales.

Capítulo 9: Conclusiones

Se han conseguido combinar satisfactoriamente las 3 físicas fundamentales que posee el transformador, haciendo un modelo numérico básico de un transformador monofásico básico, llevado a cabo un temporal del cual se obtienen resultados de velocidades temperaturas y parámetros electromagnéticos.

El tiempo de simulación ha sido aproximadamente de 2 horas utilizando una memoria RAM de 3 Gb en un ordenador cuyas características se indican a continuación:

Procesador:	AMD FX-7500 Radeon R7, 10 Compute Cores 4C+6G 2.10 GHz
Memoria instalada (RAM):	8,00 GB (6,93 GB utilizable)
Tipo de sistema:	Sistema operativo de 64 bits, procesador x64
Lápiz y entrada táctil:	La entrada táctil o manuscrita no está disponible para esta pantalla

Capítulo 10: Artículos para el estado del arte

10.1 Artículos que han inspirado el proyecto:

El artículo [2] ha servido como base para el desarrollo del modelo fluido-térmico-electromagnético del presente PFG y a continuación será desarrollado un resumen del mismo.

En este artículo se desarrolla en este artículo la idea principal de uso de un nanofluido magnético ferromagnético como refrigerante y aislante en un transformador, así como su capacidad refrigerante.

El fluido en cuestión, se trata de una dispersión coloidal de nanopartículas magnéticas recubiertas de una capa de tensoactivo y mezcladas con el aceite mineral para transformadores. El recubrimiento de las nanopartículas con la sustancia tensoactiva permite que estas no se aglomeren en el aceite ni precipiten por gravedad, se intenta conseguir una mezcla aceite-nanopartículas homogénea y estable en el tiempo.

El beneficio obtenido de usar un nanofluido magnético como aislante, el cual tiene incluso mejores propiedades dieléctricas y mejor conductividad térmica que el aceite puro, tiene como ventajas entre otras la reducción de los gastos y costes de operación de los transformadores.

El tamaño de las nanopartículas oscila de 1 a 15 nm y el tensoactivo suele ser normalmente ácido oleico.

Los ferrofluidos también incrementan la capacidad del transformador de resistir sobre voltajes así como mayor resistencia a la degradación debida a la humedad al compararlo con aceites habituales, esto lleva a la posibilidad de fabricar transformadores de menor tamaño y alta eficiencia, con una vida útil superior y también con una mayor capacidad de carga.

Capítulo 11: Referencias

11.1 Referencias bibliográficas:

- [1] COMSOL Multiphysics E-core Transformer www.comsol.com
- [2] https://es.wikipedia.org/wiki/Permeabilidad_magn%C3%A9tica
- [3] https://es.wikipedia.org/wiki/Campo_magn%C3%A9tico
- [4] FRAILE MORA, J. 2003 *Máquinas Eléctricas* 5ª ed. Madrid McGraw-Hill/Interamericana de España
- [5] SANTISTEBAN, A. 2015. *Estudio fluido-térmico de aceites biodegradables en un transformador de potencia*. España
- [10] A. M. Morega, M. Morega, L. Pîslaru-Dănescu, V. Stoica, F. Noura, s, 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.
- [13] <https://es.wikipedia.org/wiki/Viscosidad>
- [14] <http://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>
- [15] <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/mecanica-de-fluidos-y-maquinas-hidraulicas>
- [16] https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos