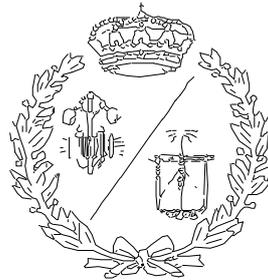


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**INFLUENCIA DEL TIPO Y NIVEL DE
MALLADO SOBRE EL VALOR Y LA
UBICACIÓN DE LOS PUNTOS CALIENTES
DE UN DEVANADO DE UN
TRANSFORMADOR DE POTENCIA**
(Influence of the type and level of meshing on
the value and location of the hot spots in a
winding of a power transformer)

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Alberto Sánchez Hernando
Director: Fernando Delgado San Román

Enero 2016

TÍTULO	Influencia del tipo y nivel de mallado sobre el valor y la ubicación de los puntos calientes de un devanado de un transformador de potencia		
AUTOR	Alberto Sánchez Hernando		
DIRECTOR / PONENTE	Fernando Delgado San Román		
TITULACIÓN	<i>Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales</i>	FECHA	7/1/15

PLABRAS CLAVE

- Transformador de potencia
- Análisis numérico
- Análisis fluido-térmico
- Puntos calientes
- Mallado

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este proyecto se estudia la influencia del tipo y nivel de mallado sobre el valor y la ubicación del punto caliente en el papel aislante utilizado en el encintado de los devanados de los transformadores de potencia cuando se determina por simulación.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

A partir del modelo geométrico del primer paso del devanado de baja de tensión de una fase de un transformador de potencia, se realiza un estudio fluido-térmico de simulación mediante el programa basado en elementos finitos COMSOL Multiphysics.

Para ello, se aplica al modelo geométrico dos físicas acopladas entre sí: la física de transferencia de calor y la de mecánica de fluidos. Además, se aplican distintos tipos de mallado al volumen (triangular, cuadrático y mapeado hexaédrico) con tres niveles de mallado diferentes, obteniendo así nueve casos de estudio.

Se resuelven los nueve y se comparan en temperaturas y velocidades, y se obtienen las ubicaciones de los puntos calientes y sus valores.



CONCLUSIONES

- Independientemente del tipo de mallado, un mayor número de elementos genera una mayor calidad de mallado.
- Una mayor calidad de mallado, con independencia del tipo de mallado, genera temperaturas máximas más elevadas en toda la geometría.
- El caso que genera una mejor calidad de mallado es el tercero, mapeado y barrido con hexaedros.
- La ubicación del punto caliente del papel dependerá tanto del tipo de mallado como de su nivel.

BIBLIOGRAFÍA

- Mufuta. (2000). Modelling of the mixed convection in the windings of a disc power transformer.
- Jesús Fraile Mora. (2003). Máquinas eléctricas (5^o ed.). Madrid: Mc Graw Hill.
- Theodore Wildi. (2007). Máquinas eléctricas y sistemas de potencia. México: Pearson.
- F. Torriano, M. Chaaban, P.Picher. (2010). Numerical study of parameters affecting the temperatura distribution in a disc-type transformer winding. *Applied Thermal Engineering*. 30, 2034-2044
- F. Torriano, P. Picher, M. Chaaban (2012). Numerical investigation of 3D flow and thermal effects in a disc-type transformer winding. *Applied Thermal Engineering*. 40, 121-131
- Skillen, A. Revell, H. Iacovides, W. Wu. (2012). Numerical prediction of local hot-spot phenomena in transformer windings, *Applied Thermal Engineering*, 36, 96-105
- Fofana. (2013). 50 years in the development of insulating liquids. 29(5), 13-25.
- Lecuna, F. Delgado, P. Castro, A. Ortiz, I. Fernández and C. J. Renedo, "Thermal-fluid Characterization of Alternative Liquids of Power Transformers: a Numerical Approach," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10/2015. 2015.



TITLE	Influence of the type and level of meshing on the value and location of the hot-spots in a winding of a power transformer		
AUTHOR	Alberto Sánchez Hernando		
DIRECTOR / SPEAKER	Fernando Delgado San Román		
DEGREE	<i>Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales</i>	DATE	7/1/15

KEY WORDS

- **Power transformer**
- **Numerical analysis**
- **Thermal-fluid analysis**
- **Hot-spots**
- **Meshing**

PROBLEM STATEMENT

In this project the influence of the type and level of meshing on the value and location of the hot spot in the insulating paper used in the taping of the windings of the power transformers as determined by simulation is studied.

DESCRIPTION OF THE PROJECT

This study has been carried out using the finite element-based software COMSOL Multiphysics.

First, a geometrical model of the first pass of the low voltage winding of a power transformer has been done. Then, two physics – heat transfer and fluid mechanics - has been applied over this model. Also, three different types of meshing (triangular, quadratic and hexahedral sweep) are applied with three different levels of meshing, thus obtaining nine study cases. Finally, these cases have been resolved using different solvers.

The temperature and velocities results of these simulations are compared and the locations and values of the hot-spots are determined.



CONCLUSIONS

- Regardless of the type of meshing, a greater number of elements creates greater meshing quality.
- A higher meshing quality regardless of the type of meshing, generates higher maximum temperatures across the geometry
- The case that generates a better quality of meshing is the third, hexahedral mapped and sweep.
- The location of the hot-spot of the paper will depend on the type of meshing and its level.

BIBLIOGRAPHY

- Mufuta. (2000). Modelling of the mixed convection in the windings of a disc power transformer.
- Jesús Fraile Mora. (2003). Máquinas eléctricas (5^o ed.). Madrid: Mc Graw Hill.
- Theodore Wildi. (2007). Máquinas eléctricas y sistemas de potencia. México: Pearson.
- F. Torriano, M. Chaaban, P.Picher. (2010). Numerical study of parameters affecting the temperatura distribution in a disc-type transformer winding. *Applied Thermal Engineering*. 30, 2034-2044
- F. Torriano, P. Picher, M. Chaaban (2012). Numerical investigation of 3D flow and thermal effects in a disc-type transformer winding. *Applied Thermal Engineering*. 40, 121-131
- Skillen, A. Revell, H. Iacovides, W. Wu. (2012). Numerical prediction of local hot-spot phenomena in transformer windings, *Applied Thermal Engineering*, 36, 96-105
- Fofana. (2013). 50 years in the development of insulating liquids. 29(5), 13-25.
- Lecuna, F. Delgado, P. Castro, A. Ortiz, I. Fernández and C. J. Renedo, "Thermal-fluid Characterization of Alternative Liquids of Power Transformers: a Numerical Approach," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10/2015. 2015.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	6
2. ESTADO DEL ARTE	9
3. EL TRANSFORMADOR.....	12
3.1 DEFINICIÓN	12
3.2 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS	12
3.2.1 Geometría de un transformador tipo disco	15
3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	16
3.4 PÉRDIDAS EN UN TRANSFORMADOR	16
3.4.1 Rendimiento de un transformador	17
3.5 CALENTAMIENTO DEL TRANSFORMADOR	18
3.6 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS PÉRDIDAS.....	20
4. REFRIGERACIÓN DE UN TRANSFORMADOR	22
4.1 INTRODUCCIÓN.....	22
4.2 DISTINTOS MÉTODOS DE REFRIGERACIÓN.....	22
4.3 NOMENCLATURA DE LOS TIPOS DE REFRIGERACIÓN	25
4.4 CONSERVACIÓN DEL ACEITE EN EL TRANSFORMADOR.....	27
4.4.1. Diseño de la cuba.....	28
4.4.2 Relé de Buchholz	29
5. EL ACEITE	31
5.1 INTRODUCCIÓN.....	31
5.2 HISTORIA DE LOS LÍQUIDOS REFRIGERANTES	32
5.3 MANIPULACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL ACEITE	32
5.4 ENSAYOS REALIZADOS EN EL CONTROL DEL ACEITE	33
5.4.1 Revisión inicial	33
5.4.2 Tensión de ruptura con corriente alterna.....	33
5.4.3 Valor de neutralización.....	34

5.4.4	Factor de pérdidas dieléctricas y/o resistividad en cortocircuito.....	34
5.4.5	Tensión superficial	34
5.4.6	Análisis de gases en el aceite y contenido de furfuraldehido	35
5.5	FRECUENCIAS DE LAS PRUEBAS DEL ACEITE	36
5.6	REQUISITOS DE LOS ACEITES EN SERVICIO	37
5.6.1	Compatibilidad	37
5.6.2	Viscosidad	37
5.7	NORMATIVA INTERNACIONAL APLICABLE AL ACEITE MINERAL	39
6.	MODELO DE SIMULACIÓN.....	41
6.1	INTRODUCCIÓN.....	41
6.2	DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA.....	41
6.3	SIMPLIFICACIONES DEL MODELO GEOMÉTRICO	46
6.4	PRINCIPIOS FÍSICOS DEL MODELO GEOMÉTRICO	48
6.4.1	Modelo físico-matemático	49
6.4.2	Condiciones de contorno.....	50
6.4.3	Modelo numérico.....	51
6.4.3.1	Caso especial de un transformador sin papel	52
6.5	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES	53
6.5.1	Densidad	54
6.5.2	Conductividad térmica.....	54
6.5.3	Calor específico.....	55
6.5.4	Viscosidad cinemática.....	56
6.6	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES SÓLIDOS	57
6.7	VALORES INICIALES CALCULADOS	57
7.	COMSOL MULTIPHYSICS	59
7.1	INTRODUCCIÓN.....	59
7.2	MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	59

7.3 EL PROGRAMA: COMSOL MULTIPHYSICS.....	60
7.4 PROCEDIMIENTO GENERAL DE CÁLCULO.....	62
7.5 OBTENCIÓN DE LAS PIEZAS DE LA GEOMETRÍA	64
7.5.1 Discos de cobre.....	65
7.5.2 Papel aislante.....	65
7.5.3 Fluido	66
7.6 ENSAMBLAJE DE LA GEOMETRÍA	70
7.7 OBTENCIÓN DEL MODELO FÍSICO	71
8. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	77
8.1 INTRODUCCIÓN	77
8.2 MALLADO.....	77
8.2.1 Triangular libre y tetraédrico libre	78
8.2.2 Cuadrático libre y tetraédrico libre.....	83
8.2.3 Mapeado y barrido	88
8.2.4 Resultados	92
8.2.5 Resolvedor utilizado en la simulación en función del mallado.....	93
8.3 CALIDAD DEL MALLADO	93
8.4 RESULTADOS TÉRMICOS.....	98
8.4.1 Introducción.....	98
8.4.2 Malla triangular libre, tetraédrico libre	99
8.4.3 Malla cuadrática libre, tetraédrico libre.....	105
8.4.4 Mapeado y barrido	111
8.5 RESULTADOS DE VELOCIDADES	118
8.5.1 Introducción.....	118
8.5.2 Malla triangular libre, tetraédrico libre	118
8.5.2 Malla cuadrático libre, tetraédrico libre.....	122
8.5.3 Mapeado y barrido	126

8.6 COMPARATIVA DE RESULTADOS.....	130
9. CONCLUSIONES.....	131
10. BIBLIOGRAFÍA	132

1. INTRODUCCIÓN

El transformador es uno de los dispositivos eléctricos más importantes en el desarrollo de la industria eléctrica, ya que hicieron posible realizar de manera práctica y económica la transmisión de energía eléctrica salvando grandes distancias para hacer llegar la misma de manera segura a fábricas y hogares que la consumen.

Un transformador es una máquina eléctrica estática de corriente alterna que permite variar alguna función de la corriente como son la tensión o la intensidad, manteniendo invariables la frecuencia y potencia en el caso del transformador ideal, mientras que en los transformadores reales se perderá potencia en forma de pérdidas magnéticas y eléctricas. Además puede aislar circuitos entre sí e incrementar o disminuir el valor aparente de un resistor, inductor o capacitor. Esta máquina está basada en las leyes de la inducción electromagnética, ya que transforma la electricidad que le llega al devanado de entrada o devanado primario en magnetismo para volver a transformarla en electricidad en el devanado secundario. Los transformadores son un componente esencial de las redes de potencia y se invierten grandes esfuerzos en tratar de mejorar la eficiencia y la esperanza de vida de sus dispositivos.

En un transformador, como en cualquier otro tipo de máquina eléctrica, existen una serie de pérdidas que se transforman en calor por efecto Joule y que contribuyen al calentamiento de la máquina. Para evitar que se consigan altas temperaturas que puedan afectar a la vida de los aislamientos de los devanados y al funcionamiento óptimo del transformador, es preciso dotar al transformador de un sistema de refrigeración adecuado. Para potencias pequeñas, la superficie externa de la máquina es suficiente para lograr la evacuación de calor necesaria (método indirecto), lo que da lugar a los transformadores llamados en seco. Para potencias elevadas se emplea como medio refrigerante el aceite, resultando los transformadores en baño de aceite.

El aceite tiene una doble misión de refrigerante y aislante, ya que posee una capacidad térmica y una rigidez dieléctrica superior a la del aire. En estos transformadores, la parte activa se introduce en una cuba de aceite mineral,

cuyo aspecto externo puede tener forma plana, ondulada, con tubos o con radiadores adosados, realizándose la eliminación del calor por radiación y convección natural. El aceite mineral empleado procede de un subproducto de la destilación fraccionada del petróleo. Tiene un aspecto transparente e incoloro y está compuesto de alcanos y parafina cíclica. Tiene un precio relativo bajo, es producido en grandes cantidades y es usado en los transformadores por sus propiedades eléctricas y refrigerantes.

En este proyecto se realizará un estudio y simulación sobre la influencia del mallado escogido sobre los dos primeros discos del paso de entrada de un transformador de transmisión y detallaremos la distribución de temperaturas de la totalidad del mismo y de las velocidades del fluido refrigerante. Así, podremos observar por medio de la simulación datos importantes para conocer el funcionamiento del transformador en lo referente a las temperaturas y de ese modo, poder prever cuáles serán los puntos críticos de alta temperatura donde existe el riesgo de un fallo del aislante que provocaría la disfuncionalidad del transformador.

Para la realización del estudio se aplicará el uso de técnicas computacionales en sustitución de las pruebas y mediciones empíricas y de los métodos analíticos utilizados tradicionalmente para predecir la distribución de temperaturas en los componentes de los transformadores y determinar el valor del punto caliente, ya que estos métodos presentan distintas limitaciones. La llegada de recursos computacionales de mayor potencia ha permitido a investigadores e ingenieros realizar simulaciones numéricas más detalladas del comportamiento térmico de los transformadores de potencia. El tipo de técnicas computacionales a utilizar estarán basados en la técnica de elementos finitos y en las técnicas numéricas de las que disponemos para el análisis. Estas últimas son la dinámica de fluidos computacional (CFD) y el modelo de redes termo-hidráulicas (THNM). La primera de ellas tiene base en el planteamiento y resolución de las ecuaciones de gobierno del sistema (Navier-Stokes), determinadas por el principio de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía en el flujo de un fluido. Además, a partir de las simulaciones CFD es posible caracterizar con gran detalle los campos de

presión, velocidad y temperatura en cualquier lugar dentro del dominio computacional, permitiendo un entendimiento más completo del fenómeno fluido-térmico que ocurre en el transformador. Por otro lado, la técnica THNM tiene su principio de operación en la elaboración de redes de intercambiadores de calor con los elementos constituyentes del transformador. Como diferencias sustanciales entre ambas técnicas, es apreciable el menor número de ecuación a resolver en el caso de la técnica THNM debido a la diferencia de dependencia en un caso y otro. En el caso CFD, el número de ecuaciones viene dado por el número de elementos de malla, mientras que en el segundo caso, ese número de ecuaciones depende de los conductores y conductos del fluido. En este estudio, la elección de operación ha sido la técnica CFD por la precisión en el resultado en geometrías relativamente simples, por encima del consumo computacional.

2. ESTADO DEL ARTE

La gran mayoría de estudios por CFD de transformadores de potencia que han sido llevados a cabo anteriormente son bidimensionales (axisimétricos) con la correspondiente reducción en el número de nodos de mallado requeridos para discretizar el dominio reduciendo el tiempo de computación. Por ejemplo, El Wakil [1] desarrolló una simulación 2D de un transformador reductor que incluía el núcleo y los devanados primario y secundario usando un código comercial de volumen finito. Kranenborg [2] realizó una simulación 2D de un devanado de transformador tipo disco para investigar el efecto del modo de enfriamiento en las distribuciones de flujo y temperaturas. En otro artículo, Mufata y Van der Bulck [3] presentaron los resultados 2D del patrón de flujo en función de los números de Reynolds y de Grashof así como de algunos parámetros geométricos. Recientemente, Lee [4] llevo a cabo un estudio donde, a partir de simulaciones 2D, determinó correlaciones para la transferencia de calor en un devanado de transformador tipo disco tanto con refrigeración por aceite mineral como por aire, ambas con convección natural. Skillen [5] llevó a cabo un cálculo CFD axisimétrico para un devanado de disco completo, de cinco pasos, donde encontró una fuerte relación entre el flujo en los diferentes pasos y las venas calientes persistentes que son conducidas de un paso al siguiente. Gastelurrutia [6] realizó un estudio comparativo de las soluciones obtenidas en un estudio CFD sobre un modelo 3D completo y un modelo 2D de un transformador de distribución tipo capa. Sus resultados muestran que estas dos aproximaciones numéricas ofrecen un patrón de flujo de aceite similar tanto en el tanque como en las aletas de los radiadores. Revisando ese proceso exhaustivamente sobre las simulaciones numéricas del flujo, transferencia de calor y los fenómenos electromagnéticos en transformadores es proporcionada por Smolka [7]. Además, estos últimos autores presentan junto con esto los resultados de una simulación térmica y electromagnética sobre un modelo 3D de un transformador tipo seco, concordando los resultados de manera importante con los datos experimentales.

En un artículo publicado en 2010, Torriano publica un artículo llamado “Estudio numérico de los parámetros que afectan a la distribución de temperaturas en el

devanado de un transformador tipo disco” (Numerical study of parameters affecting the temperature distribution in a disc-type transformer winding). En el mismo, Torriano pretende investigar el efecto del modelo numérico, del ratio de flujo másico y las condiciones de contorno internas en el flujo y la distribución de temperaturas en un devanado del transformador tipo disco. Para ello usa el método CFD antes comentado. Así pues, al obtener los resultados del estudio comprueba que los resultados hallados con los modelos simplificados difieren de manera significativa de aquellos estudios anteriores con modelos de transferencia de calor conjugada que sin embargo consideraban los discos del transformador formados únicamente por el conductor de cobre. Además observa que los perfiles de temperaturas uniformes y no uniformes dados en el interior del devanado son parámetros que influyen en la predicción del valor de la temperatura en el punto caliente. Por otro lado, puede concluir en que un alto régimen de flujo proporciona en el devanado una mayor eficiencia de enfriamiento al provocar una distribución de temperaturas más uniforme y reducir el factor del punto caliente.

En su publicación del año 2012, Skillen aplica de la misma manera un método CFD para predecir el flujo de convección mixta en la refrigeración del devanado de baja tensión de un transformador. Estos flujos estudiados tienen en sus fluidos refrigerantes dieléctricos un alto número de Prandtl. Con el método utilizado, Skillen predijo la presencia de zonas de acumulación de aceite caliente en algunos de los conductos horizontales por los que circula el líquido. Estas acumulaciones son particularmente problemáticas ya que el calor local puede causar una degradación térmica del papel. Además se demuestra así que hay una clara relación entre el flujo en sus distintas fases, que están comunicadas de manera persistente por líneas calientes en el fluido, siendo convectivas desde un paso al siguiente.

La importancia de estas líneas de fluido caliente es evidente en los resultados CFD. En los modelos de red utilizados por la industria estas líneas están irresolutas, debido a que la cantidad de flujo que recorre los conductos refrigerantes es asumida como homogénea y perfectamente mezclada. En particular, estos métodos no disponen de la capacidad de enumerar la

persistencia de esas características heterogéneas desde un paso al siguiente. Si bien se espera que las aproximaciones del método CFD estén provistas de un mayor detalle que el modelo de redes, la comprensión de las simulaciones actuales sugiere cambios significativos en los enfoques industriales actuales, y podrían ser necesarios con el fin de contabilizar correctamente los fenómenos observados.

En el año 2012 los autores Torriano, Picher y Chaaban publicaron un artículo llamado “Numerical investigation of 3D flow and thermal effects in a disc-type transformer winding”. En este artículo, los autores tratan una investigación numérica de flujos tridimensionales y efectos térmicos en los devanados de un transformador tipo disco. Los aspectos constructivos del transformador son los mismos que en el artículo publicado en 2010, usando también el mismo aceite mineral para su refrigeración. El estudio consiste en la simulación de una sección transversal del transformador usando un código comercial de CFD. Se realizan dos tipos de simulaciones, una en 2D y otra en 3D utilizando como modelo un sector de 20° del transformador debido a la simetría del mismo, con el fin de observar diferencias entre un modelo y otro. Una vez realizadas las simulaciones se observa que para un flujo másico de entrada equivalente, las distribuciones de temperaturas y velocidades en uno y otro modelo es muy diferente, obteniéndose temperaturas máximas diferentes situadas en puntos diferentes. Esto se debe principalmente a la existencia de elementos adicionales del transformador que no son contemplados en la geometría 2D, tales como sticks y spacers, lo que hace que el flujo no pueda ser considerado axil-simétrico.

3. EL TRANSFORMADOR

3.1 DEFINICIÓN

El transformador es un dispositivo eléctrico, estático, destinado a funcionar con corriente alterna, constituido por dos arrollamientos llamados primario y secundario que, por medio de la inducción electromagnética, permiten transformar la energía eléctrica de un sistema de tensión-corriente en otro sistema de diferente magnitud e igual frecuencia sin la necesidad de un contacto eléctrico entre ambos. Los transformadores han permitido el desarrollo de la utilización del transporte de energía a grandes distancias, ya que permiten reducir la sección de los conductores para su transporte al elevar la tensión y tener un rendimiento cercano al 100%.

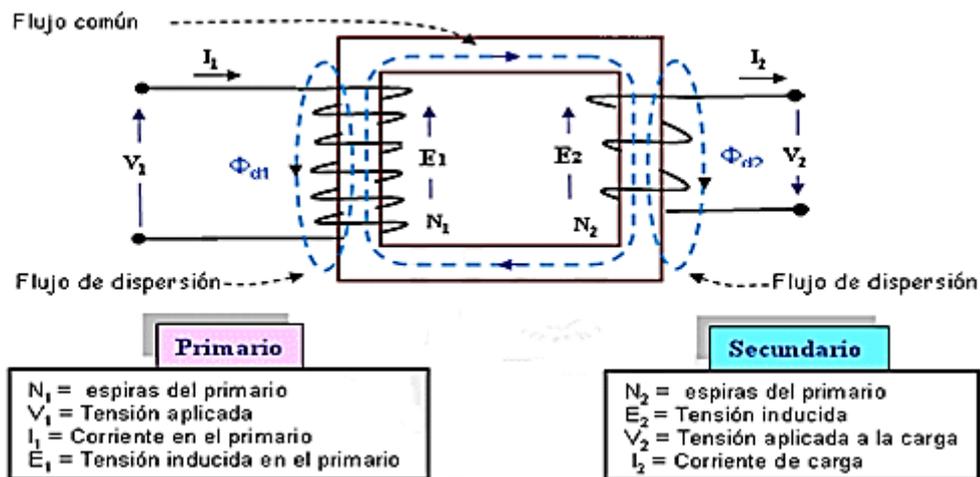


Figura 3.1 Transformador monofásico

3.2 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

Un transformador básico se compone de dos conductores arrollados sobre un núcleo ferromagnético. Cada uno de los arrollamientos supone la entrada y la salida del transformador y se conocen como devanados. Las partes principales que componen un transformador son: núcleo, devanados, sistema de refrigeración y aisladores pasantes de salida.

El núcleo constituye el circuito magnético del transformador. Está construido a base de chapas de acero al silicio sometidas a un tratamiento químico especial, denominado carlite, que las recubre de una capa aislante muy delgada para reducir en gran medida las pérdidas en el hierro. El circuito magnético está formado por las columnas, aquellas partes donde se montan los devanados, y las culatas que son las partes que realizan la unión entre columnas. Los espacios entre columnas y culatas, por los cuales pasan los devanados, se denominan ventanas del núcleo.

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

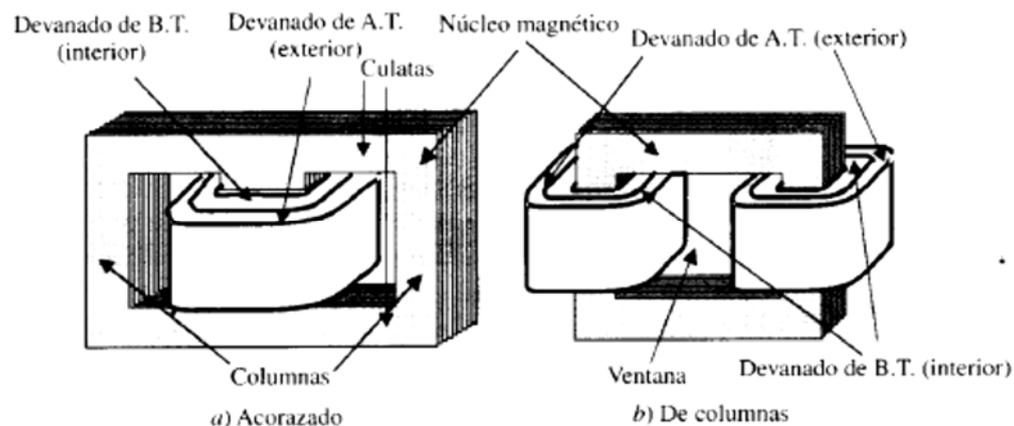


Figura 3.2 Tipos de transformador

Otro aspecto característico de los núcleos es la sección transversal de las columnas. En transformadores pequeños las columnas tienen sección cuadrada o rectangular, mientras que en el caso de transformadores de mayor potencia la sección transversal tiene forma de polígono escalonado para un mejor aprovechamiento del espacio, siendo el número de escalones mayor en transformadores de mayor potencia, denominándose sección de tipo cruciforme.

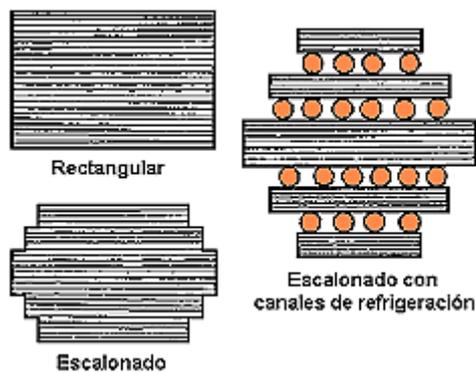


Figura 3.3 Sección transversal de los núcleos

Los devanados constituyen el circuito eléctrico del transformador. Se realizan por medio de conductores de cobre, en forma de hilos redondos para diámetros pequeños o sección rectangular (pletinas) para secciones mayores. Los conductores están recubiertos por una capa aislante que puede ser barniz en pequeños transformadores y en el caso de pletinas puede ser una o varias capas de fibra de algodón o cinta de papel.

Según sea la disposición relativa entre los arrollamientos de alta y baja tensión, los devanados pueden ser concéntricos o alternados. En los devanados concéntricos los arrollamientos tienen forma de cilindros coaxiales, colocando el devanado de baja tensión en la posición interior, ya que es más fácil de aislar que el de alta tensión y entre ellos se intercala un cilindro aislante de cartón o papel baquelizado.

En los devanados alternados los arrollamientos se subdividen en secciones de tal forma que las partes de los devanados de alta y baja tensión se suceden alternativamente a lo largo de la columna. Para disminuir el flujo de dispersión, es frecuente que en cada extremo se coloque media bobina, que por razones obvias de aislamiento pertenecen al devanado de baja tensión.

Tanto el núcleo como los devanados se introducen en una cuba, en la cual van sumergidos en un líquido refrigerante, habitualmente aceite, y que tiene como objetivo la refrigeración y aislamiento del mismo, que se tratará en capítulos posteriores.

La cuba debe de tener unas condiciones de diseño tales como cerrar herméticamente, soportar el vacío absoluto sin presentar deformaciones, proteger, ofrecer puntos de apoyo para el transporte y la carga del mismo, soportar los enfriadores, bombas de aceite, ventiladores y otros accesorios.

Los bornes de los transformadores se llevan al exterior de la cuba mediante unos pasantes de porcelana, rellenos de aire o aceite. Cuando se utilizan altas tensiones aparece un fuerte campo eléctrico entre el conductor terminal y el borde del orificio en la tapa superior de la cuba, y para evitar perforaciones, éste se realiza con una serie de cilindros que rodean el borne metálico dentro del espacio cerrado que contiene el aceite. Se pueden distinguir los pasantes de alta y baja tensión por su altura, siendo más altos cuanto mayor es la tensión.

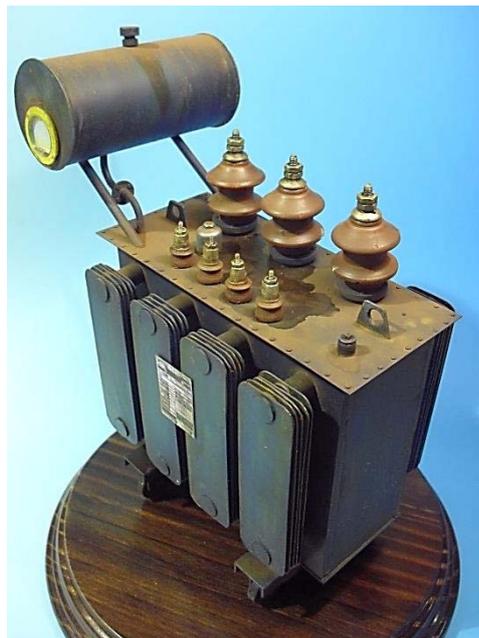


Figura 3.4 Aisladores de un transformador

3.2.1 Geometría de un transformador tipo disco

En capítulos posteriores se analizará un transformador trifásico de tipo disco y por ello es conveniente tener unas nociones básicas de su geometría. En este tipo de transformador, los devanados se colocan en una disposición concéntrica y en posición vertical, situándose el devanado de baja tensión en la posición interior. El núcleo y devanados tienen forma cilíndrica y se encuentran

en una cuba inmersos en un líquido refrigerante, generalmente aceite mineral, que es bombeado desde la parte inferior hasta la parte superior por los canales verticales del mismo.

3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Su funcionamiento se basa en las leyes de inducción electromagnética. Al aplicar una tensión alterna al primario, circulará por él una corriente alterna que producirá a su vez un flujo alterno en el núcleo. Debido a la variación periódica de este flujo se crean fuerzas electromotrices inducidas en los devanados de acuerdo con la ley de Faraday y en oposición al cambio de flujo de acuerdo con la ley de Lenz. Esta fuerza electromotriz es proporcional a la variación instantánea del flujo y al número de vueltas del devanado, dando lugar a dos fuerzas electromotrices distintas en el primario y secundario cuya relación es igual a la relación de vueltas de los devanados dado que el flujo en ambos devanados es el mismo.

Al conectar una carga al secundario del transformador, aparecerá una corriente en el secundario que generará una fuerza magnetomotriz que tendería a cambiar el flujo. Dado que la tensión en el transformador no cambia, a menos que se cambie la fuente, el flujo no puede cambiar, con lo que debe aparecer una fuerza magnetomotriz igual y opuesta en el devanado primario, lo que supone la aparición de una corriente en el primario. Si se establece la relación entre las tensiones y corrientes del primario y secundario se obtiene la relación de transformación.

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

Si se analiza la potencia en los devanados se observa que el producto tensión por corriente es constante, con lo que se deduce que idealmente el transformador no consume potencia.

3.4 PÉRDIDAS EN UN TRANSFORMADOR

El transformador, como cualquier máquina eléctrica, experimenta pérdidas que pueden ser pérdidas en el cobre, pérdidas en el hierro y pérdidas parásitas

producidas por corrientes inducidas en el tanque o contenedor y en los soportes metálicos por flujos de dispersión en el primario y el secundario.

Las pérdidas en el cobre vienen dadas por efecto de la resistividad del mismo (efecto Joule) y son proporcionales a la resistencia del conductor y al cuadrado de la intensidad que transportas.

Las pérdidas en el hierro se dividen en pérdidas por corrientes parásitas o corrientes de Foucault y pérdidas por histéresis. Las pérdidas por corrientes parásitas se deben a la inducción de corriente eléctrica en el núcleo donde se disipan en calor. Para reducir este efecto el núcleo del transformador no ha de ser macizo sino que ha de estar compuesto por finas láminas aisladas eléctricamente unas de otras, de tal forma que disminuya la corriente inducida en el núcleo y las pérdidas por este efecto. Las pérdidas por histéresis se producen debido a la histéresis que presentan los núcleos ferromagnéticos y dependen del material, la frecuencia y la inducción máxima a la que son sometidos.

Las pérdidas por corrientes inducidas son de la misma naturaleza que las pérdidas por corrientes parásitas solo que de valor mucho menor.

Además si en el transformador hay elementos auxiliares en funcionamiento, tales como ventiladores o bombas, hay que tener en cuenta las pérdidas producidas por estos sistemas.

3.4.1 Rendimiento de un transformador

Como en cualquier máquina eléctrica el rendimiento es el cociente entre la potencia útil o potencia en el secundario y la potencia total o de entrada en el primario, aunque también se puede expresar en función de la potencia perdida siendo el cociente entre la potencia del secundario y la suma de la potencia en el secundario más la potencia perdida.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_p}$$

Pese a la existencia de pérdidas eléctricas, los transformadores de potencia son dispositivos muy eficientes, con rendimientos superiores al 99%, con lo que las pérdidas suponen entre un 0,5% y un 1% de la potencia aparente nominal.

El rendimiento de un transformador es prácticamente constante, pero disminuye ligeramente al aumentar la carga, ya que las pérdidas eléctricas aumentan mientras que las pérdidas magnéticas se mantienen constantes.



Figura 3.5 Eficiencia de un transformador

3.5 CALENTAMIENTO DEL TRANSFORMADOR

Las pérdidas en el transformador aparecen en forma de calor y producen un incremento de la temperatura y una disminución de la eficiencia. El calor producido en los devanados y el núcleo se disipa hacia el exterior mediante mecanismos de convección y radiación.

Tras la conexión de la máquina, se produce un incremento progresivo de la temperatura y generación de calor hasta alcanzar las condiciones de servicio, en las cuales la temperatura permanece constante. Esta temperatura determina el diseño de la máquina así como la selección de materiales aislantes para conseguir las mejores condiciones de funcionamiento. El aislamiento más

utilizado consiste en un material poroso de celulosa impregnado con líquido aislante.

La elevación de la temperatura por encima de las condiciones de servicio da lugar a una aceleración de la degradación de los materiales aislantes y del acortamiento de su vida útil. Como regla orientativa, la vida de un aislante se acorta a la mitad o se alarga al doble con una variación de 10°C por encima o por debajo de la temperatura de servicio respectivamente.

Además el calor producido por las pérdidas marca la capacidad del transformador. Por una parte las pérdidas magnéticas dependen de la tensión aplicada. Por otra parte, las pérdidas en el cobre dependen de la corriente que transportan. Por consiguiente, para mantener la temperatura del transformador a niveles aceptables se han de establecer límites tanto en tensión como en corriente, denominados tensión y corriente nominal. La capacidad de potencia del transformador viene dada por el producto de la tensión nominal con la corriente nominal, siendo la potencia nominal expresada en términos de potencia aparente.

Por todo esto y a modo de conclusión, se considera la refrigeración como un elemento fundamental del diseño de transformadores. La eficiencia y calidad de la refrigeración determinará de forma directa la vida esperada del transformador, su rendimiento, y posibles pérdidas así como peligros en su uso.

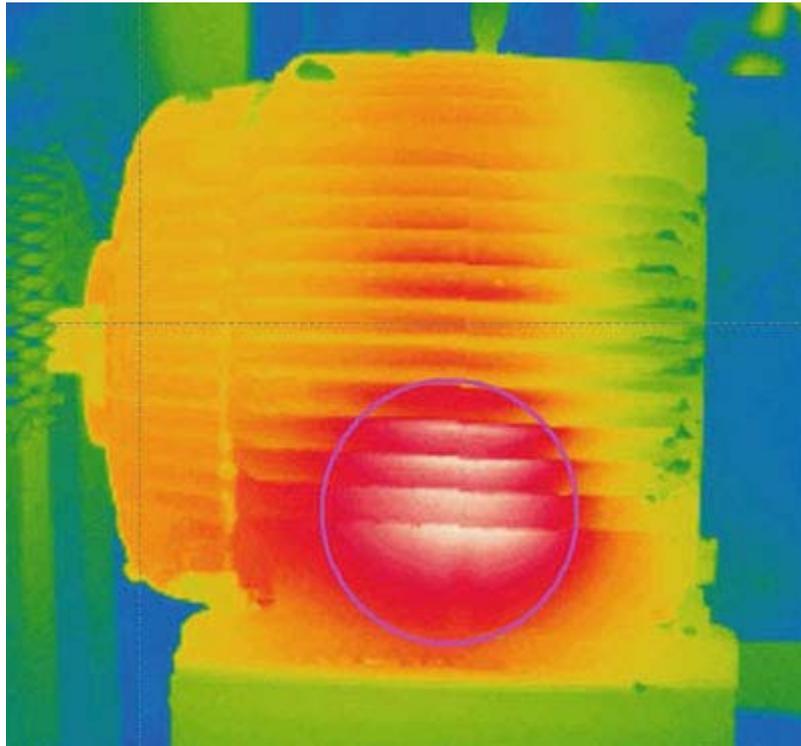


Figura 3.6 Sobrecalentamiento en un transformador

3.6 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS PÉRDIDAS

Las pérdidas en los transformadores representan potencia que no puede ser entregada al cliente y por tanto se pueden cuantificar en dinero perdido por la empresa suministradora de energía. Una mejora en la eficiencia del transformador por lo general supone un aumento del coste del mismo. Dependiendo de la aplicación, puede ser interesante, en términos económicos, optar por un transformador de alta o de baja eficiencia.

Habitualmente, este análisis económico es llevado a cabo mediante estudios que tratan de asignar un valor monetario a las pérdidas del transformador para calcular el coste total de propiedad y explotación.

Normalmente cada uno de los parámetros individuales de pérdidas de un transformador lleva asociado un coeficiente que indica el valor monetario por kW. En base a estos estudios se pueden comparar los valores obtenidos con las alternativas ofrecidas por los diferentes fabricantes o determinar el

momento óptimo para la renovación de un transformador que se considera improductivo por la evaluación económica de sus pérdidas.

4. REFRIGERACIÓN DE UN TRANSFORMADOR

4.1 INTRODUCCIÓN

Los transformadores acostumbran a disponer de un sistema o método de refrigeración para así obtener unas condiciones óptimas de funcionamiento.

4.2 DISTINTOS MÉTODOS DE REFRIGERACIÓN

Existen diferentes métodos de refrigeración de transformadores, los cuales suelen ser más complejos, eficaces, pero a su vez costosos a medida que aumenta la potencia nominal de los mismos.

Así, los transformadores pueden ser refrigerados por aire, en la denominada refrigeración en seco o por aceite, siendo esta conocida como refrigeración por baño de aceite. El sistema elegido para cada transformador deber garantizar que la temperatura de operación alcanzada sea la adecuada para así conseguir que los componentes que forman el transformador, en particular los aislantes, tengan una vida útil óptima.

En el caso de máquinas de pequeñas potencias nominales, la superficie externa del transformador es de un área lo suficientemente extensa para evacuar el calor necesario del interior, siendo este un transformador en seco. Este tipo de transformadores disponen de una rejilla de ventilación en la cuba en la que están protegidos para que fluyan corrientes de convección sobre las superficies de los devanados y el núcleo. Cuando hablamos de potencias mayores, estos mismos ventiladores requerirán de un sistema que consiga una circulación de aire forzada. Estos ventiladores son utilizados en interiores, protegidos de zonas hostiles.



Figura 4.1 Transformador con refrigeración tipo seco

Los transformadores de distribución de pequeña potencia, sin embargo, están en mayor parte sumergidos en aceite mineral, encerrados en un tanque de acero. El aceite absorbe el calor dentro del tanque y lo disipa por radiación y convección al aire exterior. Debido a la mejor capacidad de aislamiento del aceite sobre el aire, este se utiliza en transformadores de alta tensión por mayor seguridad. Conforme aumenta la potencia nominal del transformador, se agregan radiadores o aletas externos cuya función es aumentar la superficie de contacto de la cuba llena de aceite con el exterior. El aceite circula entre las partes del transformador recogiendo el calor que estas producen y pasa a través de los radiadores, lugar donde el calor es transferido al aire que rodea la cuba. Para mayores potencias se utilizan ventiladores que soplan aire sobre los radiadores, aumentando así la diferencia de temperaturas entre el aire circundante y el aceite que está en los radiadores.



Figura 4.2 Transformador con refrigeración tipo bañado en aceite

Algunos transformadores refrigerados por aceite tienen un depósito de expansión, dispositivo de seguridad que se utiliza en casos donde el calor puede provocar un significativo aumento del volumen del aceite, lo que provocaría una sobrepresión dentro del transformador que podría dar lugar a deformaciones o roturas de la cuba contenedora, con el consecuente incidente tanto eléctrico como medioambiental, dado el poder nocivo para el medio ambiente del aceite mineral.

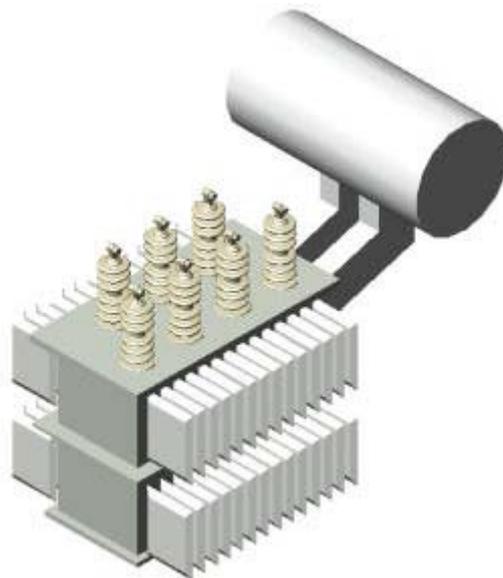


Figura 4.3 Transformador con refrigeración tipo bañado en aceite con depósito de expansión

En transformadores de alta potencia, el intercambio entre aceite y aire no es suficiente y se produce sobrecalentamiento del aceite, líquido inflamable. Por lo tanto, el intercambio se realiza con un intercambiador aceite-agua. El aceite caliente es bombeado desde la cuba hacia un intercambiador de calor donde es refrigerado con el contacto con agua fría. Un intercambiador es una manera muy efectiva de refrigeración, pero también es la más costosa al tener que refrigerar el agua por lo que solo se utiliza en casos de imperiosa necesidad.

4.3 NOMENCLATURA DE LOS TIPOS DE REFRIGERACIÓN

Un transformador viene definido por una serie de datos. Primeramente se indica el valor de su capacidad nominal, en segundo lugar se muestra las tensiones nominales de los devanados y junto con estos datos, se muestran unos caracteres alfabéticos que indican el sistema de refrigeración utilizado por el transformador. Esta serie que rige el sistema de refrigeración viene dada por la norma IEC 60076-2.

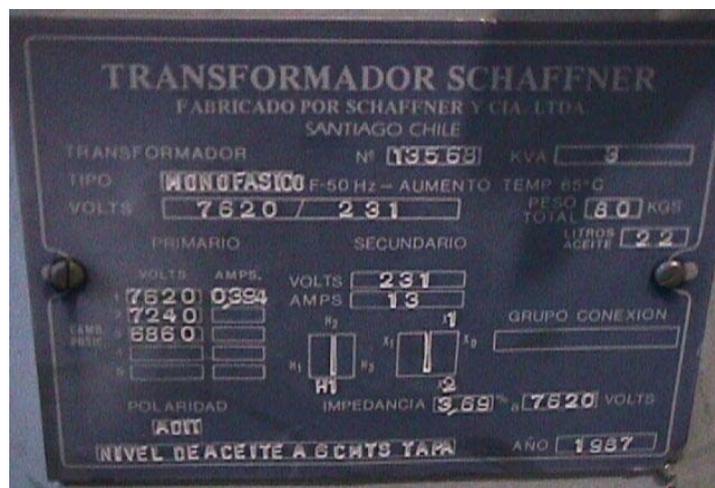


Figura 4.4 Placa de valores de un transformador

Esta norma indica que los transformadores bañados en aceite tienen su método de refrigeración indicado con un código de 4 letras descrito en las siguientes tablas.

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 4.1 Primera letra del código de refrigeración

La segunda letra indica el mecanismo de circulación del fluido refrigerante interno.

LETRA	SIGNIFICADO
N	Circulación natural a través de los sistemas de refrigeración y en los arrollamientos por termosifón
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 4.2 Significado de la segunda letra en el código de refrigeración

La tercera letra indica el medio de refrigeración externo.

LETRA	SIGNIFICADO
A	Aire
W	Agua

Tabla 4.3 Significado de la tercera letra en el código de refrigeración

La cuarta letra indica el tipo de circulación del medio refrigerante externo.

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

Tabla 4.4 Significado de la cuarta letra en el código de refrigeración

De esta manera, podemos definir el sistema de refrigeración utilizado en el estudio con el código ONAN/ONAF, lo que quiere decir que la refrigeración interna del mismo es realizada por un aceite mineral con circulación natural. El medio de refrigeración externo es aire, el cual puede funcionar tanto de manera natural como forzada por ventiladores.

4.4 CONSERVACIÓN DEL ACEITE EN EL TRANSFORMADOR

En los transformadores de grandes y medianas potencias, la generación de calor es importante por lo que se utiliza generalmente un líquido dieléctrico. El mantenimiento de las propiedades del líquido es un factor determinante en la vida del transformador, para así evitar posibles errores, accidentes y mal funcionamiento, producto de la pérdida de las funciones o propiedades del líquido debido a su deterioro.

Los transformadores de potencia utilizan un gran volumen de líquido refrigerante, por lo que si tenemos un deterioro prematuro, una sustitución del mismo o una parada del transformador, conllevará un elevado coste de mantenimiento que trataremos de evitar. Como además este aceite es nocivo para el medio ambiente, su eliminación debe regirse por las leyes medioambientales. Así pues, debe tenerse en cuenta su eliminación cuando sea necesaria su renovación por un nuevo líquido. Además, debemos tener en cuenta que una degradación del líquido y su consiguiente mal funcionamiento es una causa de potenciales accidentes como son incendios y explosiones en el transformador, algo grave tratándose del volumen del líquido en el caso tratado.



Figura 4.5 Avería en un transformador

El aceite mineral experimenta con el tiempo un envejecimiento y un deterioro de sus propiedades. En todos ellos, la elevación de temperatura, el contacto con el aire, la presencia de humedad y de oxígeno, causantes de la oxidación y de la formación de lodos, barro y otros subproductos que pueden alterar la composición original del aceite, causando eso una disminución de las propiedades aislantes y refrigerantes del aceite. Tenemos la posibilidad de utilizar varios métodos para preservar las propiedades del líquido del transformador y las estructuras aislantes por las que fluye. El más extendido de los métodos es un diseño óptimo de la cuba aunque existen otros métodos como el Relé Buchholz.

4.4.1. Diseño de la cuba

El método de diseño de la cuba es el método más extendido en la conservación del líquido refrigerante de los transformadores. Los diseños que más se ponen en práctica son los que siguen:

- Sistema de presión positiva: Este diseño de cuba conlleva el uso de unos gases inertes que mantienen dentro del transformador una presión positiva en el espacio de gas dentro del transformador. El gas inerte utilizado de forma habitual es nitrógeno comprimido, el cual es progresivamente inyectado en el lugar del gas cuando la presión interna se reduce y cae fuera de rango.
- Sistemas de tanque sellado: Este tipo de sistemas tiene un tanque interior completamente aislado y hermético de la atmósfera exterior, y mantienen un espacio o una capa de gas que se asienta sobre el refrigerante. El volumen total, suma de líquido y gas es constante. En este tipo de cubas se puede disponer de presiones internas negativas en cargas bajas o temperaturas y presiones positivas con carga e incrementos de temperatura.
- Sistemas con depósito de expansión: En estos casos, disponemos de un depósito auxiliar situado en la parte superior del transformador. Estos depósitos son usados tanto con o sin bolsa de aire. Si la poseen, proporcionan mayor separación de la atmósfera exterior. El tanque

principal del transformador tiene todo su volumen ocupado con líquido mientras que el tanque auxiliar solamente tiene líquido en su interior de forma parcial. Así pues, esto puede cambiar, aumentando o disminuyendo ese volumen de forma directamente proporcional a las expansiones y contracciones que puede sufrir el líquido al modificarse sus propiedades.

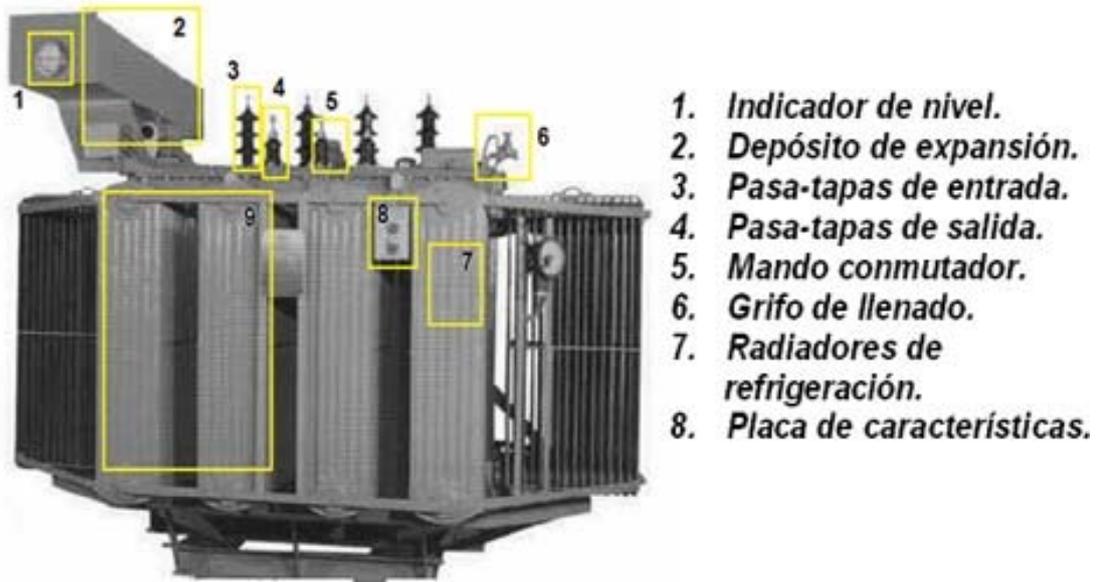


Figura 4.6 Partes de la cuba de un transformador de potencia

4.4.2 Relé de Buchholz

El relé de Buchholz es un dispositivo que forma parte de la protección principal en los transformadores en los que está dispuesto. Actúa por la detección de gases acumulados en su cámara, por una falta de aceite en la cuba del transformador o por el flujo de aceite provocado por descargas eléctricas internas o cortocircuitos que puedan producirse en el transformador. La protección de Buchholz protege el transformador contra los efectos que se pueden producir en el interior de la cuba. Este método está basado en que las irregularidades en el funcionamiento de los transformadores genera en los mismos calentamientos locales en los arrollamientos, lo que a su vez provoca gases dentro del aceite.

Esos gases que se pueden producir, ascienden por un conducto donde está instalado el relé de Buchholz. La caja donde está metido el mismo está llena de

aceite sobre el que flotan dos flotadores móviles. En el momento que por un defecto dentro del transformador se producen burbujas de gas que se elevan hasta el tanque de expansión y son captadas por el relé, se almacenan en la caja, por lo que el nivel de aceite baja de manera progresiva. Cuando la cantidad de gases llegan a un cierto nivel, el flotador de la parte superior se inclina, provocando el cierre en el contacto de un circuito de alarma. En el caso de ignorarse la alarma o por que se cause un defecto grave el gas se sigue acumulando hasta superar el nivel en el cual el flotador inferior se inclina cerrando un contacto que provoca la desconexión del transformador. En el caso de un deterioro de gran magnitud que produzca un arco eléctrico en el interior de la cuba, el flujo de aceite es tan violento que provoca el cierre de un contacto que causa la desconexión del transformador, evitando así una gran avería por sobrecarga. El relé detecta cortocircuitos entre espiras, arrollamientos y núcleo y entrearrollamientos, interrupción de una fase, sobrecargas excesivas, pérdidas de aceite y demás averías.

La gran ventaja que proporciona este relé es su elevada sensibilidad para advertir deterioros o fallos que se pueden producir de inmediato, cuando los sistemas de detección y protección más sensibles serían incapaces de detectarlos.

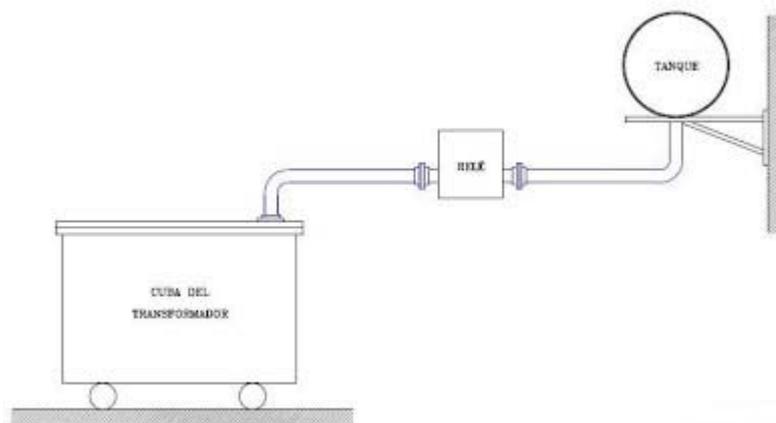


Figura 4.7 Posición de un relé Buchholz en un transformador

5. EL ACEITE

5.1 INTRODUCCIÓN

Un aceite mineral de un transformador se compone principalmente de carbono e hidrógeno en moléculas que presentan diferentes estructuras.

Los aceites parafínicos están formados por moléculas que pueden ser tanto de cadena lineal como ramificada. Los alcanos normales de tipo cadena lineal son conocidos como parafinas, si son enfriados se impide su libre flujo y se deben tomar precauciones para utilizarlos en un clima frío.

Los aceites nafténicos también conocidos como cicloalcanos están formados por moléculas con una estructura anular, presentan excelentes características a bajas temperaturas.

Todos los aceites de transformador contienen moléculas aromáticas con una estructura molecular totalmente distinta de las moléculas parafínicas y nafténicas, tanto química como físicamente.

Dentro de los transformadores se pueden producir una oxidación del aceite que se encuentra en la cuba del transformador. La oxidación del aceite se ve influenciada por dos parámetros principales: oxígeno y temperatura. Es de notar que todos los aceites contienen una pequeña cantidad de aire, incluso después de la desgasificación (entre un 0.05 y un 0.25% de oxígeno por volumen). Además, el calor provoca una aceleración en este deterioro. Los procesos de oxidación se producen por una actividad de descargas parciales en micro burbujas, las que generan ozono, elemento especialmente activo en los procesos de oxidación. El proceso de oxidación se inhibe con aditivos denominados antioxidantes.

Existen dos tipos de aceites en el mercado, inhibidos y no inhibidos. De hecho, todos los aceites son inhibidos, los inhibidos por la adición de fenol retardado (destrucción radical), y los no inhibidos con inhibidores naturales (destrucción por peróxido). La actividad de los antioxidantes dura un tiempo definido, llamado período de inducción, durante el cual previenen la formación de peróxidos con radicales libres.

5.2 HISTORIA DE LOS LÍQUIDOS REFRIGERANTES

Los primeros transformadores construidos eran de pequeña potencia y la refrigeración que necesitaban era simplemente el aire ambiental. A medida que la capacidad de potencia de los transformadores aumentaba, requerían de unas nuevas soluciones. La primera de las soluciones para conseguir una mejor refrigeración fue desde un principio la utilización de aceite mineral obtenido a partir de la destilación del petróleo. A pesar de su gran servicio, rápidamente se encontraron problemas en el uso de este líquido por su potencial peligro de ignición y explosión, ya que inicialmente no había consideraciones sobre la dificultad de su eliminación bajo el punto de vista medioambiental.

5.3 MANIPULACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL ACEITE

Es esencial destacar que durante el almacenamiento y manipulación pueden verse modificadas ciertas propiedades cruciales para las prestaciones del aceite. Debido a su fácil contaminación, es necesario evitar riesgos tomando precauciones en lo relativo al proceso de manipulación, para lo cual el personal que procede con el aceite debe estar debidamente capacitado.

El agua es el contaminante más usual en los aceites de un transformador durante la manipulación y almacenamiento por parte de los operarios. El aceite interactúa con el agua, reduciendo su tensión de ruptura eléctrica. Son extraídas al filtrarlas a través de filtros de partículas, los cuales forman parte de los filtros de desgasificación.

Cuando se cargan aceites de transformador para su suministro, se deben utilizar filtros especializados de un tamaño máximo de 5 micrómetros para que el mismo esté lo más limpio y puro posible. Además, durante el transporte, manipulación o llenado del transformador se puede provocar la introducción en el aceite de pequeñas cantidades de contaminantes químicos provenientes de otros productos utilizados anteriormente en el equipo usado en el nuevo transformador o por un error humano de los operarios.

Como el coste de un transformador es elevado, la supervisión de su funcionamiento a través del aceite resulta económica en comparación con los costes que ocasionaría una avería, que causaría la interrupción del suministro eléctrico, la reparación oportuna y en caso de ser necesaria, el vaciado y reemplazamiento de todo el líquido refrigerante del transformador.

Por lo tanto para la elección de un aceite, se debe asegurar una larga vida útil de servicio del aceite, preservando las propiedades requeridas del aceite por el equipo, teniendo en cuenta la tensión de servicio, el tipo de carga, las condiciones climáticas a las que está expuesto el transformador, etc.

Se debe destacar que el aceite refrigerante es un valioso generador de información acerca del estado del transformador en el que opera, ya que con los controles y análisis pertinentes del mismo, se pueden obtener indicaciones del estado de degradación del papel, presencia de puntos calientes, fallos eléctricos y demás potenciales peligros para el funcionamiento del equipo eléctrico.

Este muestreo debe ser realizado siguiendo unas estrictas recomendaciones, ya que de lo contrario los resultados de los análisis podrían llevar a conclusiones erróneas acerca del estado del equipo, por lo que es importante que en la toma de muestras se utilicen equipos limpios, secos y adecuados, tomando las recomendaciones de las normas existentes para su realización

5.4 ENSAYOS REALIZADOS EN EL CONTROL DEL ACEITE

5.4.1 Revisión inicial

El color y la apariencia externa del aceite, así como también el propio olor proporcionan una información rápida y valiosa in situ de posibles problemas en el interior del transformador.

5.4.2 Tensión de ruptura con corriente alterna

Este método nos permite evaluar la capacidad de un aceite de resistir el estrés eléctrico al que se puede ver sometido al producirse un fallo en el aislamiento de los devanados de un transformador.

Esta característica depende del contenido de agua y partículas encontradas en el aceite. Es una parte esencial del cuidado del equipo el control de la tensión de ruptura antes de poner en servicio un transformador nuevo, como así también para controlar el envejecimiento del aceite y el aislante de papel, debido a que durante este proceso se genera agua y partículas provenientes de la degradación del papel aislante.

La norma IEC 156 es la encargada de especificar este ensayo, donde son utilizados electrodos esféricos o semiesféricos a una distancia de 2.5 mm del aceite y además la modalidad de realización de la prueba, que consiste en incrementar la tensión de ensayo en pasos de 2 kV/s hasta que se produzca la descarga. Debido a la imposibilidad de repetición de la prueba, el resultado estimado se forma con una media de seis pruebas similares.

5.4.3 Valor de neutralización

Mediante este ensayo es posible indicar si en el aceite existe algún material ácido, ya que un valor alto o un incremento de los mismos señala el comienzo de la oxidación del aceite. Un valor alto de ácido provoca corrosión y la formación de jabones o saponificación, proceso que afecta sensiblemente a sus propiedades eléctricas.

5.4.4 Factor de pérdidas dieléctricas y/o resistividad en cortocircuito

Estas características son muy sensibles tanto a los productos contaminantes como al envejecimiento del propio aceite.

5.4.5 Tensión superficial

Este es un análisis muy sensible y capaz de ofrecer, combinado con la medición de $\tan \delta$, una pronta señal de alarma al iniciarse el deterioro del aceite. El aceite en servicio fuertemente deteriorado puede contar con valores de tensión superficial inferiores a 18 mN/m.

Los límites recomendados por la norma IEC 422 sobre ajuste de los valores que han de presentar los aceites minerales ya cargados en transformadores

nuevos se muestran en la tabla siguiente y se comparan con los requisitos de la IEC 296 que se refiere a aceites antes de ser cargados.

Propiedades	Gama del transformador			Requisitos IEC 296
	<72.5 kV	72.5-170 kV	>170 kV	
Contenido de agua (mg/kg) o (ppm)		15 máx.	10 máx.	30 máx. a granel
Tensión superficial (mN/m)	35 mín.	35 mín.	35 mín.	44 para el aceite nuevo
Tan δ a 90°C	0.015 máx.	0.015 máx.	0.010 máx.	0.005 máx.
Resistividad a 90°C	60 mín.	60 mín.	60 mín.	
Tensión de ruptura (kV)	40 mín.	50 mín.	60 mín.	30 mín. antes del tratamiento. 50 mín. después del tratamiento.

Tabla 5.1 Límites marcados por la norma IEC 422 en los valores del aceite mineral

Es muy complicado que los aceites cumplan los requisitos de la tabla si no han sido desgasificados y filtrados. La técnica necesaria para ello consiste en calentar y tratar los aceites al vacío para originar la evaporación del agua, y filtrar el mismo a través de un filtro de partículas. Las partículas interactúan con el agua, reduciendo la tensión de ruptura eléctrica.

5.4.6 Análisis de gases en el aceite y contenido de furfuraldehído

Los eventos relativos al envejecimiento se van registrando en el aceite en forma de gases disueltos. Esa actividad de descargas parciales produce en su mayoría una cantidad de hidrógeno y metano. Los arcos de mayor energía producen cantidades importantes de acetileno.

Estas pruebas se realizan para evaluar el estado físico del transformador con respecto a factores como la producción de arcos, puntos calientes, y deterioro del papel, utilizando para ello equipos de análisis de cromatografía de líquidos y de gases.

La IEC 567 es una guía que incluye los métodos más eficaces y la IEC 599 es una guía para la interpretación de los análisis de los gases.

Los niveles de monóxido y dióxido de carbono en los análisis de gases en el aceite aportan una indicación del grado de deterioro del papel, pero se obtiene una señal más precisa y temprana sobre el estado del papel midiendo el contenido de furfuraldehidos del aceite.

Esto se realiza según la IEC 1198, en el que el umbral de detección de los furfuraldehidos es deliberadamente bajo.

5.5 FRECUENCIAS DE LAS PRUEBAS DEL ACEITE

Es complicado emitir recomendaciones de tipo general sobre la frecuencia con la que debe ser examinado un aceite de transformador en servicio, y el grado de deterioro que se puede permitir en el mismo antes de optar por una sustitución de él. Probablemente en equipos grandes de energía eléctrica el aceite sea examinado con mayor regularidad, mientras que para pequeños transformadores de distribución, mucho más baratos, se asumen mayores riesgos realizando menos controles y menos exhaustivos que en los primeros.

La valoración del riesgo tomado no se basa únicamente en el tamaño del transformador sino principalmente en el efecto que una avería en él puede ocasionar, generando sobre todo pérdidas económicas.

En la IEC 422 se agrupan ocho clases diferenciadas en función de la tensión de servicio y de la carga, con distintas recomendaciones sobre la frecuencia de seguimiento.

Es importante realizar un análisis de tendencia, como así también reunir experiencia acumulada con todo tipo de equipos bajo distintas condiciones de trabajo.

5.6 REQUISITOS DE LOS ACEITES EN SERVICIO

5.6.1 Compatibilidad

La compatibilidad entre los distintos aceites ha sido siempre un tema muy discutido. No obstante, cabe afirmar que los aceites que cumplen con la IEC 296 son miscibles entre sí.

5.6.2 Viscosidad

La viscosidad de un aceite es muy importante para la refrigeración del transformador: cuanto más baja es la viscosidad, mejor es la refrigeración.

Las propiedades del aceite a baja temperatura son importantes cuando el transformador está situado en climas fríos, por lo que las especificaciones para estos casos incorporan tanto el punto de fluidez como la viscosidad. En algunos lugares fríos, la conveniencia de especificar el punto de turbiedad es objeto de debate, ya que debiera ser igual o inferior al punto de fluidez para temperaturas que se sitúan por debajo de los -40°C , o incluso más bajas.

El modelo térmico adoptado por ANSI C57.92 “Guía de carga para transformadores de potencia inmersos en aceite mineral”, difiere del modelo adoptado por IREQ que incluye las variaciones de la viscosidad para temperaturas de incluso -40°C , y las variaciones de la carga térmica como resultado del cambio de resistividad del cobre y de las pérdidas adicionales de los devanados.

En la figura 5.1 se muestra la temperatura del punto caliente del aceite en función de la temperatura ambiente para distintos estados de carga

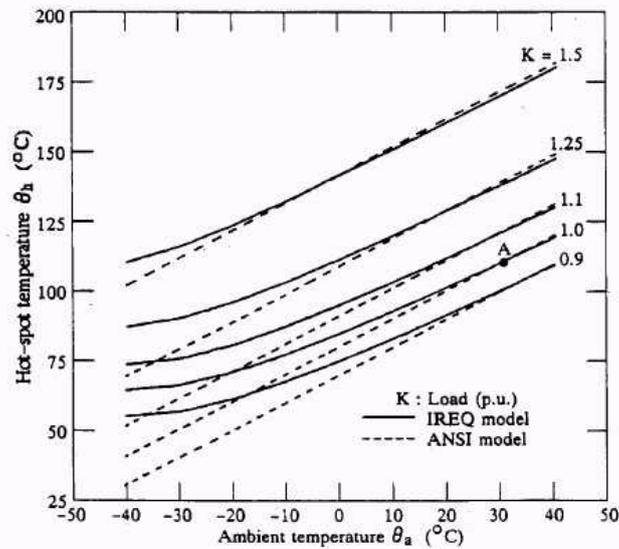


Figura 5.1 Temperatura del punto caliente respecto de la temperatura ambiente para distintos valores de carga

Las no linealidades que se pueden observar para el estado de régimen son más significativas para el estado transitorio, y se puede observar que las temperaturas de un transformador para una sobrecarga del 150% con una temperatura ambiente de -30°C aumentan con el tiempo

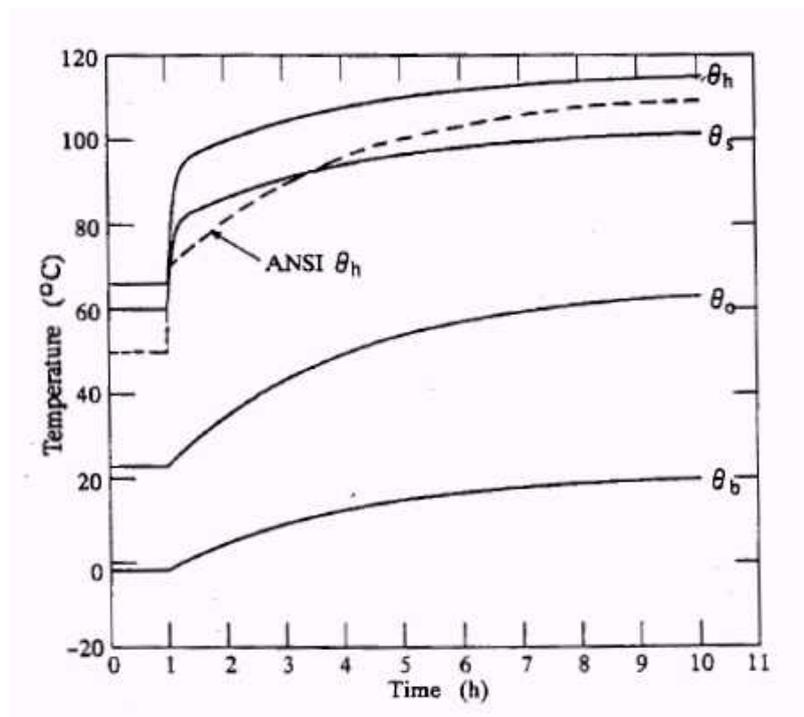


Figura 5.2 Relación entre la temperatura y el tiempo de trabajo

5.7 NORMATIVA INTERNACIONAL APLICABLE AL ACEITE MINERAL

En el último lugar de este capítulo, se muestra una revisión sobre la normativa internacional que afecta a los líquidos dieléctricos: clasificación, mantenimiento, pruebas de monitorización, etc. según los organismos IEC, IEEE y ASTM. En la tabla posterior se muestran las normativas a seguir.

Normas	Aceite mineral
IEC	61039 ed2.0 (2008) - "Classification of insulating liquids"
	60296 ed3.0(2003) - "Fluids for electrotechnical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear"
	60422 ed3.0 (2005) - "Mineral insulating oils in electrical equipment - Supervision and maintenance guidance"
	60599 ed2.1 Consol. with am1 (2007) - "Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis"
	61181 ed2.0 (2007) - "Mineral oil-filled electrical equipment - Application of dissolved gas analysis (DGA) to factory tests on electrical equipment"
IEEE	C57.106 (2006) - "Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment"
	C57.104 (2008) - "Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers"
	C57.140 (2006) - "Guide for Evaluation and reconditioning of Liquid Immersed Power Transformers"
ASTM	D3487 - 09 - "Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus"

<p>Normativa aplicable al aceite mineral</p>	<p>D117 - 10 - "Standard Guide for Sampling, Test Methods, and Specifications for Electrical Insulating Oils of Petroleum Origin"</p>
	<p>D3455 - 11 - "Standard Test Methods for Compatibility of Construction Material with Electrical Insulating Oil of Petroleum Origin"</p>
	<p>D3612 - 02 (2009) - "Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography"</p>

Tabla 5.2 Normativa aplicable al aceite mineral

Es necesario subrayar que los métodos de análisis y las normas que los contienen están siendo continuamente modificados y actualizados. En consecuencia, los test vigentes se deben localizar en la última versión de la norma correspondiente, así como los límites de los ensayos y su aplicabilidad en un determinado equipo.

6. MODELO DE SIMULACIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN

En los capítulos previos se han expuesto los aspectos constructivos de un transformador y los tipos de refrigeración que estos tienen. En este capítulo se presenta el modelo tanto geométrico como físico que se usará en la simulación posterior.

En primer lugar se describe la geometría usada en la simulación, las diferentes partes de la misma y todas las ecuaciones físicas a las que se verá sometida esa geometría, justificando de esta manera todas las simplificaciones hechas en los mismos y definiendo el valor de los parámetros que utilizaremos en la simulación.

A continuación se expondrán las propiedades físicas del aceite mineral, como son la densidad, conductividad térmica, calor específico y viscosidad cinemática para finalmente hacer una comparación de las propiedades entre los fluidos y su variación con la temperatura.

6.2 DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA

El estudio de la refrigeración de transformadores de medias y grandes potencias se centra en el análisis de los aspectos térmicos. El modelo simula la distribución estacionaria de temperaturas en un transformador tipo disco, refrigerado con un líquido dieléctrico, teniendo en cuenta la interacción fluido-térmica, es decir, la transferencia de calor y la dinámica de fluidos.

Como se ha mencionado anteriormente, el análisis llevado a cabo se realiza en un transformador trifásico con el núcleo en columnas, cuyas fases se encuentran inmersas de forma vertical en líquido dieléctrico en el interior de una cuba. Dado que el comportamiento de las tres fases es el mismo, el estudio se realiza sobre una de ellas, siendo los resultados obtenidos extrapolables a las demás.

En el modelo propuesto se considera que la circulación de líquido en la cuba es forzada a través de los devanados con el fin de conseguir el nivel de

refrigeración necesario. Por ello se considera en el modelo un flujo másico de entrada del fluido desde la parte inferior del transformador.

Además hay que tener en cuenta la variación de las propiedades de los fluidos refrigerantes con la temperatura, tales como la densidad, viscosidad cinemática, conductividad térmica y calor específico; así como el diferente valor de estas propiedades en cada uno de los líquidos dieléctricos. Estas propiedades afectan al comportamiento dinámico del fluido así como a su capacidad de extraer calor.

El presente estudio busca determinar las distribuciones de flujo temperaturas dentro de un devanado de baja tensión de un transformador de transmisión 66 MVA, 225/26.4 kV ONAN/ONAF que actualmente está en servicio en la red de Hydro-Québec. En la tabla adjunta se muestran todos los datos referentes al transformador estudiado.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Potencia nominal	66 MVA
Tensión devanado primario	225 kV
Tensión devanado secundario	26.4 kV
Intensidad devanado primario ($\cos\phi=0.9$)	188.2 A
Intensidad devanado secundario ($\cos\phi=0.9$)	1604 A
Tipo de conexión	YNd1
Tipo de refrigeración	ONAN/ONAF (KNAN/KNAF)

Tabla 6.1 Características del transformador del estudio

Como ilustra la figura 6.1, el devanado de baja tensión está hecho con 78 discos subdivididos en cuatro pasos. Todos los pasos, exceptuando el primero contienen 19 discos. El primer paso tiene 21 discos y hay una arandela de cartón adicional entre el segundo y tercer disco. El aceite entra en el devanado tanto por el conducto axial interno como por el axial externo, pero después del segundo disco del paso es redirigido hasta el conducto exterior por la mencionada arandela. Consecuentemente, en el segundo paso el aceite entra por el conducto axial interno, alternándose de la misma manera en los siguientes pasos.

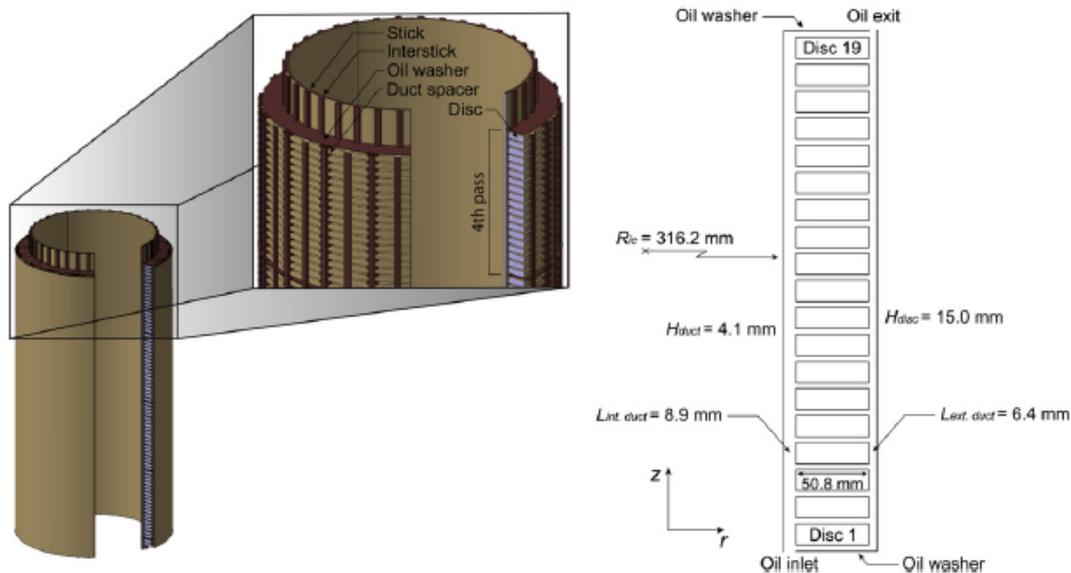


Figura 6.1 Cuarto paso del transformador

Los conductos axiales internos están delimitados por una serie de 18 sticks o listones y 18 intersticks o entrelistones que están igualmente espaciados y pegados al cilindro interior. Los sticks tienen forma de cola de milano mientras que los intersticks tienen una sección transversal rectangular (8.9 x 15.9 mm). Así, los conductos interiores tienen una longitud de 8.9 mm y una anchura aproximada de 40 mm. Los conductos exteriores están delimitados por una serie de 60 sticks rectangulares (6.4 x 15.9 mm de sección transversal) y tienen una longitud de 6.4 mm y una anchura aproximada de 50 mm.

Cada disco del devanado está separado de los discos adyacentes por 18 espaciadores de cartón que están unidos a los sticks interiores con forma de cola de milano y a los sticks rectangulares exteriores. Los espaciadores tienen una anchura de 28.6 mm y una altura de 4.1 mm, lo cual implica que los conductos horizontales de refrigeración tiene una altura de 4.1 mm y una anchura aproximada de 94 mm.

Las cinco arandelas de cartón que delimitan los cuatro pasos tienen una altura de 1 mm y se les asume un contacto perfecto tanto con el cilindro interior como con el exterior (no hay fugas de aceite).

Finalmente, los discos están hechos de 18 conductores de cobre (2.1 x 14.3 mm de sección transversal) que están individualmente encintados con papel

aislante de espesor 0.4 mm como se muestra en la figura 6.2. La altura total del devanado es de 1511 mm.

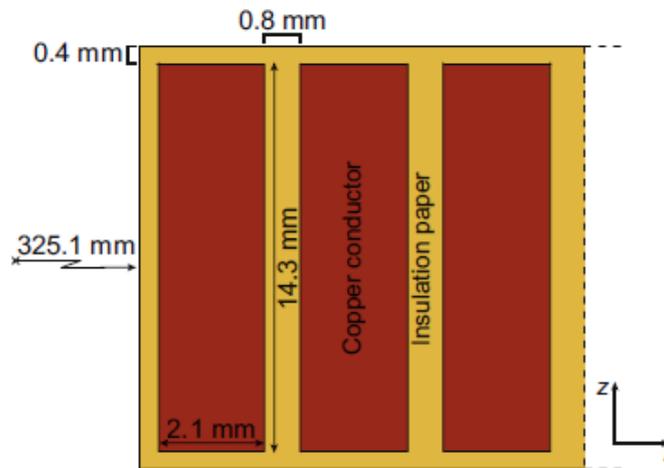


Figura 6.2 Vista cortada de un disco del transformador

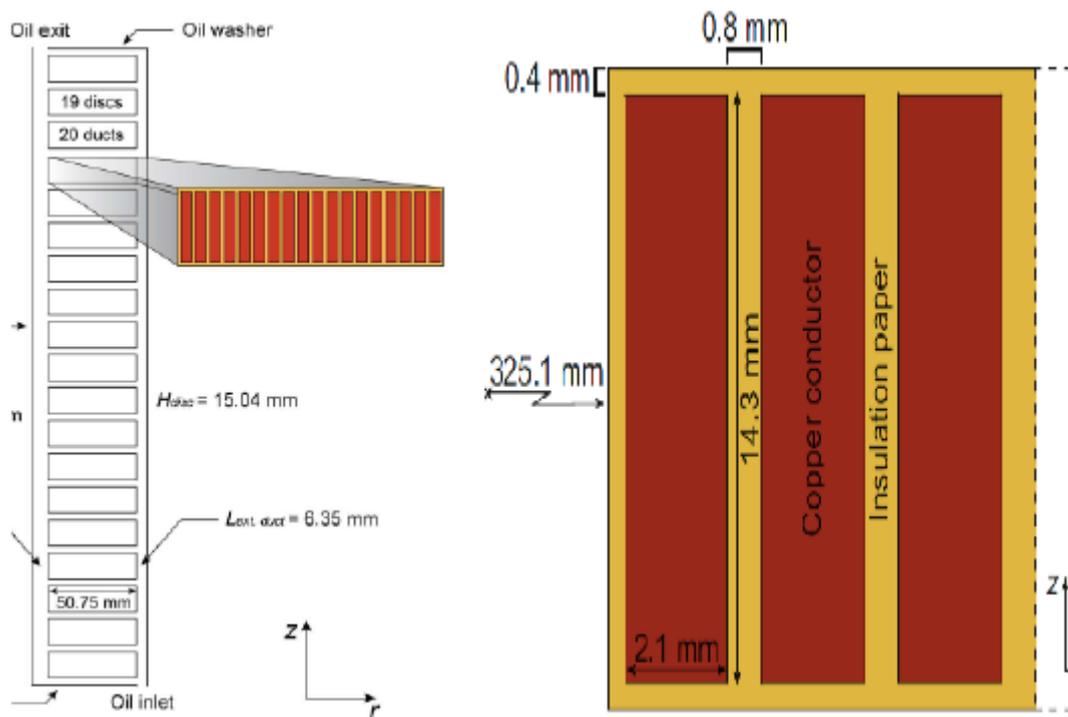


Figura 6.3 Detalle ampliado del paso de un transformador

En nuestro caso específico, el estudio se centrará exclusivamente en los dos discos iniciales, es decir, únicamente estudiaremos los dos primeros discos del primero paso de 21 discos.

El transformador analizado en el estudio se trata de un transformador trifásico con el núcleo en columnas, donde la disposición de los devanados es un apilamiento vertical de discos, situándose los devanados de alta y baja tensión de forma concéntrica alrededor del núcleo, siendo el devanado de baja tensión el que ocupa la posición interior.

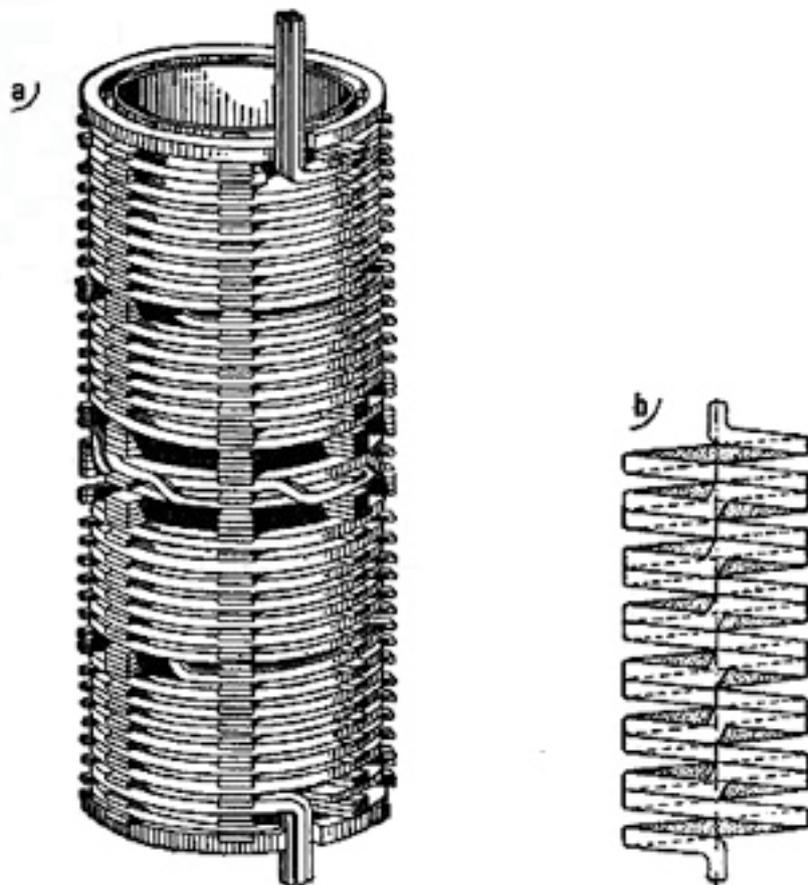


Figura 6.4 Transformador tipo disco

Debido a la geometría cilíndrica de los devanados se puede simplificar la geometría del modelo puesto que presenta una simetría axial. Por ello el transformador se compone de 18 sectores circulares de 20 grados cada uno, admitiéndose que el comportamiento fluido-térmico en cada una de estos sectores es igual que en las demás y que por ello no tienen influencia en los

sectores adyacentes. Cada uno de estos sectores tiene un plano de simetría en su mitad, con lo que el modelo considera un sector de 10 grados del transformador aplicando condiciones de simetría en el plano medio de simetría. Analizando el sector de 10 grados del transformador se obtiene información suficiente para conocer el comportamiento de una porción del transformador y aplicar lo obtenido al resto del transformador. Además se ha idealizado que todos los devanados llevan asignado un mismo valor de producción de calor.

El análisis se centra en el devanado de baja tensión, ya que es por el que circula mayor intensidad, lo que supone mayores pérdidas por efecto Joule y mayores temperaturas.

6.3 SIMPLIFICACIONES DEL MODELO GEOMÉTRICO

Con el fin de reducir el coste computacional necesario para la simulación y aprovechando las simetrías que presenta el modelo se establecen las siguientes simplificaciones en la geometría.

- Se consideran los dos primeros discos del devanado de baja tensión.
- Se toma una porción de 10 grados con su plano de simetría correspondiente.
- Se considera cada disco compuesto por un único conductor de cobre, envuelto en papel aislante de espesor 0,4mm.

Dentro de nuestro modelo, tenemos los siguientes dominios separados:

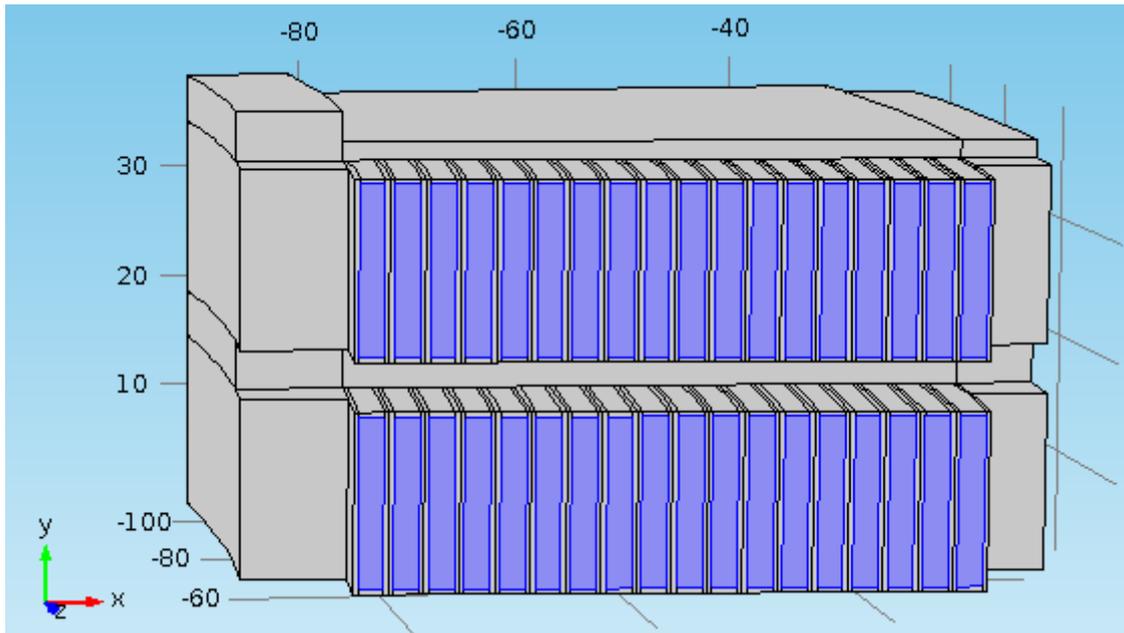


Figura 6.5 Cobre del paso de los dos discos

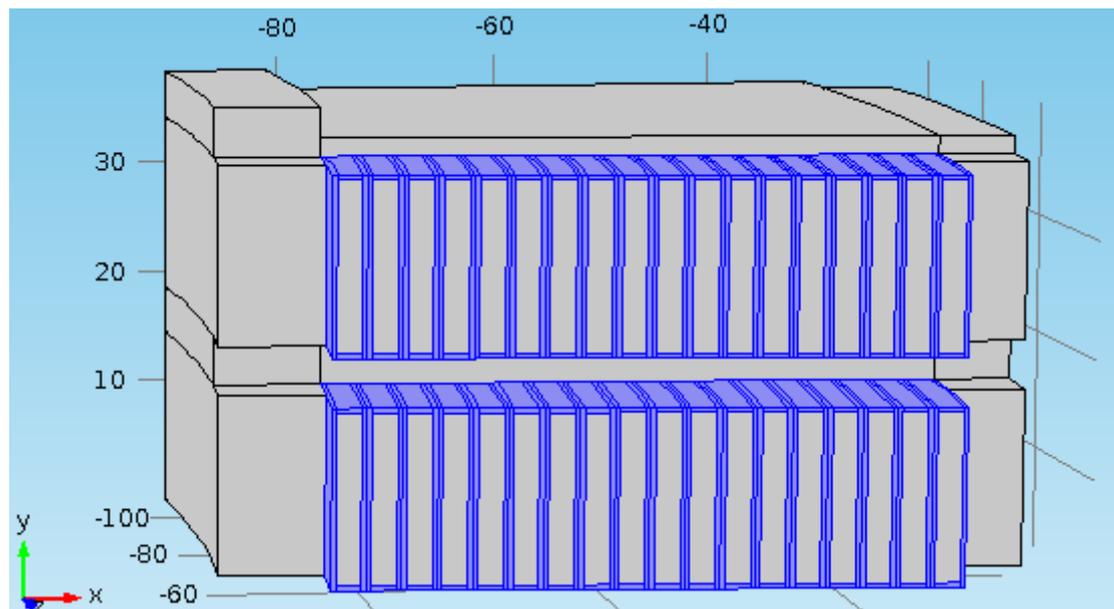


Figura 6.6 Papel aislante del paso de los dos discos

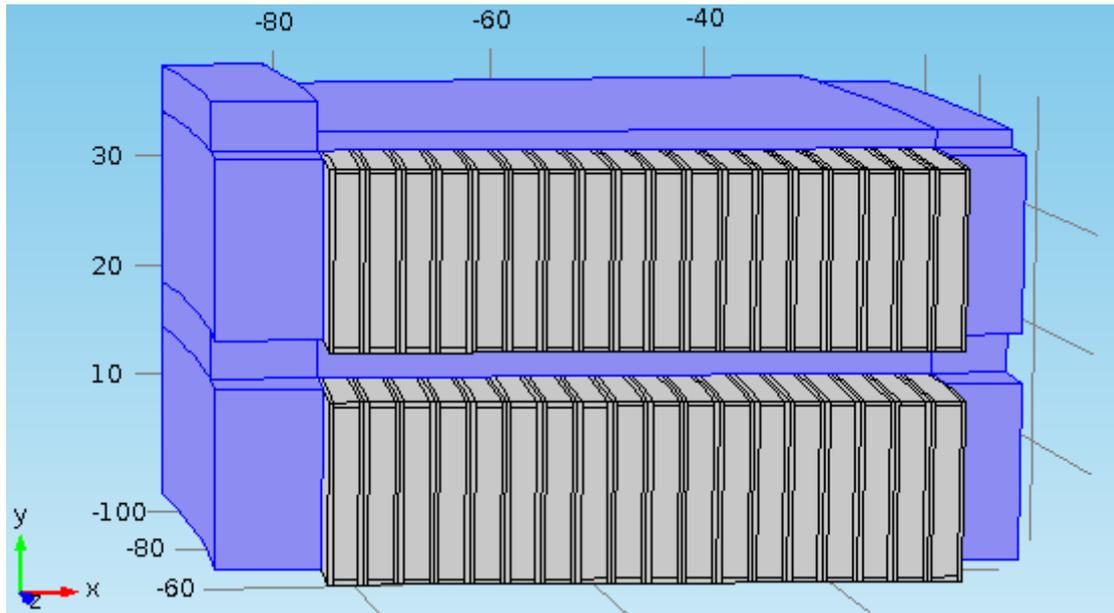


Figura 6.7 Aceite refrigerante del paso de los dos discos

Nuestro modelo incluye varios espacios donde irían incrustados los sticks, intersticks y la arandela de cartón que corta el paso de fluido.

6.4 PRINCIPIOS FÍSICOS DEL MODELO GEOMÉTRICO

En la simulación del modelo geométrico se consideran dos físicas diferentes en el fluido. La primera de ellas es la física de transferencia de calor mediante la cual se calcula la distribución de temperaturas todos los dominios; y la segunda es la dinámica de fluidos, mediante la cual se determina el campo de velocidades y el movimiento del fluido en el interior de la cuba. Ambos fenómenos influyen directamente en la refrigeración del transformador y por ello se realizará un análisis en estado estacionario en condiciones nominales de funcionamiento, obteniendo como resultado los parámetros adimensionales que caracterizan el proceso de transferencia de calor en la refrigeración del transformador.

En cuanto a los fenómenos de transferencia de calor, se tiene en cuenta los mecanismos de conducción y los de convección. La conducción es el único mecanismo de transmisión de calor posible en los medios sólidos cuando existe un gradiente de temperatura, transmitiéndose el calor de la región de

mayor temperatura a la región de menor temperatura. Este fenómeno ocurre entre el devanado de cobre y el aislamiento sólido que lo recubre.

La convección es un mecanismo de intercambio de calor entre fluidos y sólidos y ocurre cuando un fluido entra en contacto con un sólido a diferente temperatura. Si el movimiento del fluido se debe a su pérdida de densidad se trata de convección natural. El fluido más caliente, con menor densidad, asciende por los canales verticales hasta completar el circuito. Si por el contrario el fluido se mueve por efecto de un mecanismo que lo impulse, como una bomba o un ventilador, los flujos máxicos son mayores y se trata de convección forzada.

6.4.1 Modelo físico-matemático

La herramienta de cálculo se rige por un balance general de energía que cumple la siguiente ecuación diferencial.

$$\nabla - k \cdot \Delta T = Q - \rho \cdot C_p \cdot u \cdot \Delta T \quad (1)$$

En esta ecuación, el valor k es la conductividad térmica, c_p es el calor específico y Q es el calor considerado que se genera en cada uno de los devanados del modelo físico. En nuestro caso, k , C_p y p son dependientes de la temperatura.

Para el análisis del movimiento del fluido se dispone de ecuaciones de conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento. Se trata de las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles donde se tienen en cuenta la velocidad del fluido y el campo de presiones.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla(\rho U \times U) = -\nabla p + \mu(\nabla^2 U) + g(\rho - \rho_{ref}) \quad (3)$$

En estas ecuaciones se ha de tener en cuenta que tanto la densidad como la viscosidad son dependientes de la temperatura para los fluidos utilizados en el modelo. Las variaciones en la densidad del fluido dan lugar a fuerzas de flotabilidad, cuya expresión es $\Delta\rho \cdot g$, las variaciones de presión dan lugar a

fuerzas de presión $-\nabla p$ y las variaciones en la velocidad dan lugar a fuerzas de viscosidad $\mu \cdot (\nabla^2 U)$. La primera de las ecuaciones representa la conservación de la masa mientras que la segunda representa la conservación de la cantidad de movimiento. La nomenclatura de todas estas ecuaciones se determinara en un apéndice posterior situado al final del documento.

6.4.2 Condiciones de contorno

Antes de realizar el análisis del modelo es necesario establecer las condiciones de contorno que definen su comportamiento. En la pared interior del modelo se considera la existencia de simetría axial, por lo que no existe flujo de calor a través de ella. En el contorno inferior, en la entrada del fluido, se considera como condición de entrada un flujo másico de 0,78/360 kg/s por cada grado de sección, haciendo que el flujo másico de entrada sea de 0,02167 kg/s. En el contorno correspondiente a la salida del fluido se considera que tiene una presión nula. Además, la velocidad del fluido en contacto con las paredes es nula (condición de no-deslizamiento), debido a la formación de la capa límite hidrodinámica en el fluido próximo a las paredes.

Además existe un conjunto de condiciones de contorno que es necesario introducir al modelo para que el comportamiento del mismo se asemeje lo más posible al comportamiento real del transformador. Estas condiciones de contorno están tomadas del artículo de F. Torriano "Numerical investigation of 3D flow and thermal effects in a disc-type transformer winding".

- Temperatura inicial del fluido entrante y temperatura inicial del modelo: **46.7°C**
- Únicamente existe flujo de calor convectivo en los conductos de salida:
 $\mathbf{n} \cdot (-\mathbf{k}\nabla T) = 0$
- Se tiene una simetría axial respecto al centro del transformador ($\mathbf{r} = 0$)
- Los contornos exteriores de las paredes se encuentran aislados térmicamente del exterior
- Existe una generación de calor constante por parte de los devanados, de valor: **1.044 W** (por disco y grado) haciendo así un total de **37.6 W**

Además de estas condiciones de contorno se han añadido otras condiciones de contorno al modelo. Se considera simetría en los procesos fluido-térmicos en el plano medio de simetría del modelo, tanto en temperaturas como en velocidad del fluido. También se considera que los devanados de cobre están envueltos por papel aislante de espesor 0,4mm.

6.4.3 Modelo numérico

En este apartado se establecerá el modelo numérico a resolver. Este es fruto de lo expuesto en los dos apartados anteriormente detallados, es decir, ecuaciones de gobierno y condiciones de contorno.

- Transferencia de calor en sólidos:

$$\rho C_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (4)$$

- Aislamiento térmico:

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (5)$$

- Condición de no-deslizamiento:

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

- Fluido:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-\rho \mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] + \mathbf{F} \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (8)$$

$$\rho C_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q + Q_{wh} + W_p \quad (9)$$

- Fuerza impulsora:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-\rho \mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] + \mathbf{F} \quad (10)$$

donde F tiene un valor de $-g \cdot \rho_{aceite}$

- Fuente de calor:

$$\rho C_p u \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (11)$$

$$Q = \frac{P_{tot}}{V} \quad (12)$$

- Temperatura constante:

$$T = T_0 \quad (13)$$

- Flujo entrante:

$$-\int_{\partial\Omega} \rho(u \cdot n) = dSm \quad (14)$$

- Flujo saliente:

$$p = p_0 \quad (15)$$

$$\left[\mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot u) I \right] \cdot n = 0 \quad (16)$$

- Simetría en sólidos:

$$-n \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (17)$$

- Simetría en fluidos:

$$u \cdot n = 0 \quad (18)$$

$$K - (K \cdot n)n = 0 \quad (19)$$

$$K = [\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)]n \quad (20)$$

- Convección de fondo:

$$-n \cdot (k \nabla T) = h \cdot (T_{ext} - T) \quad (21)$$

6.4.3.1 Caso especial de un transformador sin papel

En nuestro estudio, se tienen 2 modelos geométricos distintos. Ambos son bastante similares pero uno de ellos no cuenta con el papel aislante dibujado en él. Por lo tanto se necesita aplicar una condición de contorno que simule la existencia de un papel a pesar de no estar la misma en el modelo físico.

La solución elegida es la aplicación como condición de contorno de capa fina térmicamente resistiva. Eso produce un efecto similar al del papel aislante sin la necesidad de que este forme parte en ningún momento de nuestra figura.

$$-\mathbf{n}_d \cdot (-k_d \nabla T_d) = -k_s \frac{(T_u - T_d)}{d_s} \quad (22)$$

$$-\mathbf{n}_u \cdot (-k_u \nabla T_u) = -k_s \frac{(T_d - T_u)}{d_s} \quad (23)$$

$$k_s = \frac{d_s}{\sum_j \frac{d_{sj}}{k_{sj}}} \quad (24)$$

$$d_s = \sum_j d_{sj} \quad (25)$$

6.5 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES

Además de las propiedades de los materiales sólidos que componen el transformador, es necesario definir las propiedades del aceite mineral utilizado en el estudio. Las propiedades a conocer son la densidad, conductividad térmica, calor específico y viscosidad cinemática. Es necesario introducir estos parámetros al modelo de simulación para poder simular el comportamiento del fluido en el modelo.

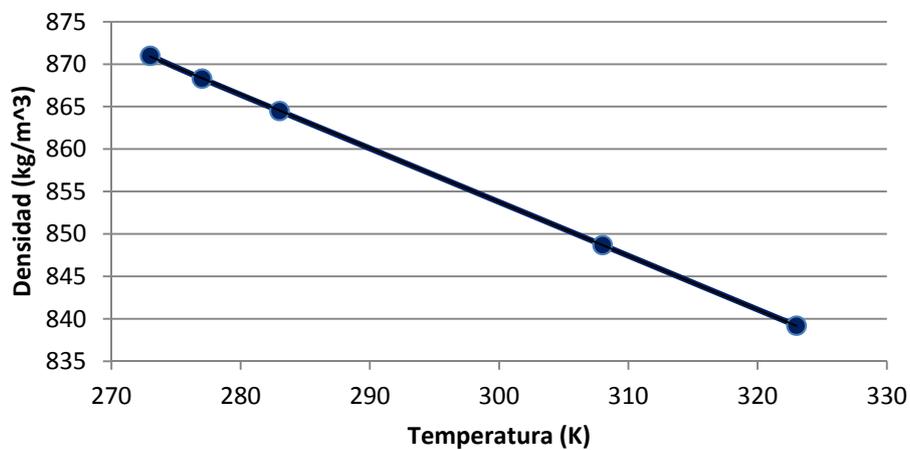
Para la buena resolución del modelo, debido a la interacción fluido-térmica entre los elementos sólidos y el fluido, es necesario proporcionar expresiones matemáticas de las propiedades anteriormente mencionadas que determinen su variación con la temperatura. Estas expresiones han sido calculadas a partir de datos proporcionados por el fabricante.

6.5.1 Densidad

Temperatura (°K)	Densidad (kg/m ³)
273	871
277	868.3
283	864.5
308	848.7
323	839.2

Tabla 6.2 Densidad del aceite mineral en función de T

Densidad Aceite Mineral

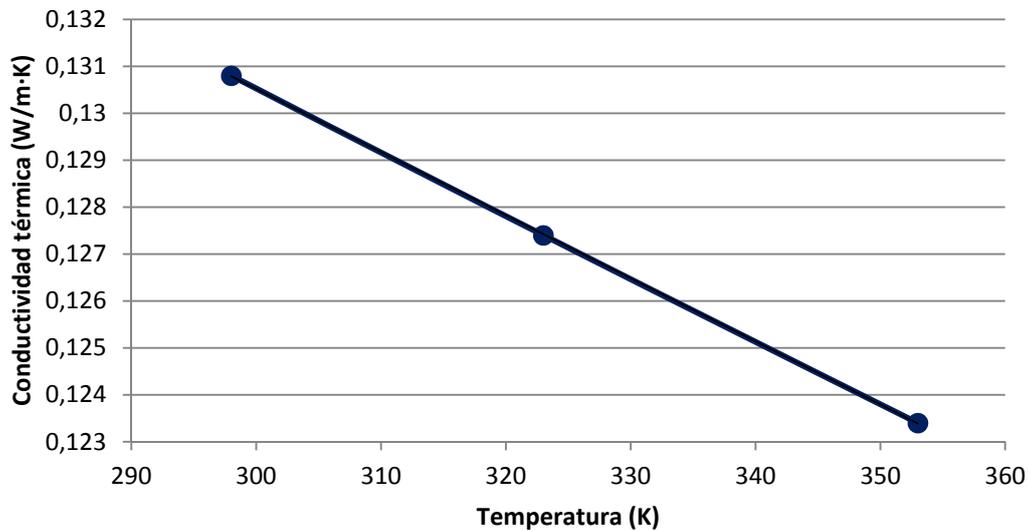


6.5.2 Conductividad térmica

Temperatura (°K)	Conductividad térmica (W/m·K)
298	0.1308
323	0.1274
353	0.1234

Tabla 6.3 Conductividad térmica del aceite mineral en función de T

Conductividad Térmica Aceite Mineral

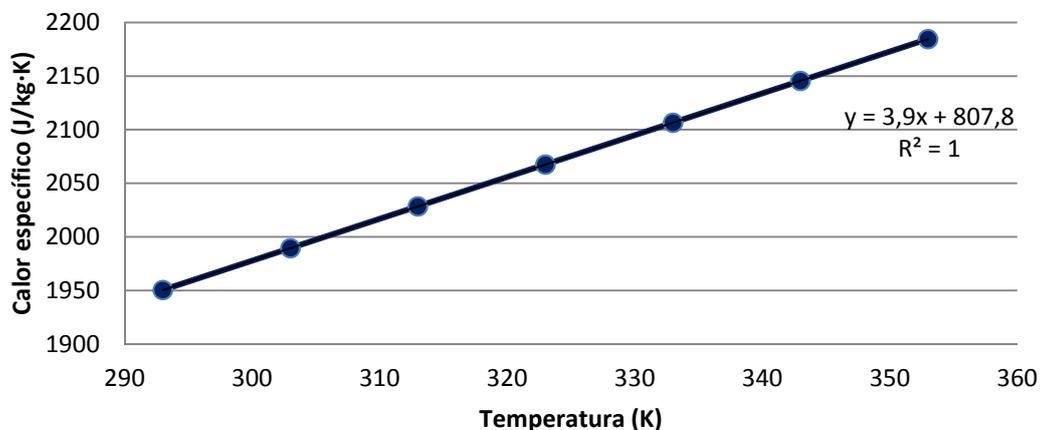


6.5.3 Calor específico

Temperatura (°K)	Calor específico (J/kg·K)
293	1950.5
303	1989.5
313	2028.5
323	2067.5
333	2106.5
343	2145.5
353	2184.5

Tabla 6.4 Calor específico del aceite mineral en función de T

Calor Específico Aceite Mineral

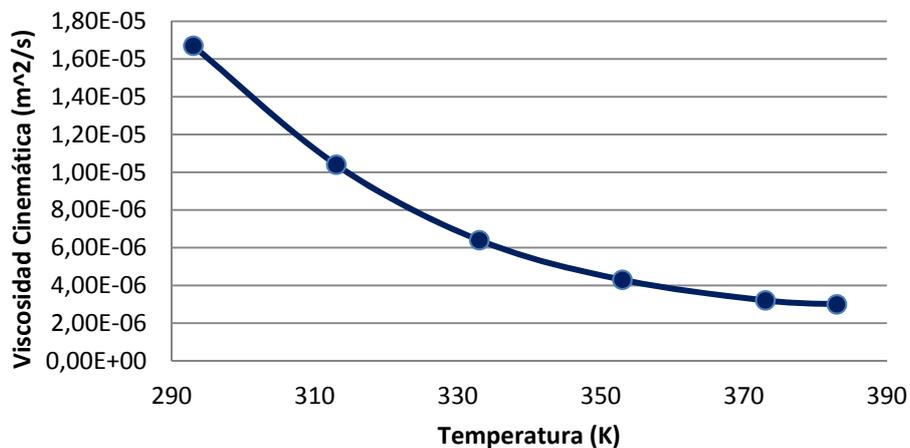


6.5.4 Viscosidad cinemática

Temperatura (K)	Viscosidad cinemática (m^2/s)
293	$1.67 \cdot e^{-5}$
313	$1.04 \cdot e^{-5}$
333	$6.40 \cdot e^{-6}$
353	$4.30 \cdot e^{-6}$
373	$3.21 \cdot e^{-6}$
383	$3.00 \cdot e^{-5}$

Tabla 6.5 Viscosidad cinemática en función de T

Viscosidad Cinemática Aceite Mineral



Las expresiones de densidad, conductividad térmica, calor específico y viscosidad cinemática del aceite mineral en función de la temperatura son:

$$\rho = 1098.72 - 0.712T \quad [kg/m^3]$$

$$k = 0.1509 - 7.101 \cdot 10^{-5}T \quad [W/m \cdot K]$$

$$C_p = 807.163 + 3.58T \quad [J/kg \cdot K]$$

$$\mu = 0.08467 - 4 \cdot 10^{-4}T + 5 \cdot 10^{-7}T^2 \quad [m^2/s]$$

En todas estas ecuaciones, el valor de T está especificado en grados Kelvin.

6.6 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES SÓLIDOS

En añadido con las condiciones de contorno, es necesario definir además las propiedades de los materiales sólidos que componen el modelo, tales como la densidad, capacidad calorífica o conductividad térmica.

- Conductividad térmica del cobre: $401 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
- Densidad del cobre: 8933 kg/m^3
- Calor específico del cobre: $385 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$
- Conductividad térmica del papel aislante: $0.19 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
- Densidad del papel aislante: 930 kg/m^3
- Calor específico del papel aislante: $1340 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

6.7 VALORES INICIALES CALCULADOS

Para conocer la velocidad de entrada del aceite refrigerante en el transformador, se realiza el cálculo siguiente:

Sabemos que el flujo másico en los 10° de transformador que tenemos tiene un valor de:

$$\text{Flujo} = \frac{0.0433}{2} \text{ kg/s}$$

La temperatura de entrada del aceite en el transformador tiene un valor de $T_{inlet} = 46.7^\circ\text{C}$

Así pues, y extrayendo la siguiente ecuación proveniente del artículo de Torriano, se calcula:

$$\rho_{46.7^\circ\text{C}} = 1098.72 - 0.712 \cdot (273.15 + 46.7) = 870.9868 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{46.7} \cdot A_T \cdot v_T = \rho_{46.7} \cdot A_1 \cdot v_1 + \rho_{46.7} \cdot A_2 \cdot v_2$$

Todos estos datos están expresados en kg/s . Además, se conocen los datos de los áreas de entrada tanto exterior como interior. En nuestro caso, se toma

como área interior el área A_1 mientras que el área exterior será conocido como el área A_2 . El valor de los mismos es de:

$$A_1 = 354.6 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 302.6 \text{ mm}^2$$

La condición de contorno que se aplica en el modelo geométrico será la igualdad de caudales tanto por el canal interior como canal exterior.

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

Se conoce el valor de la igualdad anterior que es:

$$\rho_{46.7} \cdot A_1 \cdot v_1 = 0.021665 \text{ kg/s}$$

Así pues, si se sustituye este valor en la igualdad de flujo másico expresada anteriormente, se puede ver que:

$$0.021665 = \rho_{46.7} \cdot (2A_1 v_1)$$

Por lo tanto, a partir de esta ecuación, sustituyendo el valor de A_1 , se puede obtener la velocidad de entrada del canal interior.

$$v_1 = \frac{0.021665}{870.9868 \cdot 2 \cdot 354.6 \cdot 10^6} = 0.03507 \text{ m/s}$$

Teniendo este valor de velocidad, se sustituye ese valor en la igualdad de caudales para así obtener la velocidad de entrada en el canal exterior:

$$v_2 = \frac{A_1 \cdot v_1}{A_2} = \frac{354.6}{302.6} \cdot 0.03507 = 0.041 \text{ m/s}$$

Con estos dos últimos datos, se completa el número de condiciones de contorno a aplicar en el modelo físico.

7. COMSOL MULTIPHYSICS

7.1 INTRODUCCIÓN

La complejidad para alcanzar soluciones de cierta exactitud exige el uso de una potente herramienta de cálculo como es un software informático capaz de realizar la enormidad de cálculos requeridos por las ecuaciones diferenciales que rigen los movimientos de las partículas y los cambios de temperatura.

En este apartado se explica la técnica numérica basada en elementos finitos (MEF, Método de Elementos Finitos) en la que se apoya la herramienta informática que se utiliza en este estudio (Comsol Multiphysics); a continuación, se presenta este programa, su modo de funcionamiento y la resolución del modelo llevado a cabo mediante explicaciones para el interfaz gráfico.

7.2 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

El método de los elementos finitos (MEF) es un procedimiento que permite obtener soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales parciales, así como de ecuaciones integrales, mediante técnicas numéricas estándar, como el método de Euler, o de Runge-Kutta.

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el comportamiento del elemento.

De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no. El número de ecuaciones que es necesario resolver es proporcional al número de nodos.

En cualquier sistema a analizar se puede distinguir entre:

- Dominio: Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema

- Condiciones de contorno: Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: desplazamientos, temperaturas, focos de calor,...
- Incógnitas: Variables del sistema que se desea conocer después de que las condiciones de contorno hayan actuado sobre el dominio o sistema: velocidades, temperaturas, etc. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que determinan el estado y/o posición del nodo.

El método de los elementos finitos lleva a cabo, para solucionar el problema, el discretizado del dominio en subdominios denominados elementos, formados a partir de la aplicación de un mallado a la superficie total continua, de características concretas elegidas. Tras la discretización del modelo, los elementos se definen por un número discreto de puntos que conectan entre sí. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema.

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real de cierta precisión y más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo no deja de ser un método aproximado, no alcanzando soluciones exactas. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el primero puede acercarse bastante más al diseño óptimo.

A continuación, se presenta el programa de cálculo seleccionado para llevar a cabo el análisis.

7.3 EL PROGRAMA: COMSOL MULTIPHYSICS

De entre los programas informáticos basados en el método de los elementos finitos, el software seleccionado para el análisis es el programa Comsol Multiphysics versión 5.0. Este programa pertenece a la empresa COMSOL, fundada en 1986 en Estocolmo. (Suecia) y desde su inicio se ha especializado en los campos de ingeniería, matemática aplicada y física. COMSOL también es el desarrollador de la PDE Toolbox de MATLAB.

Este programa, al igual que otros equivalentes como SolidWorks, Catia, Ansys, Cosmos, etc. es usado por científicos, ingenieros y otros interesados en

realizar un preanálisis de cierta profundidad con anterioridad a la decisión de llevar a cabo la fabricación de un prototipo sobre el que realizar los análisis finales que verificarán la validez de lo diseñado y su posterior producción. Se consigue así, de forma ágil, obtener resultados que hayan tenido en cuenta tanto el nivel de detalle elegido por el usuario como algunos de los varios procesos físico-químicos actuantes de forma instantánea, al disponer Comsol Multiphysics de la posibilidad de implementar varios módulos de principios para actuar simultáneamente.

En este programa es posible modelar a partir de la representación de una geometría en la que se fijan las cantidades físicas que caracterizan al problema, o bien a través de la introducción de las ecuaciones que modelen el problema, siendo igualmente posible, la combinación de ambas formas de modelado.

Como programa basado en método de los elementos finitos, COMSOL trabaja sobre un sistema de Ecuaciones Diferenciales Parciales (PDEs) implementadas en el programa, que crean una descripción matemática de varios fenómenos físicos basados en las leyes de la ciencia.

Como características principales del programa, se pueden citar:

- Interfaz gráfico "amigable" e interactivo para todas las etapas del proceso de modelado (preproceso, proceso y postproceso).
- Ilimitadas prestaciones de multifísica.
- Formulación general para un modelado rápido y sencillo de sistemas arbitrarios de PDEs.
- Multifísica multidimensional para modelado simultáneo de sistemas en 1D, 2D y 3D.
- Incorpora herramientas CAD para modelado sólido en 1D, 2D y 3D.
- Permite importar y reparar la geometría de archivos CAD en formato DXF e IGES. En particular, permite la importación de archivos creados en AutoCAD y CATIA.
- Generación automática y adaptativa de mallas, con un control explícito e interactivo sobre su tamaño.

- Extensa biblioteca de modelos y propiedades de materiales.

Existen varios módulos de aplicación específicos para COMSOL Multiphysics, algunos de ellos son los siguientes:

- Acústica, electromagnetismo, sistemas microelectromecánicos (MEMS), ingeniería de microondas, componentes de radiofrecuencia, dispositivos semiconductores, propagación de ondas.
- Reacciones químicas, difusión, dinámica de fluidos, fluidos en medios porosos, transferencia del calor, fenómenos de transporte.
- Mecánica de estructuras.
- Física, geofísica, óptica, fotónica, mecánica cuántica.
- Sistemas de control.
- Modelización de componentes.
- Matemática aplicada.

7.4 PROCEDIMIENTO GENERAL DE CÁLCULO

A continuación se explica la metodología de cálculo habitual usada con este programa. Esta metodología, de forma común a otros programas basados en el método de elementos finitos, se puede ordenar en tres grandes etapas; el preproceso, proceso y el postproceso.

La etapa de preproceso constituye todos los pasos iniciales previos a la solución del problema, esto es, la selección del modelo, diseño de la geometría, introducción de todos los datos de entrada que se usaran en la siguiente etapa de procesado del modelo. Esta etapa inicial de preproceso, en el caso de Comsol Multiphysics, se lleva a cabo de la siguiente manera.

Al arrancar el programa, primero debe seleccionarse el tipo de modelo: 1D, 2D, 2D axisimétrico, 3D, etc. A continuación, el programa ofrece diferentes módulos de cuya selección dependerán los principios físicos que se aplican en el diseño que se desea construir y analizar. Además se debe seleccionar las dimensiones en las que estos principios físicos deben actuar; esto es, el sistema de coordenadas y la variación o no del tiempo en el análisis.

Seleccionado y abierto el modelo, el segundo paso en esta etapa de preproceso es la representación de la geometría que se desea estudiar. El programa dispone de herramientas de dibujo con formas lineales y poligonales predefinidas que pueden utilizarse directamente sobre pantalla o mediante la introducción de las coordenadas que definen las figuras y condiciones sobre su orientación. Cada figura o elemento tiene asignado una identificación pudiendo actuar en cualquier momento sobre sus propiedades, como se hace en el paso siguiente al acabar la geometría.

El tercer paso es proporcionar al modelo valores y expresiones que se añaden a los procedimientos y valores predefinidos por defecto en el programa Comsol. Estos valores, constantes o variables, pueden ponerse a disposición del modelo completo, o de forma independiente, para determinadas figuras o partes del diseño. Estos valores y expresiones se denominan condiciones de contorno, bajo los cuales el programa realiza sus procedimientos matemáticos de cálculo.

A continuación, como última actividad, enteramente dependiente del diseñador, se indica qué partes del modelo geométrico deben poseer los valores constantes y expresiones que se pusieron a disposición del programa como condiciones de contorno. Estos valores citados se asocian a los diferentes subdominios de forma individualizada.

Es en este momento cuando el programa dispone de los fenómenos físicos que deben tenerse en cuenta en la resolución, la geometría sobre la que debe aplicarse y los valores y expresiones asignados de forma concreta a cada elemento de la geometría.

Para finalizar la etapa de preprocesado, común a cualquier programa de elementos finitos, es necesaria la creación del mallado que, como se explicó, consigue una discretización de la geometría continua. El programa Comsol permite seleccionar las condiciones bajo las cuales este mallado debe llevarse a cabo, y el nivel de precisión que quiere conseguirse (que irá en relación directa con el tiempo y recursos necesarios para que el computador resuelva el modelo).

En este momento, la etapa de preprocesado está acabada y puede pasarse a la etapa denominada “proceso”. Aquí, deben determinarse las condiciones en que debe obtenerse la solución del problema de acuerdo con el diseño del modelo completado en la etapa de preproceso. En el caso de Comsol Multiphysics, existen diferentes solucionadores (“solvers”) a disposición del diseñador. Se puede elegir que los mismos sean dependientes del tiempo o estacionarios, paramétricos, estacionarios segregados, etc.- de cuya selección dependerá que las soluciones sean obtenidas y el modo en el que se obtuvieron.

Finalmente, se entra en la etapa de postproceso. El programa ha obtenido la solución del problema y puede seleccionarse la presentación de los diferentes resultados basados en esta solución y en relación con las físicas que se seleccionaron para el modelo.

7.5 OBTENCIÓN DE LAS PIEZAS DE LA GEOMETRÍA

En primer lugar, se procede a la realización de la geometría del transformador. La geometría del modelo consiste en los dos primeros pasos del transformador descrito en capítulos anteriores.

Para la realización de esta geometría 3D se cuenta con un programa auxiliar de diseño asistido por ordenador conocido como Autodesk Inventor. Este programa permite la realización individual de las partes del transformador y su posterior ensamblado. El empleo de este programa permite la realización de cada tipo de pieza para posteriormente duplicarlas en el caso de que haya más de una de ellas.

Para realizar las piezas, a la hora de abrir el programa hay que seleccionar la opción normal.ipt, correspondiente a la elaboración de piezas. El método de elaboración de las piezas consiste en realizar un boceto en 2D para posteriormente realizar operaciones de extrusión, revolución, elevación o barrido para hacer una pieza 3D, que se puede seguir editando con cortes, agujeros y demás operaciones para obtener la pieza deseada.

Las piezas de las que consta el modelo son las siguientes.

7.5.1 Discos de cobre

Para la realización del disco de cobre, se dibuja en 2 dimensiones un rectángulo de 14.3 mm de largo y 2.1 mm de ancho. Este rectángulo se duplica 18 veces por disco. Hecho esto, se da el boceto por terminado y se pasa a 3D y realizamos una revolución de 10° , concluyendo así nuestra pieza.

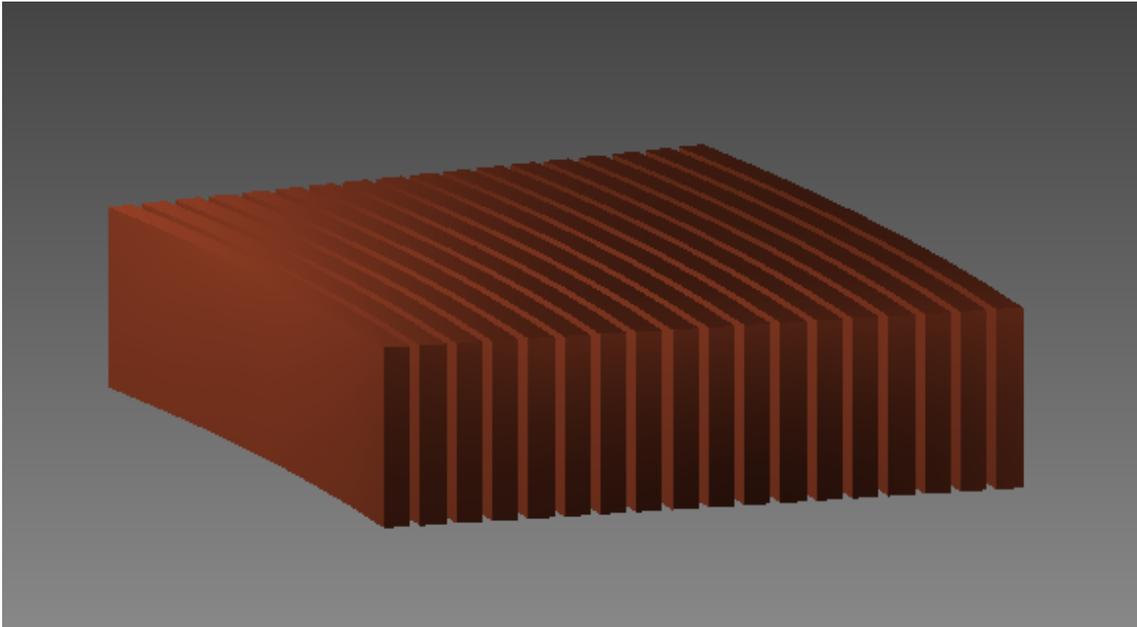


Figura 7.1 Discos de cobre realizados en Autodesk Inventor.

7.5.2 Papel aislante

En el caso de papel aislante, se realiza un nuevo boceto dibujando un rectángulo del mismo tamaño del disco de cobre dibujado en el apartado anterior. Tras ello, se realiza un nuevo rectángulo que comparte centro con el anterior. El nuevo rectángulo tiene unas dimensiones de 15.1 mm de alto por 2.9 mm de ancho. Se realiza el mismo número de copias por disco que las realizadas para los discos de cobre.

Acabado esta acción, damos por concluido el boceto y realizamos una revolución igual a la realizada en el caso anterior, es decir, una revolución de 10°

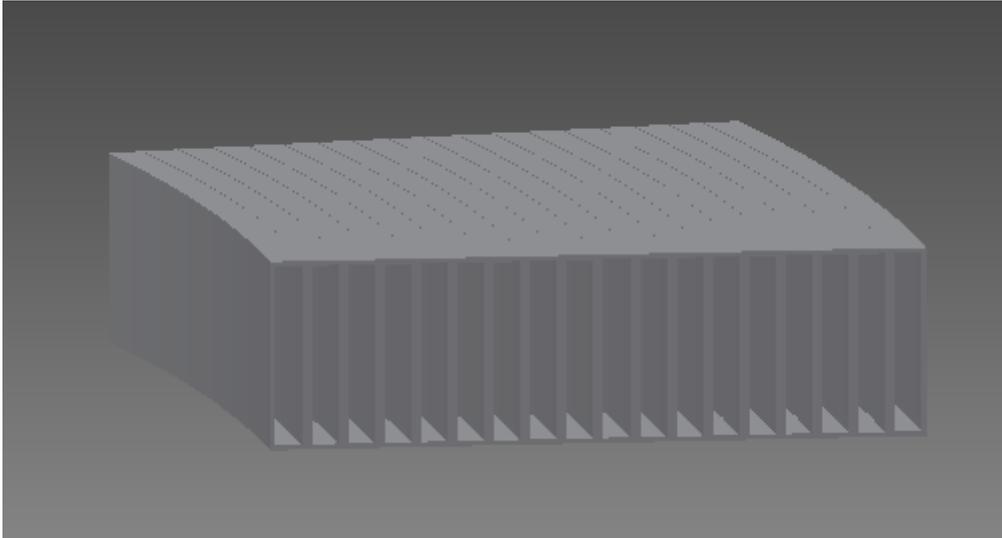


Figura 7.2 Papel aislante realizado en Autodesk Inventor.

7.5.3 Fluido

Para elaborar el fluido, como es una geometría bastante más compleja que es resto de elementos del transformador, se realizará dividida en distintas partes. Por lo tanto, se realizan distintos tipos de piezas para conseguir al unirlas la geometría del fluido completa

- Canal exterior

Para la realización del canal exterior, se necesita tres tipos de piezas. La primera de ellas es la zona en la que el canal exterior está en contacto con el papel. Por lo tanto, se realiza el rectángulo y se revoluciona, aunque en este caso no será de 10° la misma, sino menor, ya que los sticks e intersticks reducen el tamaño del canal exterior

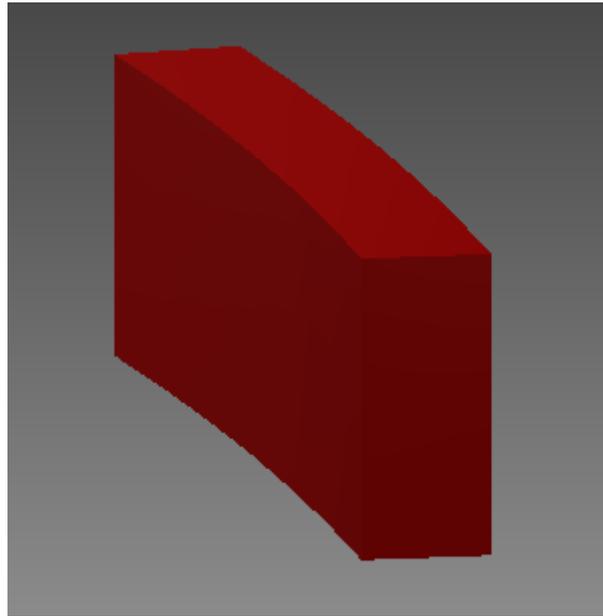


Figura 7.3 Primera pieza del canal exterior.

La segunda y tercera piezas serán la intersección entre el canal exterior y los canales horizontales ancho y estrecho que pasan entre los discos

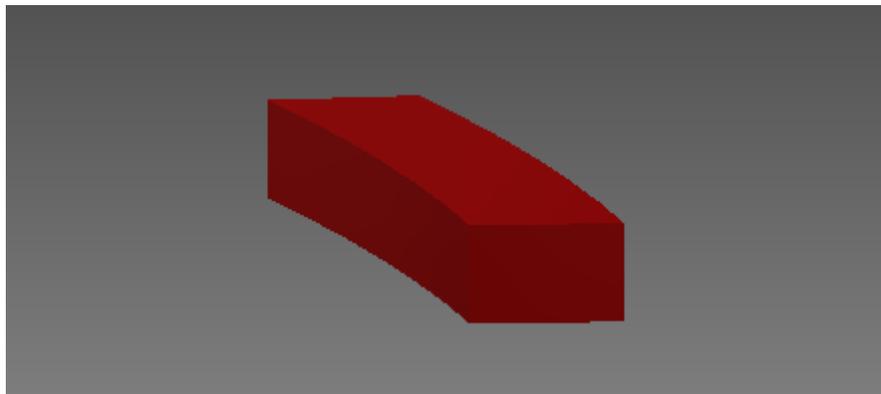


Figura 7.4 Intersección entre canal exterior y canal horizontal ancho.

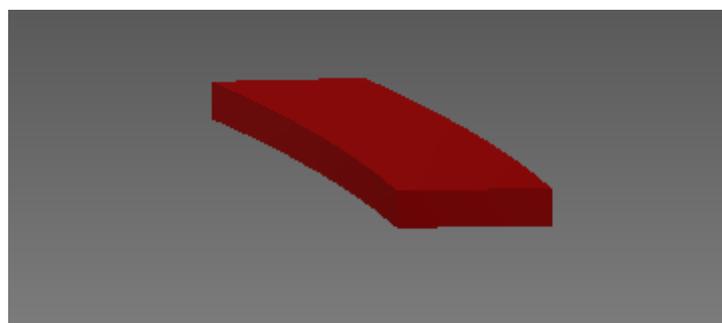


Figura 7.5 Intersección entre canal exterior y canal horizontal estrecho.

- Canal interior

El canal interior se realiza con el mismo método con el que se realizó con anterioridad el canal exterior. Además, comparte las piezas y prácticamente toda la geometría, a excepción de que la revolución necesaria en este caso será menor que la necesaria en el canal exterior

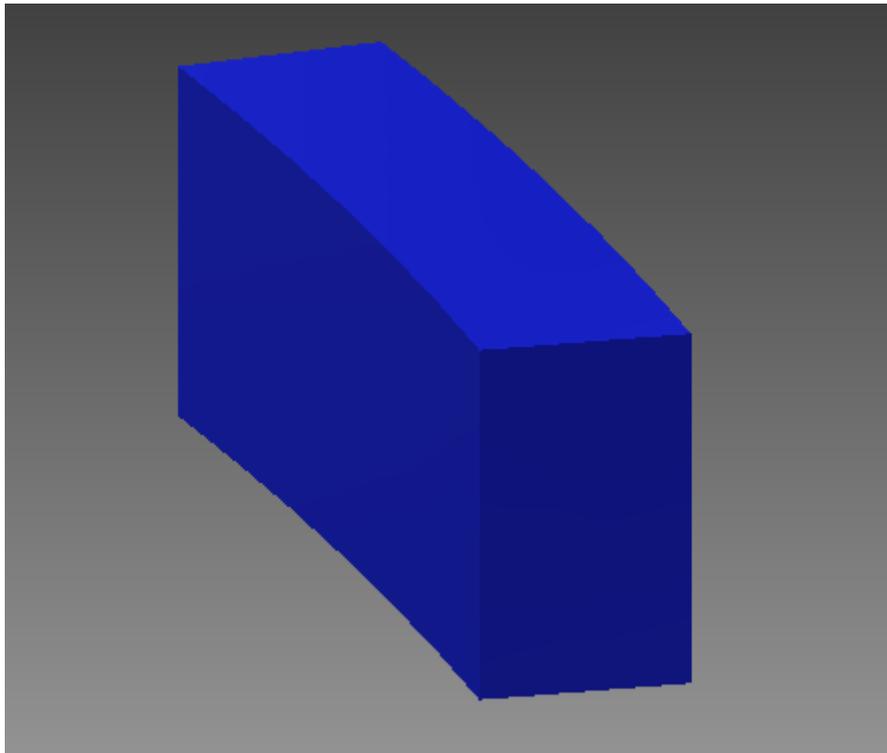


Figura 7.6 Primera pieza del canal interior.

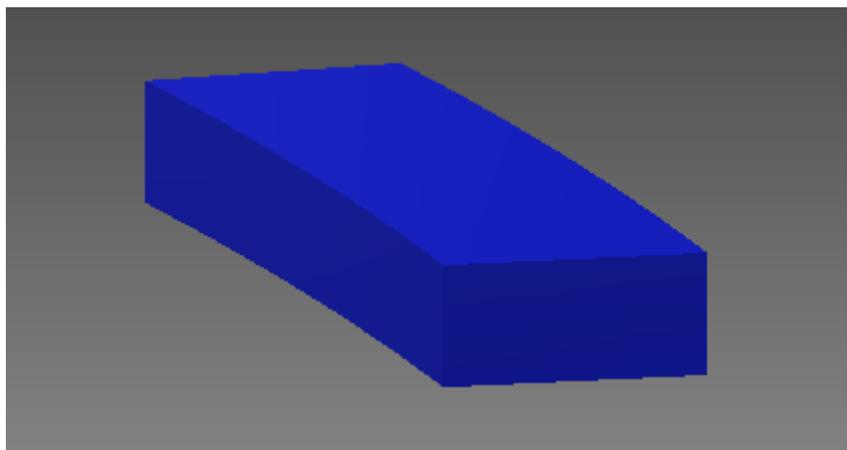


Figura 7.7 Intersección entre canal interior y canal horizontal ancho.

Como es en este canal en el que se produce la salida del fluido hacia el paso superior, la intersección entre el canal horizontal superior y el canal interior tendrá en su geometría un mayor tamaño que la pieza del canal exterior correspondiente.

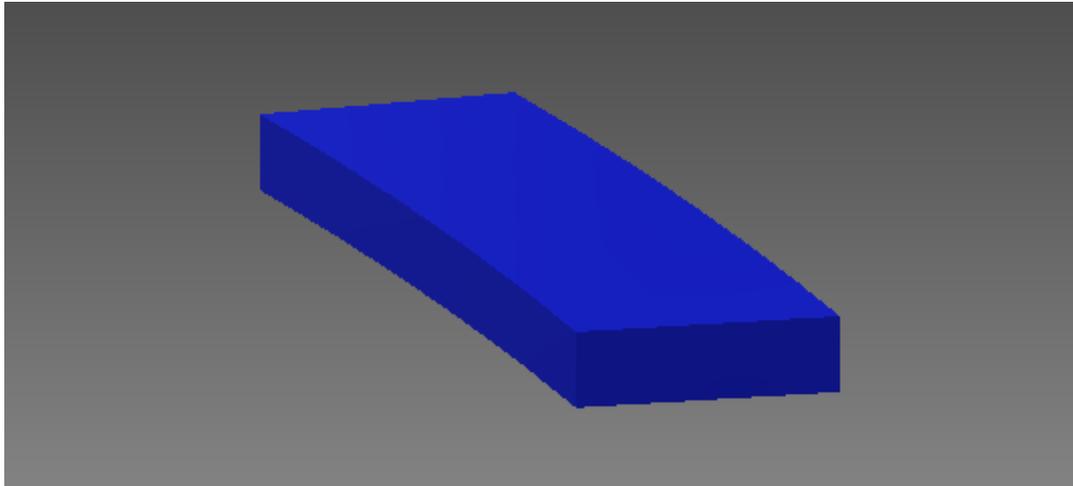


Figura 7.8 Intersección entre canal interior y canal horizontal estrecho.

- Canales horizontales

La última parte del fluido que será necesaria realizar son los canales horizontales, realizados con el mismo método utilizado para el resto de piezas ya obtenidas. En este caso se necesitarán dos piezas distintas; el canal inferior será el doble de ancho que el superior, ya que la otra mitad del canal superior se encuentra ya en el paso superior que no se analiza en este documento.

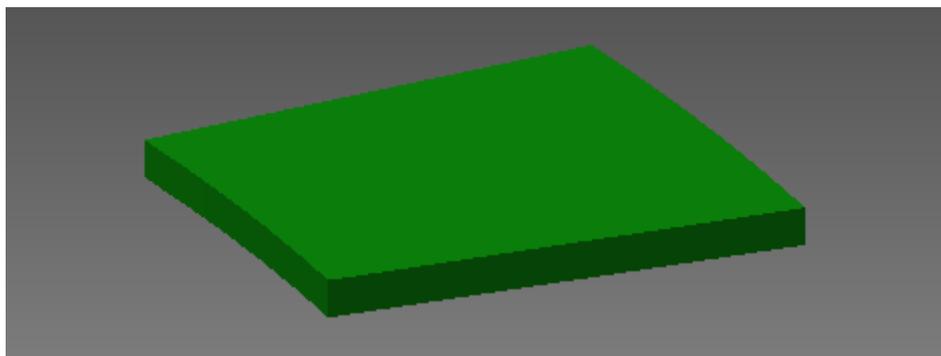


Figura 7.9 Canal horizontal ancho

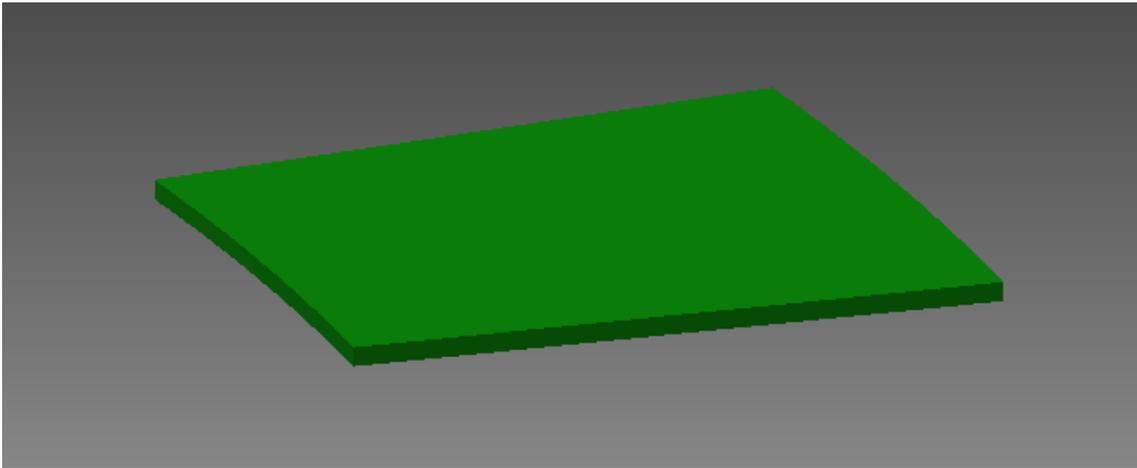


Figura 7.10 Canal horizontal estrecho

7.6 ENSAMBLAJE DE LA GEOMETRÍA

Una vez realizado cada tipo de pieza hay que realizar la geometría, haciendo el ensamblaje correspondiente entre las piezas creadas. Para ello se ejecuta el programa Autodesk Inventor en el modo normal.iam, correspondiente al ensamblaje de piezas. Este modo del programa permite importar las piezas creadas previamente, tantas copias como se desee, y además permite insertar elementos normalizados en el caso de que se necesiten.

Para construir el modelo es necesario importar el número exacto de piezas que lo componen, aunque se pueden ir importando a medida que se va ensamblando el modelo para mayor comodidad. El método utilizado para ensamblar las piezas es seleccionar la opción restringir y dentro de ella elegir la opción insertar. Esta función permite seleccionar dos aristas curvas que coincidan y tengan el mismo eje y las sitúa haciendo que coincidan ambas aristas. Usando ese método se consigue ensamblar la sección del transformador.

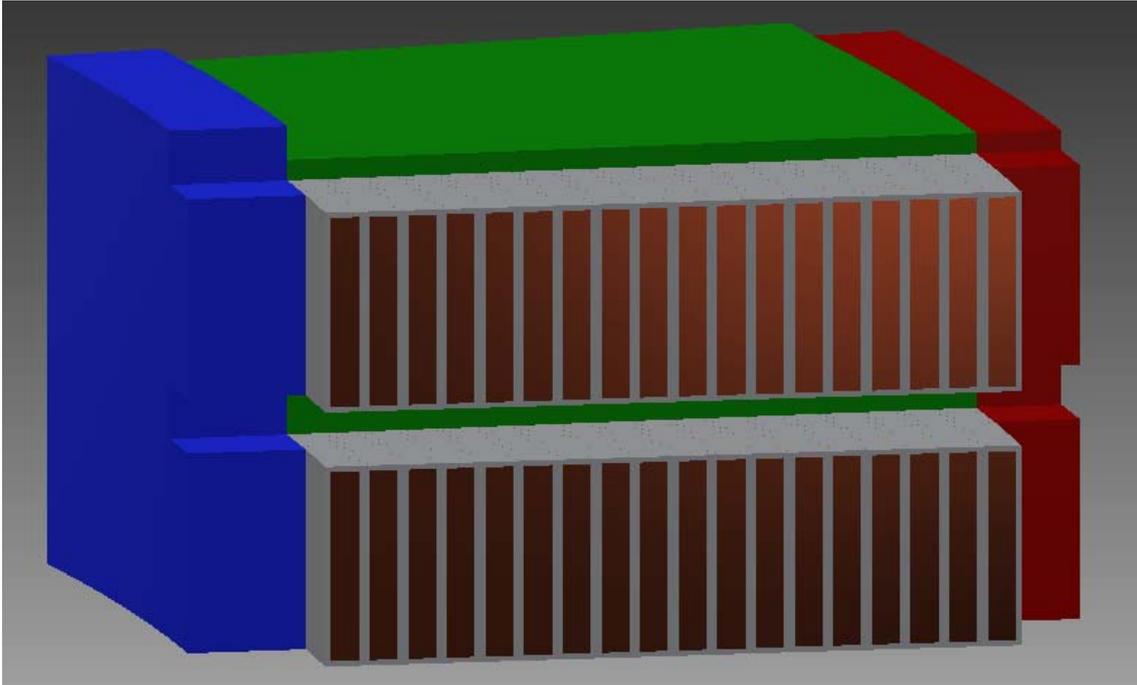


Figura 7.11 Dos discos con sus piezas ensambladas

7.7 OBTENCIÓN DEL MODELO FÍSICO

Una vez construida la geometría con ayuda de un programa auxiliar, se procede a la obtención del modelo físico con el programa Comsol Multiphysics, siguiendo la metodología descrita anteriormente.

En primer lugar, se ejecuta el programa Comsol Multiphysics y en la primera ventana se selecciona el espacio dimensional en el que se desea trabajar y la física que se quiere considerar. En este caso se selecciona un espacio 3D considerando la transferencia de calor conjugado CHT.



Figura 7.12 Interfaz inicial de Comsol Multiphysics

Una vez seleccionado el espacio a trabajar, se procede a importar la geometría. El programa permite importar archivos .iam correspondientes a los ensamblajes en Autodesk Inventor que previamente se ha comentado. Para ello se selecciona con el botón derecho en Geometría y se elige Importar. Una vez hecho aparece una opción de navegador para seleccionar el archivo a importar y una vez seleccionado se marca la opción Importar para cargar la geometría al programa.

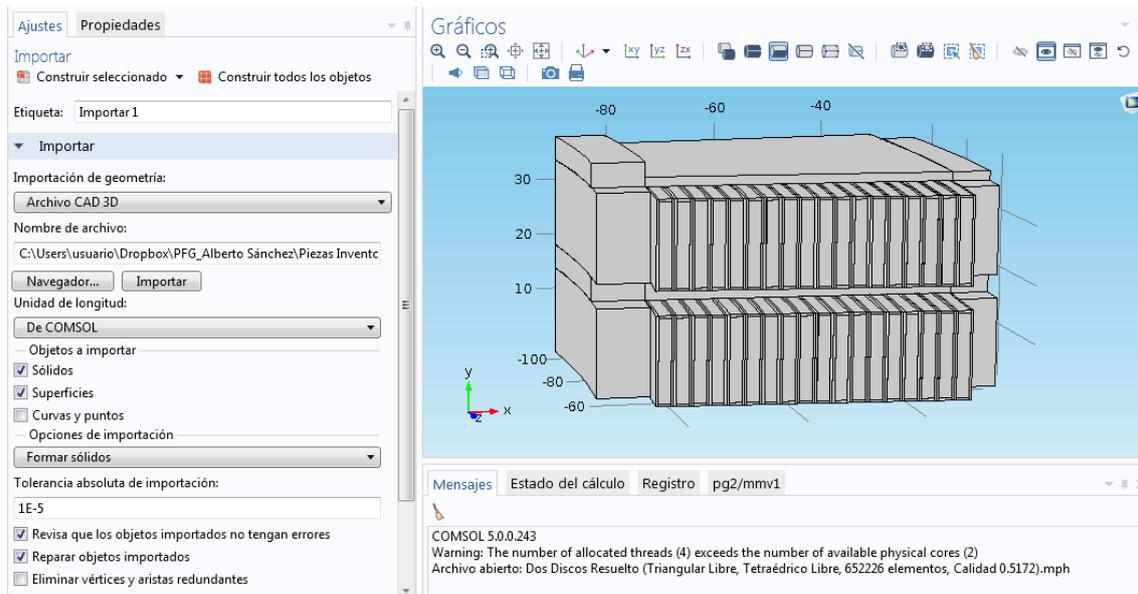


Figura 7.13 Interfaz de importación de geometría

El siguiente paso consiste en definir los valores de las constantes que aparecen en el modelo, tales como propiedades de materiales, valores iniciales, etc. Para ello se hace click derecho en Definiciones Globales y se selecciona Parámetros. Allí se introducen los valores que aparecen en la figura 7.14.

Parámetros

▼ Parámetros

» Nombre	Expresión	Valor	Descripción
k_Cu	401[W/(m*K)]	401 W/(m·K)	Conductivida
rho_Cu	8933[kg/m^3]	8933 kg/m ³	Densidad del
Cp_Cu	385[J/(kg*K)]	385 J/(kg·K)	Calor especifi
k_carton	0.25[W/(m*K)]	0.25 W/(m·K)	Conductivida
rho_carton	1150[kg/m^3]	1150 kg/m ³	Densidad del
Cp_carton	2093.5[J/(kg*K)]	2093.5 J/(kg·K)	Calor especifi
k_madera	0.15[W/(m*K)]	0.15 W/(m·K)	Conductivida
rho_madera	418.5[kg/m^3]	418.5 kg/m ³	Densidad de l
Cp_madera	2710[J/(kg*K)]	2710 J/(kg·K)	Calor especifi
k_papel	0.19[W/(m*K)]	0.19 W/(m·K)	Conductivida
rho_papel	930[kg/m^3]	930 kg/m ³	Densidad del
Cp_papel	1340[J/(kg*K)]	1340 J/(kg·K)	Calor especifi
Tinlet	46.7[degC]	319.85 K	Temperatura
PQ1	(1.88*360*(2)/36)...	37.6 W	Potencia calo
Vinlet_i	35.07[mm/s]	0.03507 m/s	Velocidad de
Vinlet_o	41.1[mm/s]	0.0411 m/s	Velocidad de
fm_ent_i	(0.357/36)[kg/s]	0.0099167 kg/s	Flujo másico

Figura 7.14 Parámetros constantes en la simulación realizada

En el caso de las propiedades del fluido, se introducen como funciones analíticas en los casos de densidad, conductividad térmica y calor específico.

Analtico

Gráfico Crear gráfico

Etiqueta: k

Nombre de función: cond_term_AM

▼ Definición

Expresión: $0.1509-7.101e-5 \cdot T$

Argumentos: T

Derivadas: Automático

Extensión periódica

▼ Unidades

Argumentos: K

Función: W/(m*K)

Avanzado

▼ Parámetros de gráfico

» Argumento	Límite inferior	Límite superior
T	0	450

Figura 7.15 Definición de las propiedades del fluido

Una vez definidos los valores constantes del modelo y las propiedades de los materiales el siguiente paso consiste en asignar el material correspondiente a cada dominio del modelo. Para ello se asignan los materiales correspondientes a los dominios de la geometría.

- Cobre: Discos.
- Aceite mineral: Fluido.
- Papel: Aislante de los devanados.

Estos datos se introducen en la pestaña Materiales, seleccionando un nuevo material e introduciendo los datos de densidad, conductividad térmica y calor específico del material correspondiente.

Para finalizar el modelo físico se han de definir las condiciones de contorno que definen el comportamiento del mismo. El programa introduce por defecto que todos los contornos exteriores son adiabáticos, cosa que no es cierta en todos los casos, pero al añadir otra condición de contorno la primera deja de ser efectiva sobre ese contorno. El programa también introduce como valor inicial de temperatura el valor de 0 °C, que hay que sustituirlo por el valor T_0 , correspondiente a 46,7 °C.

El siguiente paso es definir el resto de condiciones de contorno. En primer lugar hay que definir al fluido como tal, ya que el programa no lo reconoce como fluido en caso contrario al ser un material añadido manualmente al modelo. Después hay que determinar el calor generado por los devanados, de valor PQ1. A continuación se definen las velocidades de entrada, por el canal vertical tanto interior como exterior inferior. Se introduce una velocidad de valor 0.03507 m/s en el canal interior mientras que el valor de velocidad en el canal exterior tendrá un valor de 0.0411 m/s . Otra de las condiciones de contorno que añadimos es conocida como condición de no deslizamiento en las paredes exteriores del fluido, por lo que la velocidad en ellos es nula. También se establece que en el contorno inferior la temperatura de entrada del fluido es de 46,7 °C. Además se introduce la condición de $p=0$ en la sección de salida del fluido. Debido a que en el modelo se ha usado un plano de simetría, es necesario introducir al modelo las condiciones de simetría en los fenómenos hidráulicos y térmicos en los contornos contenidos en dicho plano de simetría.

Una vez realizados estos pasos ya se tiene el modelo físico definido y el siguiente paso consiste en establecer el mallado del modelo para la posterior simulación del mismo.

8. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

8.1 INTRODUCCIÓN

Aquí serán expuestos los resultados obtenidos de las 9 simulaciones realizadas y comentadas con anterioridad. Además, se incluirán como final de este capítulo las conclusiones a las que se ha llegado partiendo de los resultados conseguidos en las simulaciones de cada modelo tanto en la temperatura de los componentes del modelo como en la velocidad del aceite mineral utilizado en la refrigeración del modelo.

Los resultados que obtenemos de la simulación dan un análisis de la refrigeración del transformador, a partir de la transferencia de calor entre sólido-líquido y la dinámica de fluidos del aceite. Estos resultados provienen de la simulación del modelo realizada bajo el método de elementos finitos, obteniendo así datos que caracterizan el aceite tanto térmica como dinámicamente y obteniendo distribuciones de temperaturas de igual forma en fluido y componentes sólidos del mismo.

8.2 MALLADO

La elaboración del mallado es la última etapa previa a la resolución del modelo y de ello dependen los resultados obtenidos. Cuanto menor sea el tamaño de los elementos, mayor será la precisión con la que la herramienta de cálculo resuelva el modelo y mayor será el coste computacional que supone realizar la simulación.

Tanto el tipo de elementos como la cantidad de estos influye en el resultado obtenido. En este estudio se realizan simulaciones empleando tres tipos distintos de mallado, primera de las bases del estudio:

- Superficies malladas de forma triangular libre con el dominio mallado de forma tetraédrico libre
- Superficies malladas de forma cuadrática libre, añadiendo aristas diagonales en los elementos cuadráticos con el dominio mallado de forma tetraédrico libre

- En el caso del modelo físico carente de papel, usaremos un mapeado que genera elementos cuadráticos en las superficies y generando un barrido en los dominios para obtener elementos cúbicos.

Se utilizan de cada uno de estos tipos de mallado tres niveles distintos, que cambian únicamente en el número de elementos que contiene cada malla, para así obtener tres niveles distintos de mallado y ver de qué manera afecta esto al estudio.

En los siguientes apartados se comentarán las características principales de las geometrías sobre las que ha sido realizado este tipo de mallado. Dentro del programa Comsol Multiphysics, contamos con un apartado que nos permite evaluar y mostrar las estadísticas más importantes de los mismos.

Las estadísticas de este mallado serán expresadas en tablas, donde veremos todos los datos proporcionados por el programa al evaluar la malla creada en cada caso.

A los mallados se les dará el valor de nivel 1 a 3 siendo 1 el de menor número de elementos mientras que 3 será el de mayor número de elementos

8.2.1 Triangular libre y tetraédrico libre

- Nivel 1 de mallado

PROPIEDAD	VALOR
Elementos tetraédricos	652226
Elementos triangulares	187973
Elementos de arista	22464
Elementos de vértice	943

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Tetraédricos
Calidad mínima de elemento	0.003465
Calidad media de elemento	0.5172
Ratio de volumen de elemento	0.002305
Volumen de malla	134800 mm^3

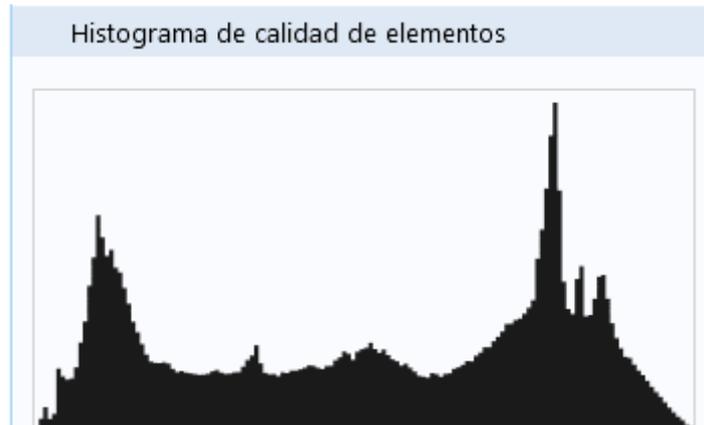


Figura 8.1 Histograma de calidad de elementos tetraédricos

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Triangulares
Calidad mínima de elemento	0.0966
Calidad media de elemento	0.8563
Ratio de área de elemento	0.01484
Área de cara de malla	138300 mm ²

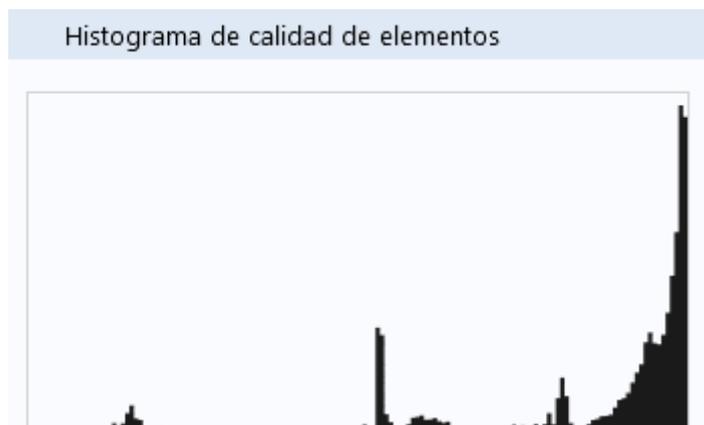


Figura 8.2 Histograma de calidad de elementos triangulares

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Arista
Tasa máxima de crecimiento	6.279
Tasa media de crecimiento	1.632
Ratio de longitud de elemento	0.1905
Longitud de arista de malla	27690 mm

- Nivel 2 de mallado

PROPIEDAD	VALOR
Elementos tetraédricos	1010523

Elementos triangulares	248499
Elementos de arista	25772
Elementos de vértice	943

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Tetraédricos
Calidad mínima de elemento	0.009957
Calidad media de elemento	0.6091
Ratio de volumen de elemento	0.008245
Volumen de malla	134800 mm^3



Figura 8.3 Histograma de calidad de elementos tetraédricos

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Triangulares
Calidad mínima de elemento	0.1952
Calidad media de elemento	0.8971
Ratio de área de elemento	0.02041
Área de cara de malla	138300 mm^2

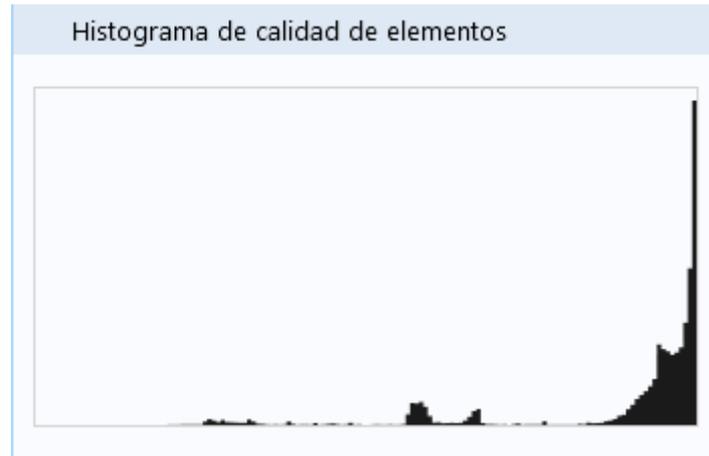


Figura 8.4 Histograma de calidad de elementos triangulares

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Arista
Tasa máxima de crecimiento	5.583
Tasa media de crecimiento	1.602
Ratio de longitud de elemento	0.2337
Longitud de arista de malla	27690 mm

- Nivel 3 de mallado

PROPIEDAD	VALOR
Elementos tetraédricos	1235936
Elementos triangulares	255622
Elementos de arista	25930
Elementos de vértice	943

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Tetraédricos
Calidad mínima de elemento	0.009957
Calidad media de elemento	0.6393
Ratio de volumen de elemento	0.008262
Volumen de malla	134800 mm ³



Figura 8.5 Histograma de calidad de elementos tetraédricos

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Triangulares
Calidad mínima de elemento	0.1952
Calidad media de elemento	0.8998
Ratio de área de elemento	0.03022
Área de cara de malla	138300 mm^2

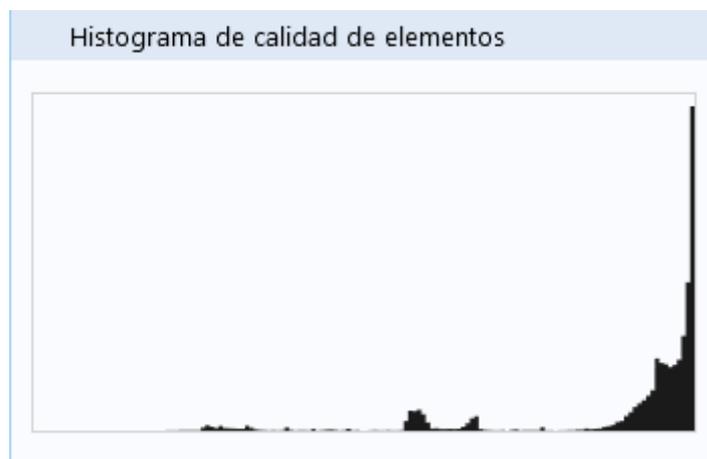


Figura 8.6 Histograma de calidad de elementos triangulares

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Arista
Tasa máxima de crecimiento	5.583
Tasa media de crecimiento	1.61
Ratio de longitud de elemento	0.2424
Longitud de arista de malla	27690 mm

8.2.2 Cuadrático libre y tetraédrico libre

- Nivel 1 de mallado

PROPIEDAD	VALOR
Elementos tetraédricos	777865
Elementos triangulares	232218
Elementos de arista	25713
Elementos de vértice	943

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Tetraédricos
Calidad mínima de elemento	0.0
Calidad media de elemento	0.4773
Ratio de volumen de elemento	8.367E-7
Volumen de malla	134800 mm^3

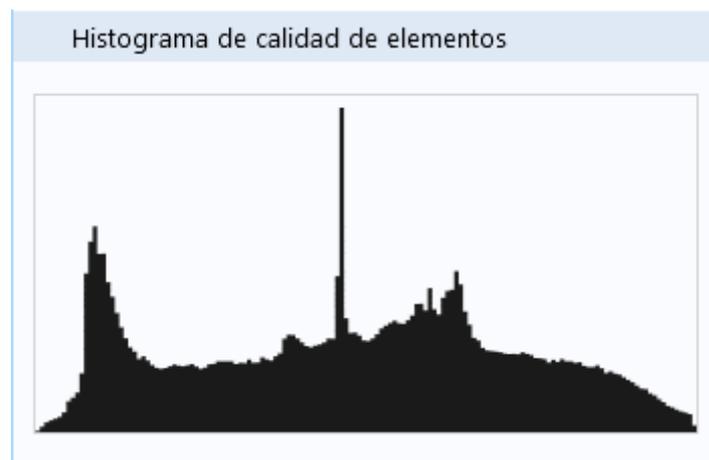


Figura 8.7 Histograma de calidad de elementos tetraédricos

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Triangulares
Calidad mínima de elemento	0.0508
Calidad media de elemento	0.8096
Ratio de área de elemento	0.004798
Área de cara de malla	138300 mm^2

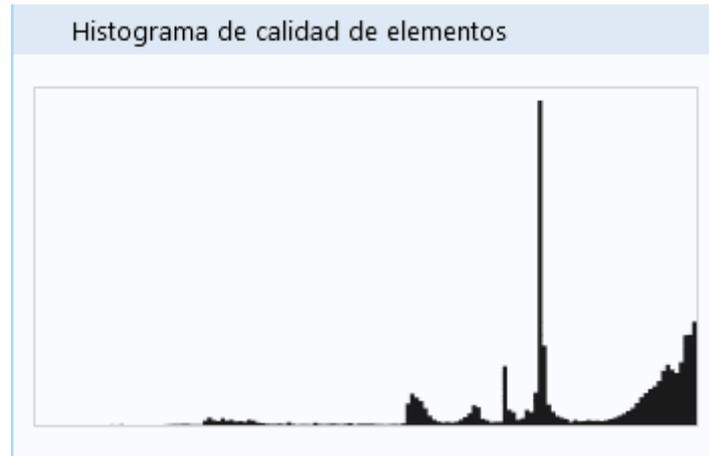


Figura 8.8 Histograma de calidad de elementos triangulares

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Arista
Tasa máxima de crecimiento	9.23
Tasa media de crecimiento	1.741
Ratio de longitud de elemento	0.2524
Longitud de arista de malla	27690 mm

- Nivel 2 de mallado

PROPIEDAD	VALOR
Elementos tetraédricos	652226
Elementos triangulares	187973
Elementos de arista	22464
Elementos de vértice	943

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Tetraédricos
Calidad mínima de elemento	0.0
Calidad media de elemento	0.5255
Ratio de volumen de elemento	8.367E-7
Volumen de malla	134800 mm^3

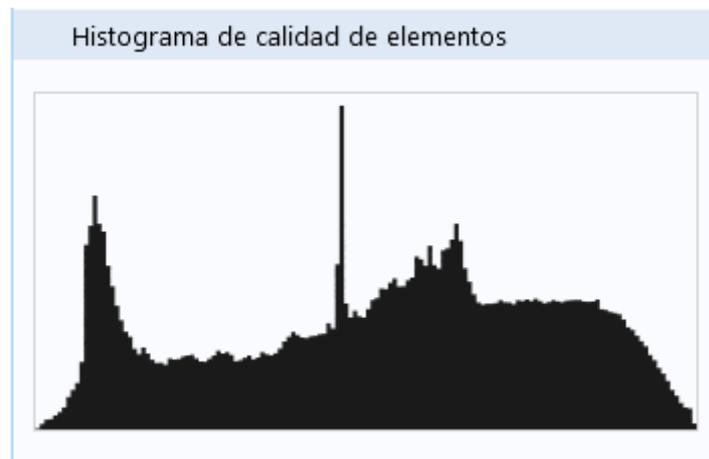


Figura 8.9 Histograma de calidad de elementos tetraédricos

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Triangulares
Calidad mínima de elemento	0.07903
Calidad media de elemento	0.8147
Ratio de área de elemento	0.01103
Área de cara de malla	138300 mm^2

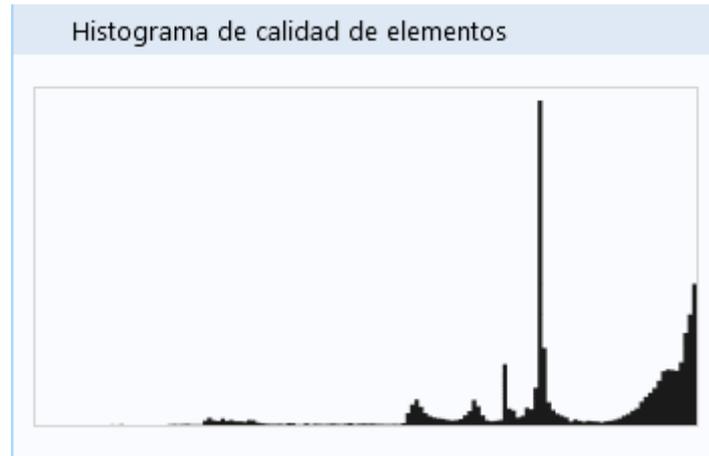


Figura 8.10 Histograma de calidad de elementos triangulares

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Arista
Tasa máxima de crecimiento	9.257
Tasa media de crecimiento	1.691
Ratio de longitud de elemento	0.2524
Longitud de arista de malla	27690 mm

- Nivel 3 de mallado

PROPIEDAD	VALOR
Elementos tetraédricos	1265862
Elementos triangulares	259683
Elementos de arista	26331
Elementos de vértice	943

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Tetraédricos
Calidad mínima de elemento	0.0
Calidad media de elemento	0.5797
Ratio de volumen de elemento	8.367E-7
Volumen de malla	134800 mm ³

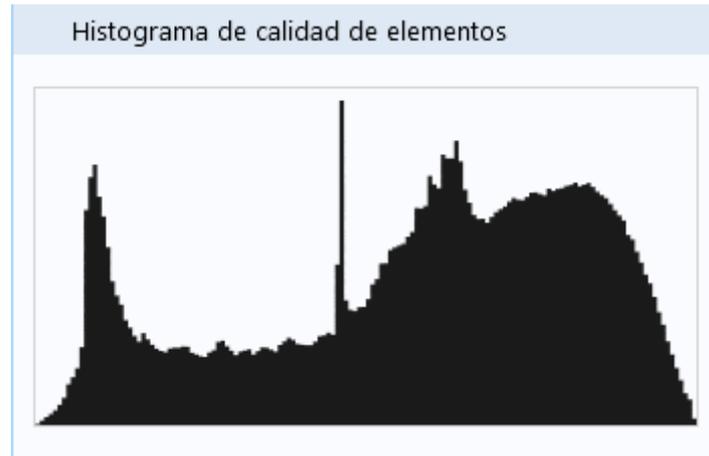


Figura 8.11 Histograma de calidad de elementos tetraédricos

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Triangulares
Calidad mínima de elemento	0.09766
Calidad media de elemento	0.8239
Ratio de área de elemento	0.007395
Área de cara de malla	138300 mm^2

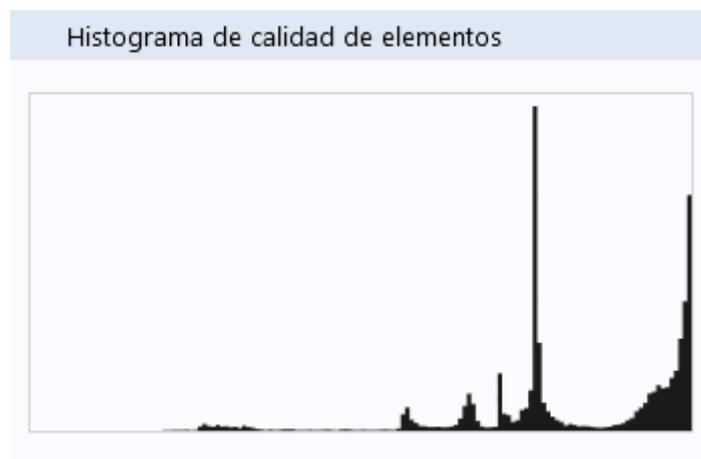


Figura 8.12 Histograma de calidad de elementos triangulares

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Arista
Tasa máxima de crecimiento	8.325
Tasa media de crecimiento	1.651
Ratio de longitud de elemento	0.2524
Longitud de arista de malla	27690 mm

8.2.3 Mapeado y barrido

- Nivel 1 de mallado

PROPIEDAD	VALOR
Elementos hexaedros	239856
Elementos cuadriláteros	69404
Elementos de arista	7544
Elementos de vértice	259

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Hexaedros
Calidad mínima de elemento	0.1688
Calidad media de elemento	0.5327
Ratio de volumen de elemento	0.04007
Volumen de malla	133200 mm^3



Figura 8.13 Histograma de calidad de elementos hexaedros

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Cuadriláteros
Calidad mínima de elemento	0.3491
Calidad media de elemento	0.8195
Ratio de área de elemento	0.03659
Área de cara de malla	62010 mm^2



Figura 8.14 Histograma de calidad de elementos cuadriláteros

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Arista
Tasa máxima de crecimiento	1.124
Tasa media de crecimiento	1
Ratio de longitud de elemento	0.1724
Longitud de arista de malla	7537 mm

- Nivel 2 de mallado

PROPIEDAD	VALOR
Elementos hexaedros	1624992
Elementos cuadriláteros	301546
Elementos de arista	16535
Elementos de vértice	259

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Hexaedros
Calidad mínima de elemento	0.2568
Calidad media de elemento	0.6121
Ratio de volumen de elemento	0.1924
Volumen de malla	133200 mm ³



Figura 8.15 Histograma de calidad de elementos hexaedros

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Cuadriláteros
Calidad mínima de elemento	0.7414
Calidad media de elemento	0.9677
Ratio de área de elemento	0.2181
Área de cara de malla	62010 mm ²

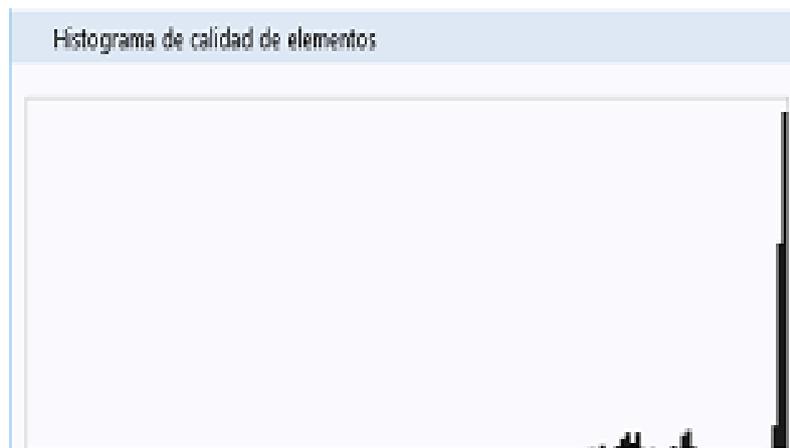


Figura 8.16 Histograma de calidad de elementos cuadriláteros

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Arista
Tasa máxima de crecimiento	1.124
Tasa media de crecimiento	1
Ratio de longitud de elemento	0.4312
Longitud de arista de malla	7537 mm

- Nivel 3 de mallado

PROPIEDAD	VALOR
Elementos hexaedros	2576888
Elementos cuadriláteros	359672
Elementos de arista	17577
Elementos de vértice	259

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Hexaedros
Calidad mínima de elemento	0.6569
Calidad media de elemento	0.8932
Ratio de volumen de elemento	0.05179
Volumen de malla	133200 mm^3



Figura 8.17 Histograma de calidad de elementos hexaedros

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Cuadriláteros
Calidad mínima de elemento	0.452
Calidad media de elemento	0.8589
Ratio de área de elemento	0.0587
Área de cara de malla	62010 mm^2



Figura 8.18 Histograma de calidad de elementos cuadriláteros

PROPIEDAD	VALOR
Tipo de elemento	Arista
Tasa máxima de crecimiento	1.047
Tasa media de crecimiento	1.0
Ratio de longitud de elemento	0.2322
Longitud de arista de malla	7537 mm

8.2.4 Resultados

En las figuras de los apartados 8.2.1, 8.2.2 y 8.2.3 se muestran las características principales de cada uno de los mallados utilizados. Las tablas contienen el número de elementos de cada tipo y nivel de mallado, además de la calidad mínima y media de cada uno de ellos y el ratio de crecimiento de los mismos.

Comparando los números expresados en cada una de las tablas, se observa la mayor calidad de elemento del mapeado y barrido, además de tener un mayor número de elementos en el nivel 3 de mallado, mientras que en los niveles menores, la calidad de los distintos mallados son más aproximados entre ellos.

Por otro lado, estudiando las calidades mínimas, se observa una clara diferencia entre los dos primeros tipos de mallado y el mapeado. Mientras que para tanto el triangular como el cuadrático tenemos calidades mínimas de

valores próximos a cero, en el mapeado la calidad mínima del mismo tiene para sus dos primeros niveles valores cercanos a 0.2 y para el tercer nivel de mallado un valor de 0.65. Esto indica que la deformación del mapeado es mucho menor que la deformación de los elementos de los mallados triangulares y cuadráticos.

8.2.5 Resolvedor utilizado en la simulación en función del mallado.

Después de llevar a cabo el mallado de la pieza, se pasa a la resolución del modelo.

Antes de comenzar la simulación, se determinará la selección del estudio y el método de resolución que se desea emplear. En este caso de estudio, se empleará un estudio estacionario.

Además, se emplearán distintos tipos de método de resolución, buscándose el más óptimo en cada caso dependiendo de la geometría y mallado a estudiar. Así pues, se utilizarán tanto el método directo como el método iterativo en la resolución de los mismos. En el caso del mallado triangular libre, tetraédrico libre utilizamos el tipo de método directo mientras que en los otros dos casos utilizaremos el método iterativo.

8.3 CALIDAD DEL MALLADO

La calidad es una característica muy influyente en el posterior resultado de la simulación. Una mejor calidad conlleva un resultado más aproximado a la realidad.

En este estudio se procedió al mallado de una geometría radial, por lo que los elementos usados (tetraedros y cubos) deben deformarse para amoldarse por completo a esa geometría. Así, cuantos más elementos utilicemos, mejor amoldamiento conseguiremos, obteniendo así una calidad de mallado superior.

Como contrapunto, la utilización de un mayor número de elementos ocasiona que necesitemos una mayor potencia computacional para poder realizar la simulación. Como esta potencia es limitada, se buscará un equilibrio entre el número de elementos y su calidad, además de usar tres tipos de elementos

distintos para obtener varios resultados, pudiendo hacer una comparativa entre los mismos.

En las figuras 8.19, 8.20 y 8.21 se muestran la calidad de los elementos de volumen de cada uno de los mallados.

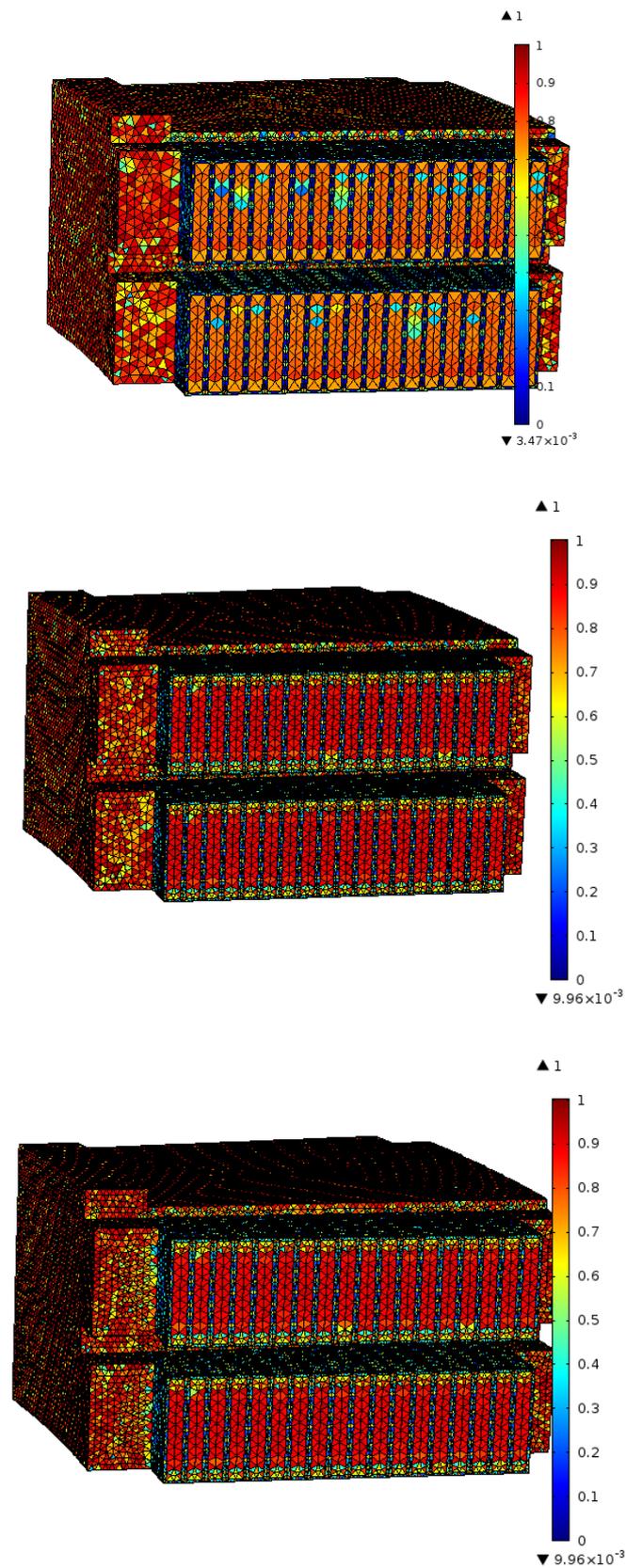


Figura 8.19 Calidad de elementos volumétricos del mallado 1

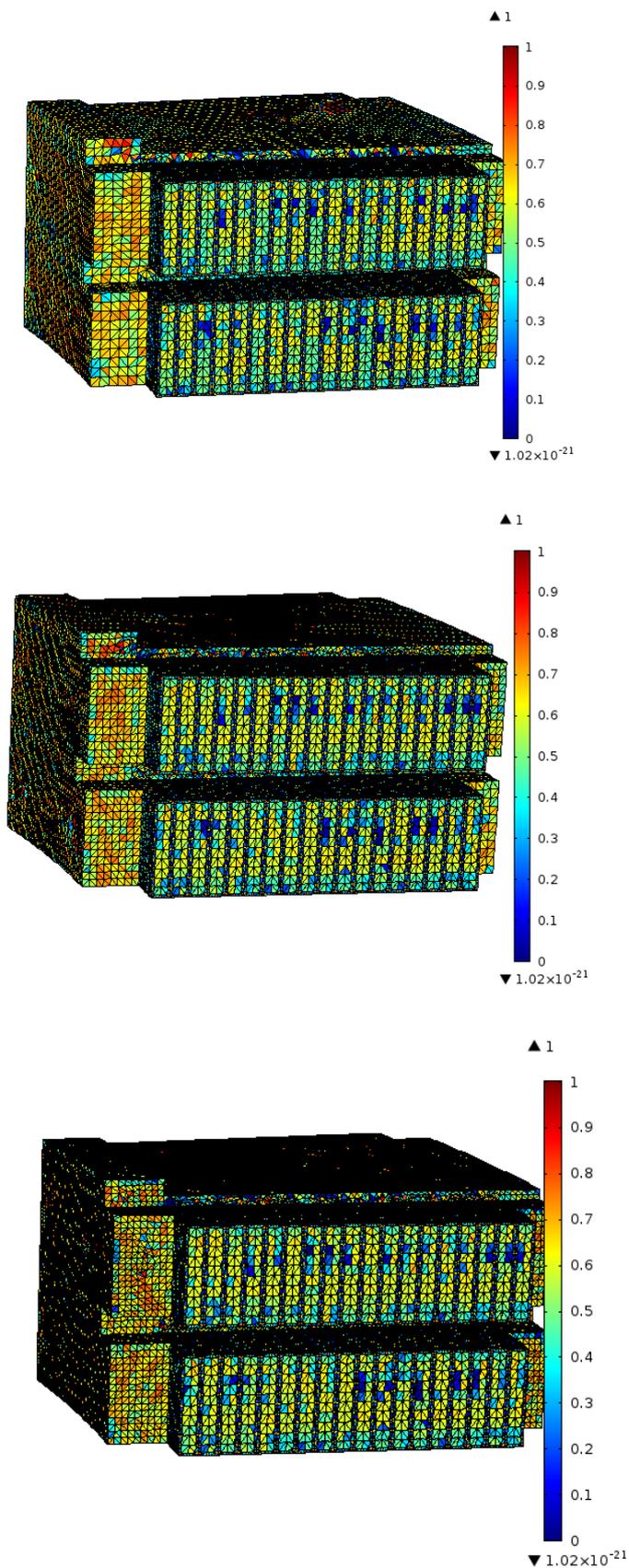


Figura 8.20 Calidad de elementos volumétricos del mallado 2

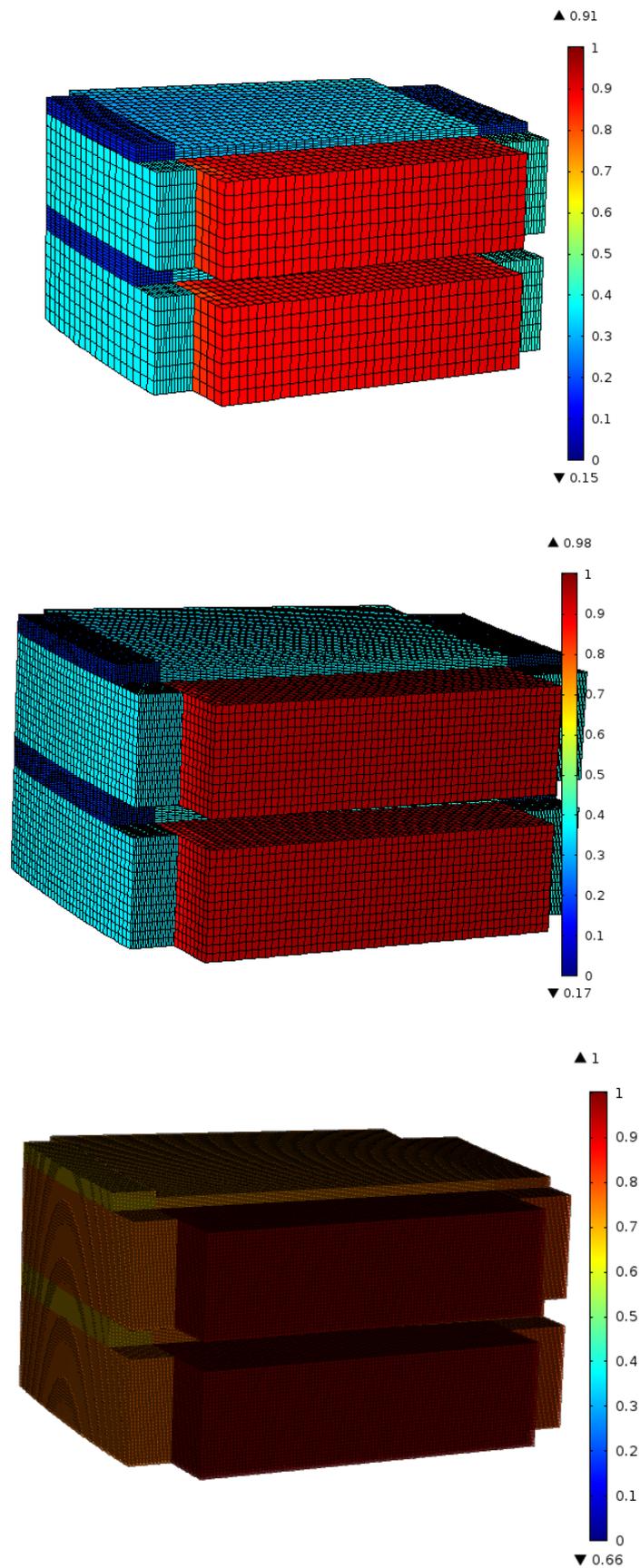


Figura 8.21 Calidad de elementos volumétricos del mallado 3

Como se puede observar en las Figuras 8.19 y 8.20, la calidad de las zonas estrechas y las esquinas es bastante baja comparada con el resto del mallado. Esto es debido a la complicación para mallar esas zonas abarcando la totalidad del volumen de la geometría. Son esos lugares en los que se provoca una grave deformación de los elementos de malla y donde el resultado obtenido puede ser más incierto.

Por otro lado, los elementos centrales de grandes volúmenes como es el caso de los canales verticales o el cobre tienen una buena calidad de mallado, por lo que el resultado en estas zonas podrá ser preciso.

Realizando una comparativa de las tres figuras, podemos observar como el mapeado tiene una mayor uniformidad en cuanto a la calidad de sus elementos. Esto es un claro indicio de que el mapeado y barrido es el más preciso de los tres tipos de mallados utilizados en el estudio.

8.4 RESULTADOS TÉRMICOS

8.4.1 Introducción

Una de las formas más sencillas e intuitivas de apreciar el funcionamiento de la refrigeración en un transformador se consigue por medio de la distribución de temperaturas. Esta refrigeración es un dato importante, debido a que cualquier sobrecalentamiento en un componente de la máquina reduce de manera ostensible la vida útil del transformador y puede causar averías de distinta consideración causadas por cortocircuitos, incendios, etc... Por lo tanto, el conocimiento de la posición de los puntos de máxima temperatura o puntos calientes del transformador es importante con el fin de prevenir un prematuro deterioro del papel aislante que recubre los devanados de cobre y consecuentemente una avería.

En las figuras siguientes se mostrarán las distribuciones de temperaturas por medio de colores, obtenidas en el fluido refrigerante para cada uno de los distintos mallados y número de elementos de los mismos empleados. Así, se podrá disponer de una visualización de comparación de las distribuciones de temperaturas en cada caso estudiado.

8.4.2 Malla triangular libre, tetraédrico libre

En la figura 8.22 se puede observar la distribución de temperaturas en la geometría entera de los dos discos estudiados para cada nivel de mallado. En las figuras, nombraremos al mallado de 652226 elementos como mallado nivel 1, al mallado de 1010523 elementos como mallado nivel 2 y al mallado de 1235936 elementos como mallado nivel 3. En ella se puede ver como a medida que utilizamos un mallado de mayor número de elementos y una mayor calidad de elemento, la temperatura detectada por el resolvedor es mayor.

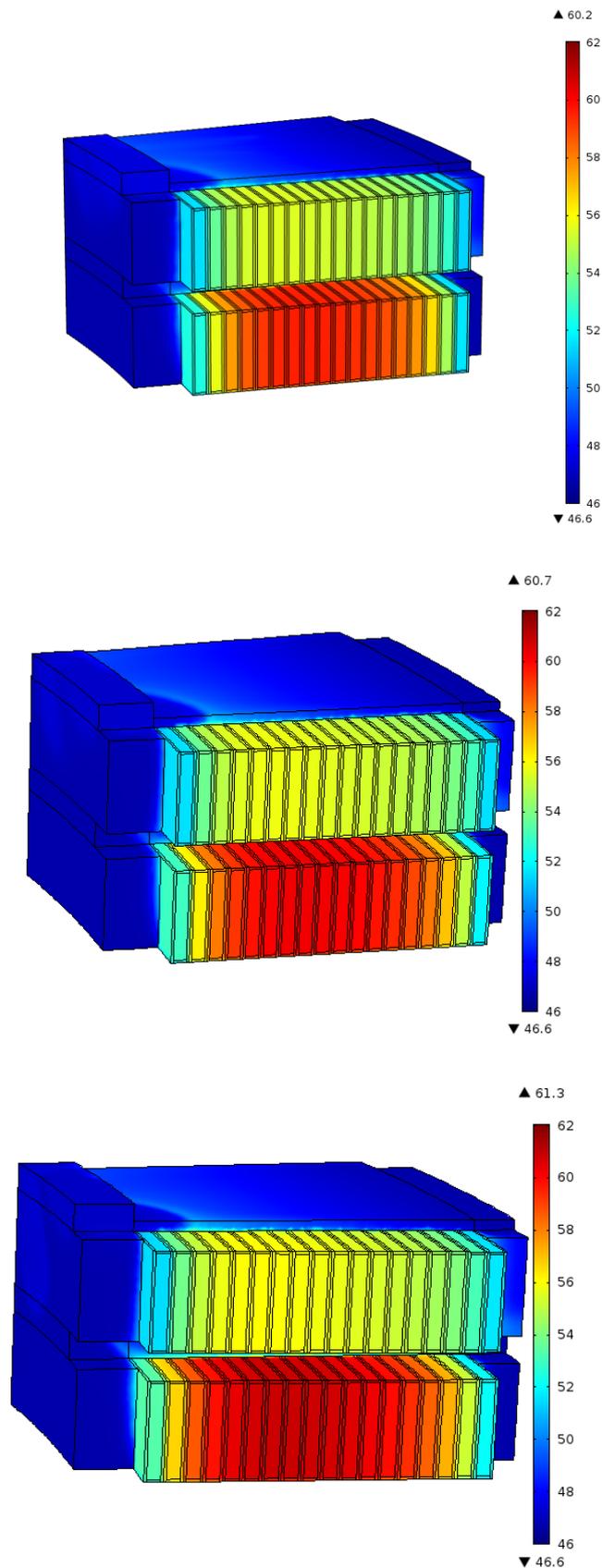


Figura 8.22 Distribución de temperaturas con tres niveles de mallado

En la figura 8.22 se puede observar como las temperaturas de los conductores centrales es mayor que la temperatura de los conductores laterales. Esto es debido a la peor refrigeración que tienen los mismos, además de por la mayor temperatura de los conductores adyacentes.

Por otro lado, se observa una mayor temperatura en el disco inferior, que puede tener su causa en una menor refrigeración, ya que la parte inferior del primer disco tiene una pared adiabática que impide la transferencia de calor fuera de los conductores, por lo que estos únicamente están refrigerados por la parte superior de los mismos, mientras que los conductores del disco superior están refrigerados por sus caras tanto superior como inferior.

Para poder observar de un mejor modo la distribución de temperaturas que se da tanto en los devanados, el papel y el fluido refrigerante, se realizará un corte vertical. En la Figura 8.23, se puede apreciar la mayor temperatura de los devanados centrales debido a una peor refrigeración que la que soportan los discos laterales y a recibir una mayor cantidad de calor de los devanados anexos a ellos. Además, se podrá ver la aparición de venas calientes en el fluido formadas a partir de un desprendimiento de la capa límite térmica.

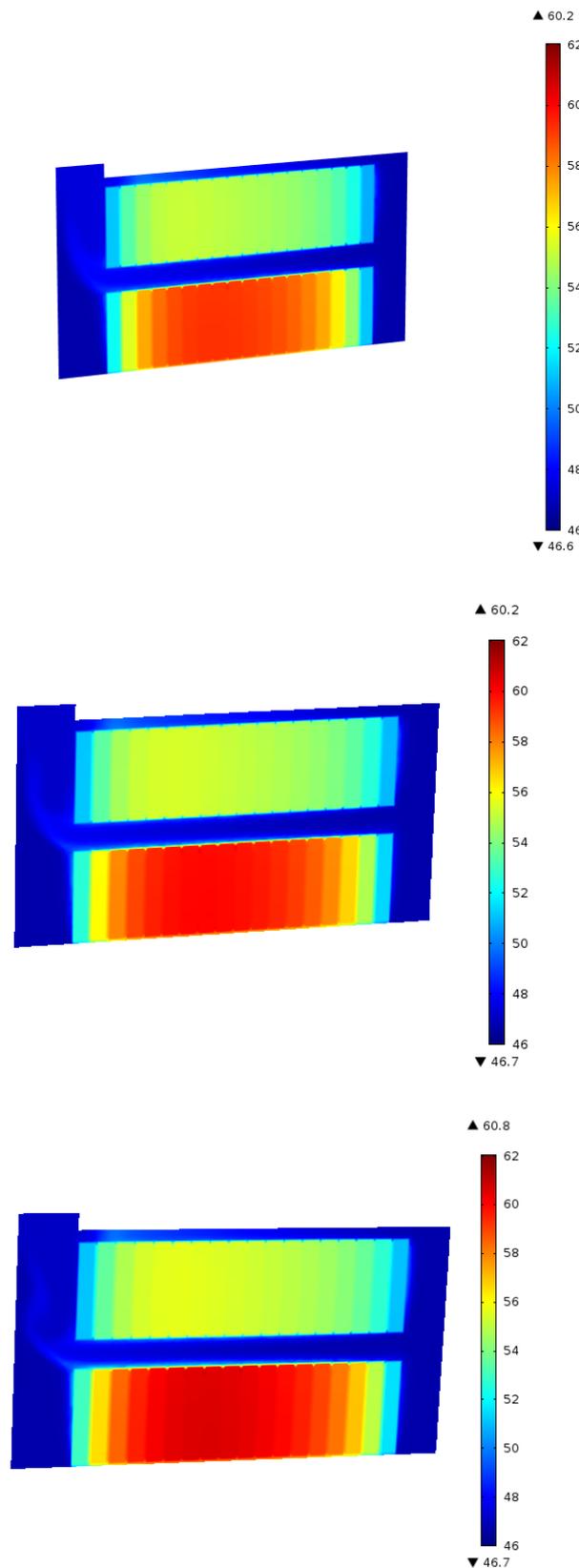


Figura 8.23 Distribución de temperaturas en un plano de corte con tres niveles de mallado

Se puede ver la figura 8.24 la posición del punto de máxima temperatura para cada uno de los casos. En los tres casos, ese punto está situado a una altura de 15.4 cm de la base, localización que se encuentra en el primero de los dos discos estudiados. El valor para cada caso es de 60.2°C, 60,7°C y 61.3°C respectivamente. Así pues, y dependiendo del mallado empleado, se observa un incremento positivo de la temperatura con una variación de 1.1°C entre los casos más extremos que en esta ocasión son el nivel 1 de mallado (652226 elementos) y el nivel 3 de mallado (1235936 elementos).

El punto de máxima temperatura se encuentra situado en la zona de contacto existente entre dos sólidos, que en este caso son tanto el papel aislante como el cobre de los devanados.

A pesar de que la temperatura máxima se encuentra en el interior del cobre, ese máximo no es reseñable en nuestro estudio. La temperatura del interior del cobre no incide en ninguna avería posible en el papel. Sin embargo, la temperatura máxima en las caras del cobre en contacto con el papel es la causante de posibles incidencias en el transformador.

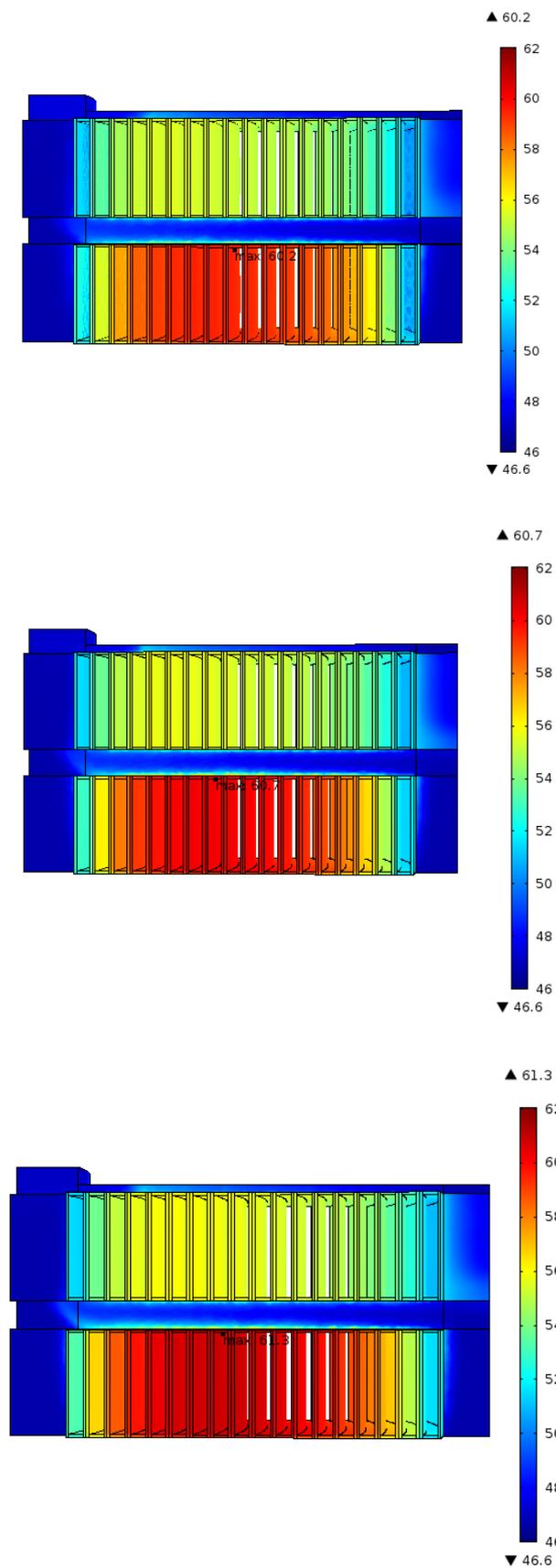


Figura 8.24 Localización del punto caliente con tres niveles de mallado

La localización del punto caliente es la zona interior del papel, donde está en contacto con el cobre. Además, como era predecible, el mismo se encuentra en la zona central, ya que esos discos tienen una peor refrigeración.

8.4.3 Malla cuadrática libre, tetraédrico libre

En la figura 8.25 se muestra la distribución de temperaturas en la geometría entera de los dos discos estudiados para cada nivel de mallado en el caso de una malla cuadrática libre y tetraédrico libre. En las figuras, nombraremos al mallado de 777865 elementos como mallado nivel 1, al mallado de 959027 elementos como mallado nivel 2 y al mallado de 1265862 elementos como mallado nivel 3.

En ella se puede ver como a medida que utilizamos un mallado de mayor número de elementos y una mayor calidad de elemento, la temperatura detectada por el resolvedor es mayor.

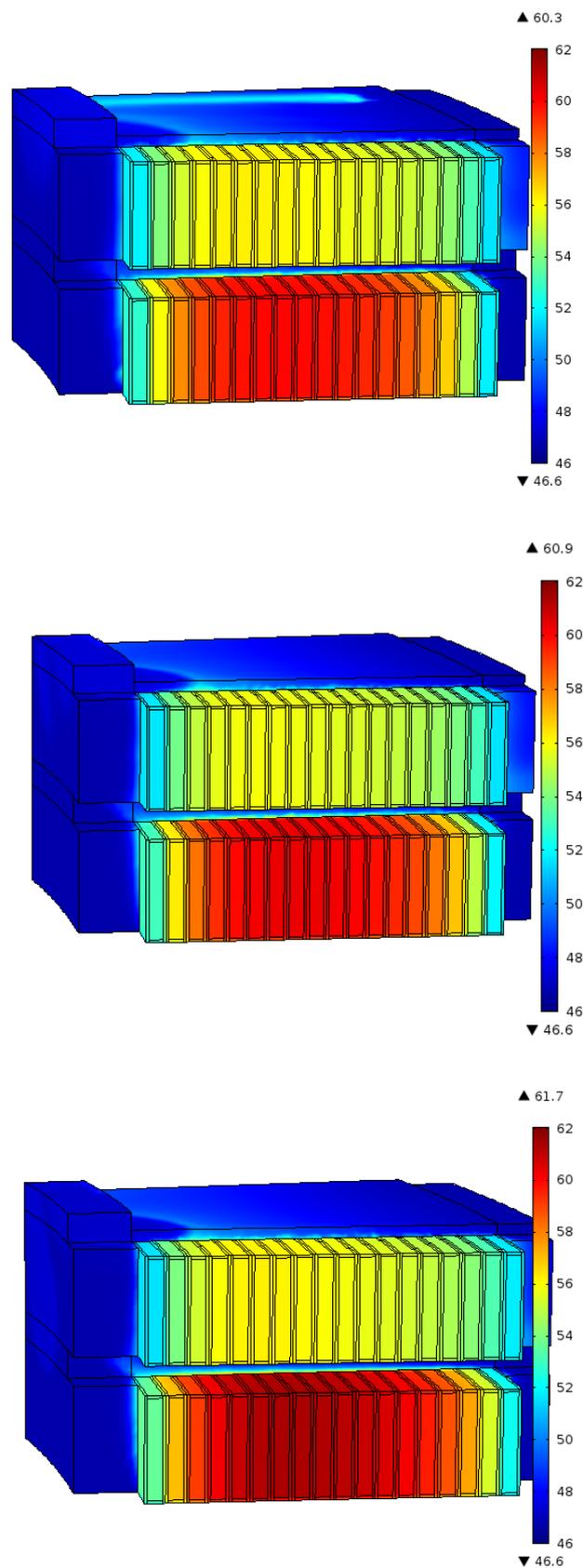


Figura 8.25 Distribución de temperaturas con tres niveles de mallado

Se puede observar como las temperaturas de los conductores centrales es mayor que la temperatura de los conductores laterales. Esto es debido a la peor refrigeración que tienen los mismos, además de por la mayor temperatura de los conductores adyacentes.

Por otro lado, se observa una mayor temperatura en el disco inferior, que puede tener su causa en una menor refrigeración, ya que la parte inferior del primer disco tiene una pared adiabática que impide la transferencia de calor fuera de los conductores, por lo que estos únicamente están refrigerados por la parte superior de los mismos, mientras que los conductores del disco superior están refrigerados por sus caras tanto superior como inferior.

Para poder observar de un mejor modo la distribución de temperaturas que se da tanto en los devanados, el papel y el fluido refrigerante, se realizará un corte vertical. En la figura 8.26, se puede apreciar la mayor temperatura de los devanados centrales debido a una peor refrigeración que la que soportan los discos laterales y a recibir una mayor cantidad de calor de los devanados anexos a ellos. Además, se podrá ver la aparición de venas calientes en el fluido formadas a partir de un desprendimiento de la capa límite térmica.

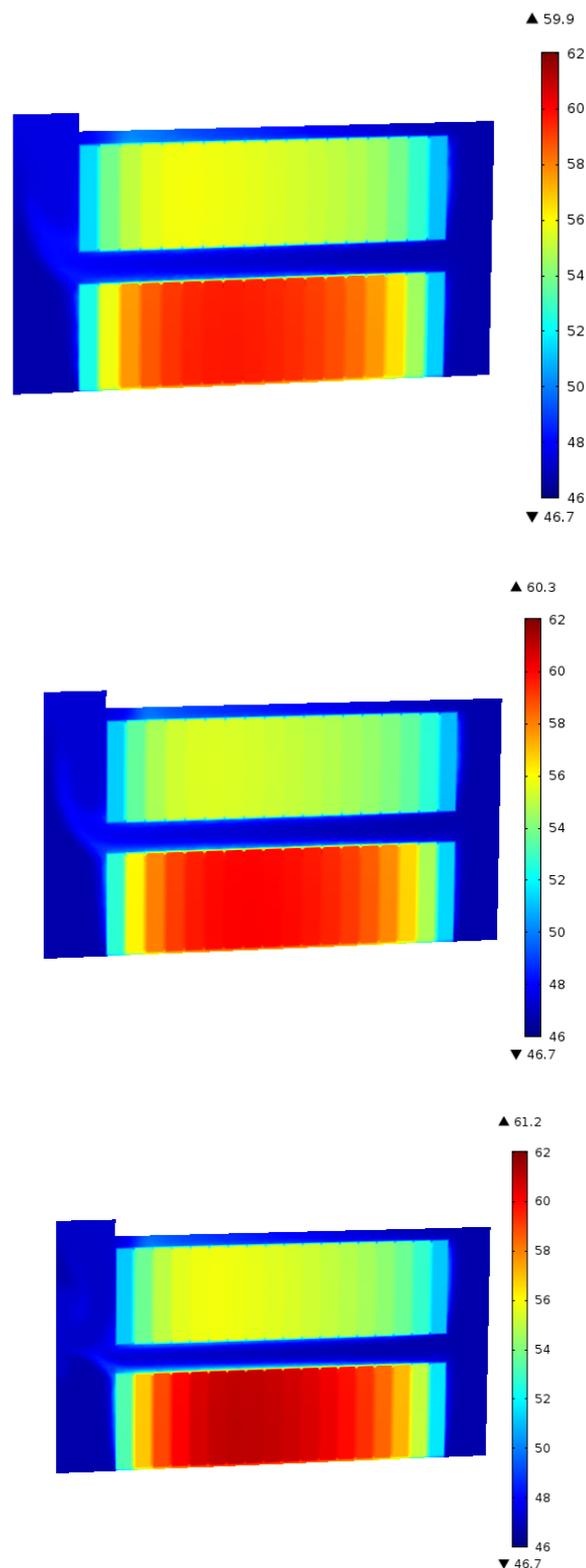


Figura 8.26 Distribución de temperaturas en un plano de corte con tres niveles de mallado

Se puede ver en la figura 8.27 la posición del punto de máxima temperatura para cada uno de los casos. En los tres casos, ese punto está situado a una altura de 15.5 cm de la base, localización que se encuentra en el disco 9 de la parte baja. El valor para cada caso es de 60.3°C, 60,9°C y 61.7°C respectivamente. Así pues, y dependiendo del mallado empleado, se observa una variación de 1.4°C entre los casos más extremos que en esta ocasión son el nivel 1 de mallado (777865 elementos) y el nivel 3 de mallado (1265862 elementos).

El punto de máxima temperatura se encuentra situado en la zona de contacto existente entre dos sólidos, que en este caso son tanto el papel aislante como el cobre de los devanados.

A pesar de que la temperatura máxima se encuentra en el interior del cobre, ese máximo no es reseñable en nuestro estudio. La temperatura del interior del cobre no incide en ninguna avería posible en el papel. Sin embargo, la temperatura máxima en las caras del cobre en contacto con el papel es la causante de posibles incidencias en el transformador.

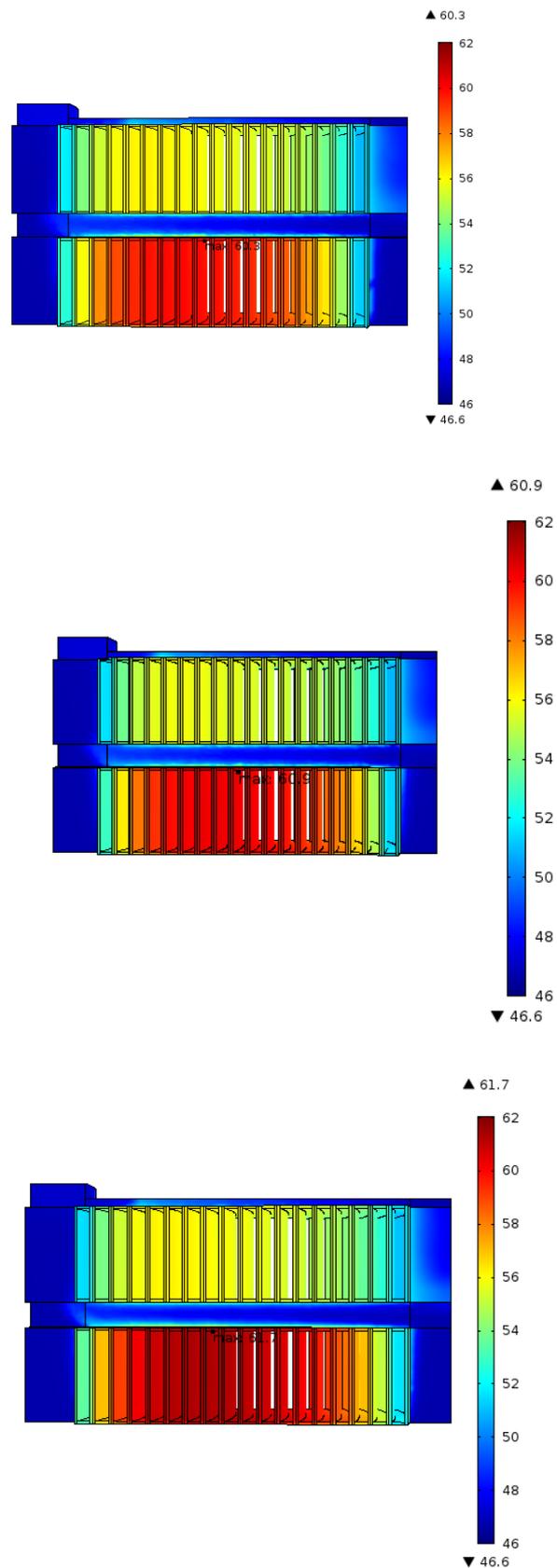


Figura 8.27 Localización del punto caliente con tres niveles de mallado

La localización del punto caliente en ese lugar es una situación predecible, ya que esa zona no está en contacto directo con el fluido refrigerante.

8.4.4 Mapeado y barrido

En la figura 8.28 se muestra la distribución de temperaturas en la geometría entera de los dos discos estudiados para cada nivel de mallado en el caso de una malla de forma de mapeado y barrido. En las figuras, nombraremos al mallado de 239856 elementos como mallado nivel 1, al mallado de 1624992 elementos como mallado nivel 2 y al mallado de 2576888 elementos como mallado nivel 3.

En ella se puede ver como a medida que utilizamos un mallado de mayor número de elementos y una mayor calidad de elemento, la temperatura detectada por el resolvedor es mayor.

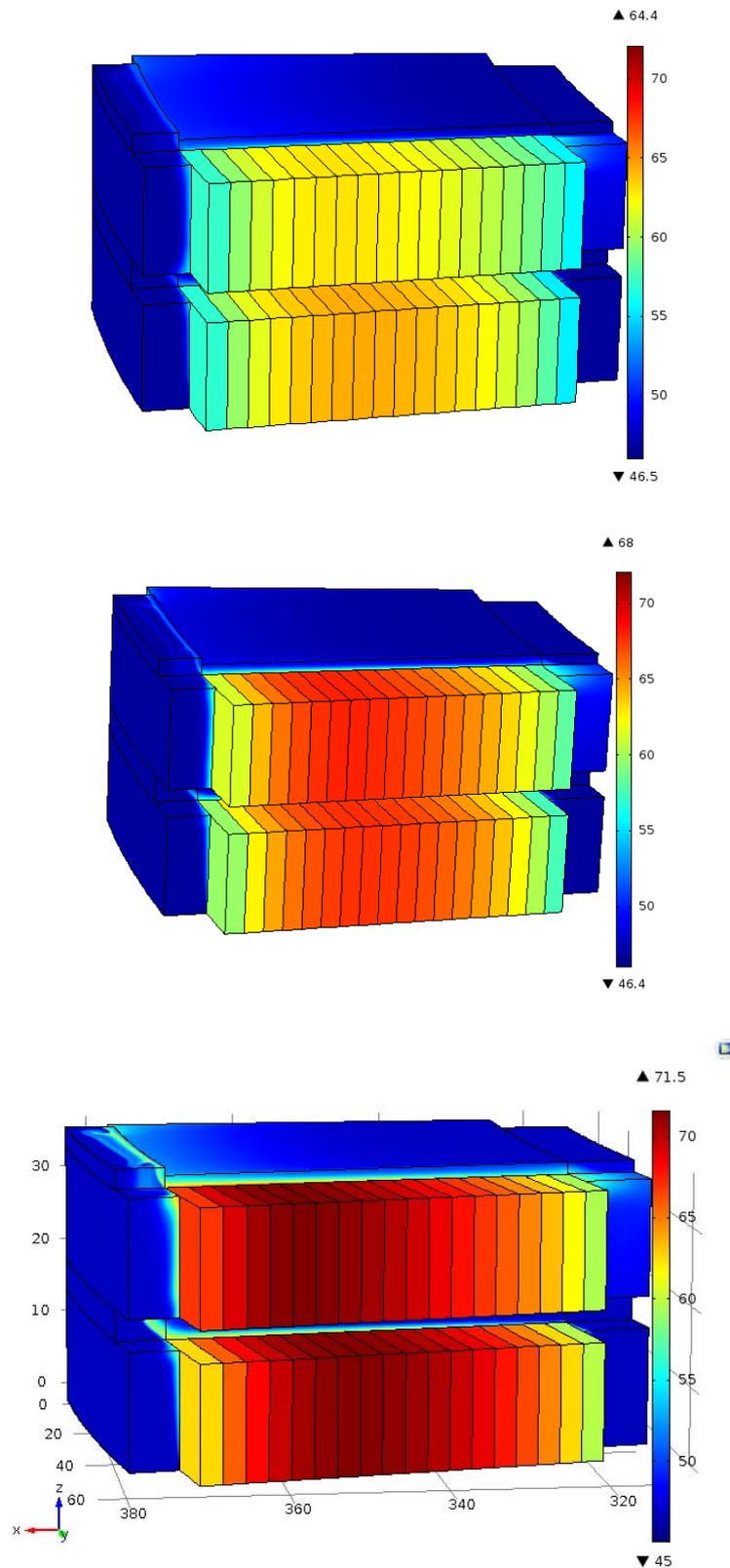


Figura 8.28 Distribución de temperaturas con tres niveles de mallado

Se puede observar como las temperaturas de los conductores centrales es mayor que la temperatura de los conductores laterales. Esto es debido a la peor refrigeración que tienen los mismos, además de por la mayor temperatura de los conductores adyacentes.

En este caso, se observa un cambio respecto a los dos mallados anteriores. Mientras que para el primer nivel de mallado la temperatura máxima se encuentra en el disco inferior, en los dos últimos casos esa temperatura máxima se encuentra en los discos superiores. El motivo es que con este mallado, el aceite que se encuentra en contacto con los discos tiene una mayor temperatura respecto a la que tenía en los casos anteriores. Esto causa que, a pesar de estar refrigerados por ambas caras, el aceite refrigerante del disco superior tiene una temperatura mayor que no es capaz de retirar más calor que el que retira el aceite del disco inferior a pesar de tener la mitad de superficie de contacto.

Para poder observar de un mejor modo la distribución de temperaturas que se da tanto en los devanados, el papel y el fluido refrigerante, se realizará un corte vertical. En la figura 8.29, se puede apreciar la mayor temperatura de los devanados centrales debido a una peor refrigeración que la que soportan los discos laterales y a recibir una mayor cantidad de calor de los devanados anexos a ellos. Además, se podrá ver la aparición de venas calientes en el fluido formadas a partir de un desprendimiento de la capa límite térmica.

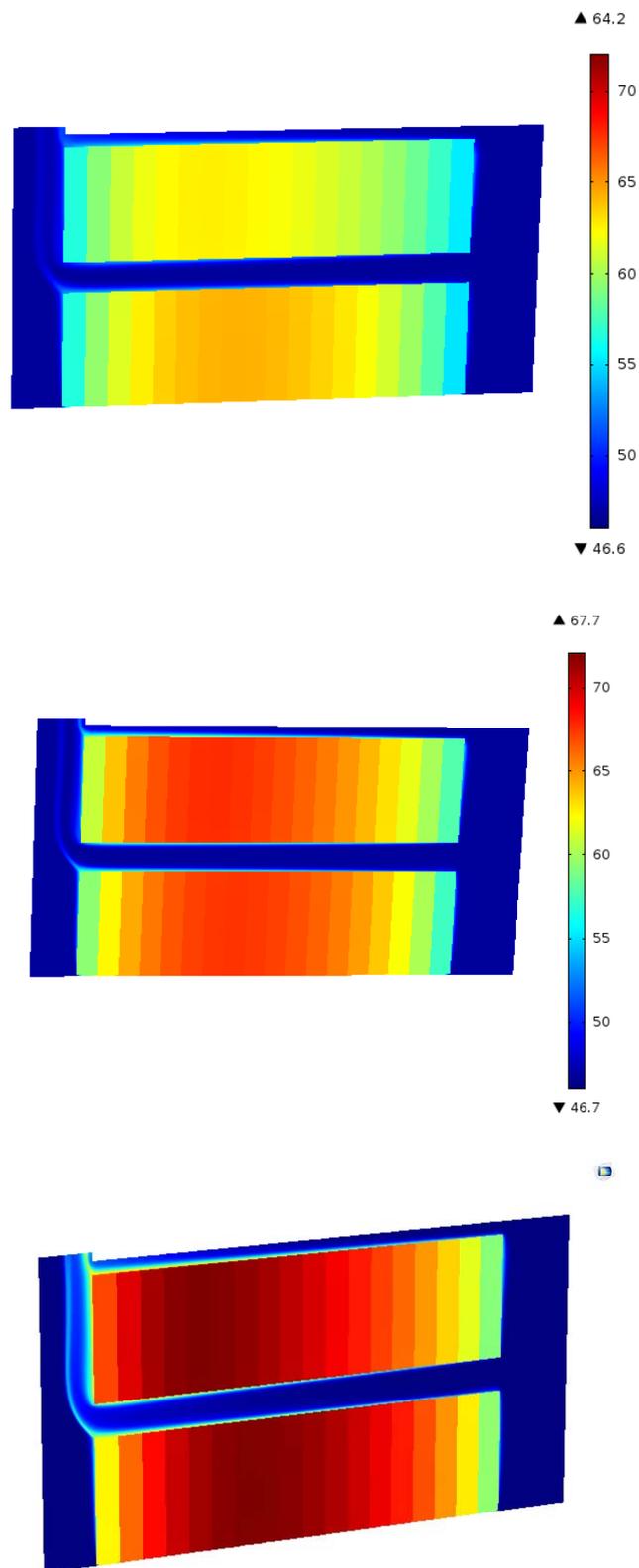


Figura 8.29 Distribución de temperaturas en un plano de corte con tres niveles de mallado

Se puede ver en la figura 8.30 la posición del punto de máxima temperatura para cada uno de los casos. Mientras que en el primer caso vemos como el punto de máxima temperatura se encuentra localizado en la parte superior del primer disco, se aprecia en los dos siguientes casos que el punto de máxima temperatura se encuentra en la parte superior del segundo de los discos, en contacto con el canal superior.

Los valores de temperatura en cada uno de los casos es de 64.4°C, 68°C y 71.5°C

Por lo tanto, se aprecia una diferencia de 7.1°C dependiendo del tamaño de malla empleado en cada uno de los casos entre las dos temperaturas más extremas, que en esta ocasión son el nivel 1 y 3.

A pesar de que la temperatura máxima se encuentra en el interior del cobre, ese máximo no es reseñable en nuestro estudio. La temperatura del interior del cobre no incide en ninguna avería posible en el papel. Sin embargo, la temperatura máxima en las caras del cobre en contacto con el papel es la causante de posibles incidencias en el transformador.

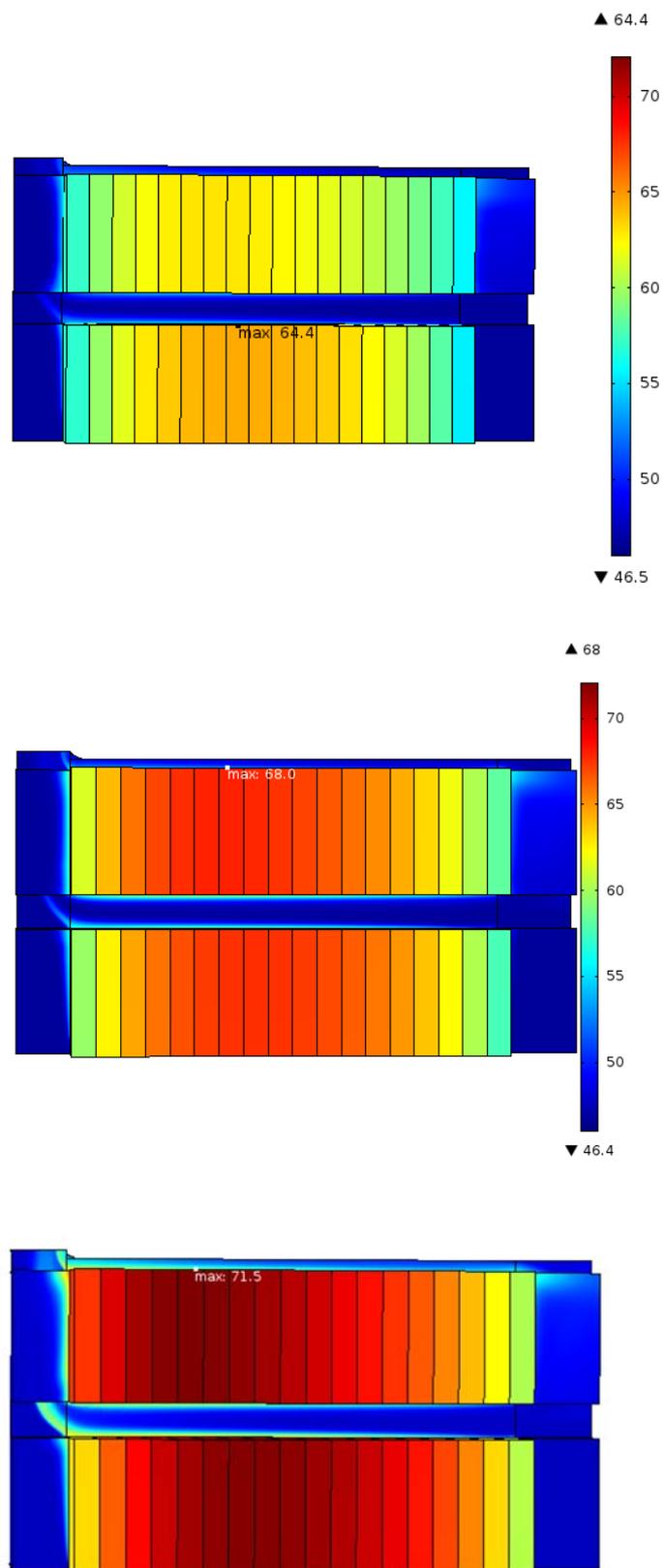


Figura 8.30 Localización del punto caliente con tres niveles de mallado

La posición del punto caliente en la zona superior supone un cambio en los resultados respecto a los demás tipos de mallados. Trataremos este cambio más en profundidad en el apartado 9 de conclusiones, estudiando el motivo por el cual ocurre este cambio de posición

En la siguiente tabla se muestra una comparativa visual de las diferencias entre los puntos de temperaturas máximas dependiendo del mallado y del nivel del mismo.

	Triangular libre		
	Bajo	Medio	Alto
Q_{media} del mallado	0.517	0.609	0.639
$T_{Hot-spot}$	60.2	60.7	61.3
Disco	1	1	1
Conductor	9	8	8
	Cuadrático libre		
	Bajo	Medio	Alto
Q_{media} del mallado	0.477	0.526	0.58
$T_{Hot-spot}$	60.3	60.9	61.7
Disco	1	1	1
Conductor	9	9	8
	Mapeado		
	Bajo	Medio	Alto
Q_{media} del mallado	0.602	0.693	0.8932
$T_{Hot-spot}$	64.4	68	71.5
Disco	1	2	2
Conductor	8	7	5

Tabla 8.1 Comparativa de los resultados obtenidos en cada caso de estudio

En la tabla 8.1 se compara tanto la calidad del mallado como la temperatura máxima de cada uno de los mallados y la posición del mismo. Así, se observa la mayor calidad del mapeado, seguido por el triangular mientras que el mallado con una peor calidad de elemento es el cuadrático. Además, se puede ver una relación directa entre la calidad del mallado y la temperatura máxima registrada en el mallado. A mayor calidad de elementos se obtiene una mayor temperatura del punto caliente.

Por otro lado, la posición del punto caliente en los dos primeros casos, para los tres niveles de mallado, se puede considerar como la misma, octavo o noveno conductor del primer disco. En cambio, en el tercer caso la ubicación dependerá del nivel mallado; en el mallado más grueso, la ubicación es igual a los dos casos anteriores; en los dos mallados más finos, el punto caliente se encuentra en la parte superior del séptimo y quinto conductor del segundo disco.

Los puntos calientes reseñables del transformador se encuentran en zonas de contacto sólido-sólido, siendo estos sólidos el cobre y el papel aislante que lo recubre.

8.5 RESULTADOS DE VELOCIDADES

8.5.1 Introducción

Además de un estudio térmico, se realizará un estudio de las velocidades del fluido refrigerante que se mueve a través de los conductos del transformador. Así pues, será igualmente útil un análisis de la distribución de velocidades a lo largo del conjunto. De esta forma, se puede localizar puntos de acumulación de aceite, provocando que el aceite restante se mueva a una velocidad mayor, aumentando su temperatura y provocando una peor refrigeración. Incluso esos cúmulos de aceite pueden sufrir un sobrecalentamiento excesivo, provocando así el fallo del transformador

En las figuras siguientes se mostrarán las distribuciones de velocidades por medio de colores, y líneas de flujo obtenidas en el fluido refrigerante para cada uno de los distintos mallados y número de elementos de los mismos empleados. Así, se podrá disponer de una visualización de comparación de las distribuciones de velocidades en cada caso estudiado.

8.5.2 Malla triangular libre, tetraédrico libre

En la figura 8.31 se muestra la distribución de velocidades en un plano radial del transformador, donde apreciaremos las distintas velocidades del aceite mineral. En las figuras, nombraremos al mallado de 652226 elementos como mallado nivel 1, al mallado de 1010523 elementos como mallado nivel 2 y al mallado de 1235936 elementos como mallado nivel 3.

En la figura se puede observar como el máximo de velocidad se da en el canal de salida, donde se une el flujo másico que llega de las dos entradas. Además, se observa como el flujo que entra por la parte exterior del mismo se desvía por el primer canal horizontal primario, buscando el camino más sencillo para moverse. Así pues, el aceite que sube por el canal exterior hasta el canal horizontal superior se mueve a una baja velocidad.

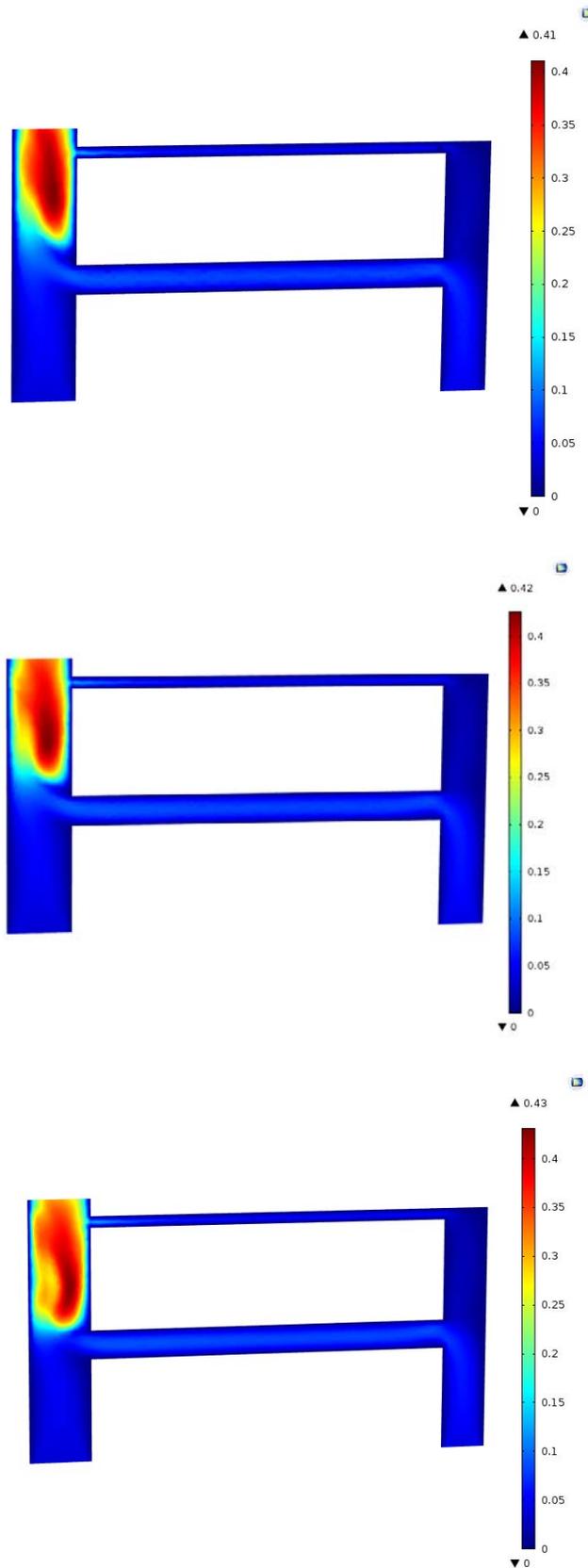


Figura 8.31 Distribución de velocidades en un plano de corte con tres niveles de mallado

Se realiza un estudio de las velocidades con un diagrama de flechas donde se muestra en 3D con vectores (Figura 8.32), para poder observar tanto la magnitud de la velocidad como la dirección del mismo. Así, se verá de una mejor forma el movimiento del aceite mineral por los canales conductores.

Así, se puede ver que el aceite que entra por el canal vertical exterior, en su llegada a la intersección con el canal horizontal intermedio se desvía por el mismo, causando que la velocidad en la parte superior del canal vertical es mucho menor que en la inferior (en la figura es prácticamente inapreciable). La mayoría del caudal se desvía por el primer canal horizontal debido a su mayor sección en comparación con el segundo y una menor altura que vencer para llegar al mismo, lo que supone mucha menor pérdida de carga.

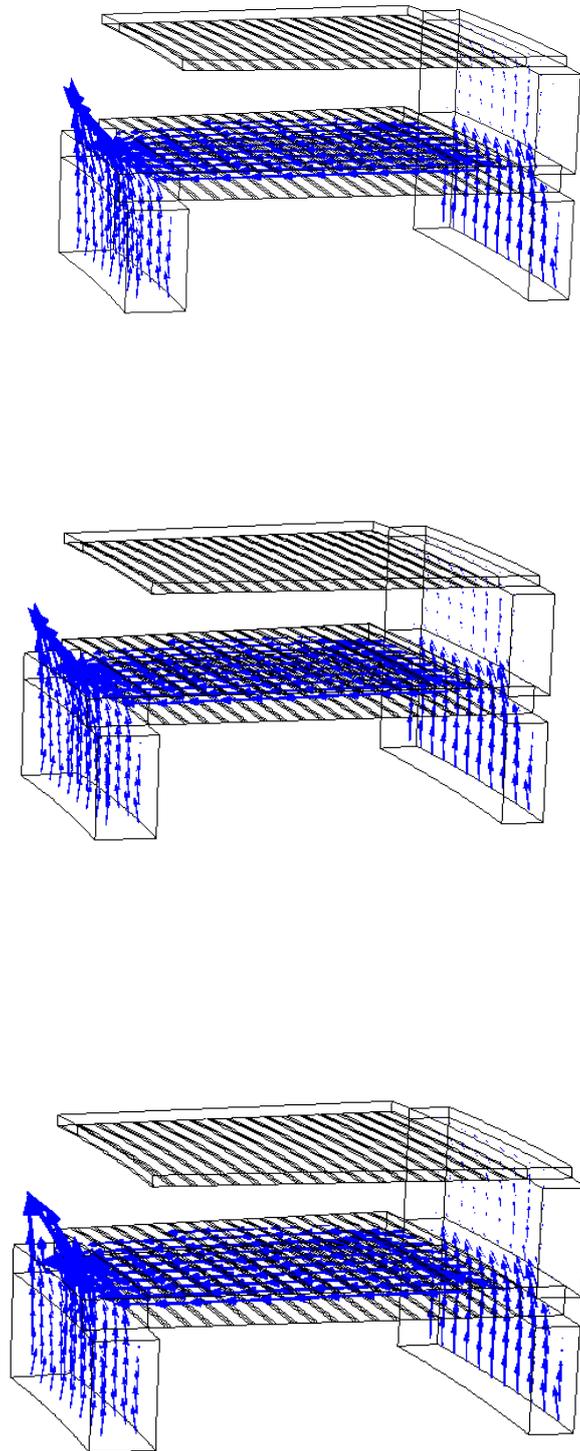


Figura 8.32 Campo de velocidades del aceite mineral con tres niveles de mallado

8.5.2 Malla cuadrático libre, tetraédrico libre

En la figura 8.33 se puede observar la distribución de velocidades en un plano radial del transformador, donde apreciaremos las distintas velocidades del aceite mineral. En las figuras, nombraremos al mallado de 777865 elementos como mallado nivel 1, al mallado de 959027 elementos como mallado nivel 2 y al mallado de 1265862 elementos como mallado nivel 3.

En la figura se puede observar como el máximo de velocidad se da en el canal de salida, donde se une el flujo másico que llega de las dos entradas. Además, se observa como el flujo que entra por la parte exterior del mismo se desvía por el primer canal horizontal primario, buscando el camino más sencillo para moverse. Así pues, el aceite que sube por el canal exterior hasta el canal horizontal superior se mueve a una baja velocidad.

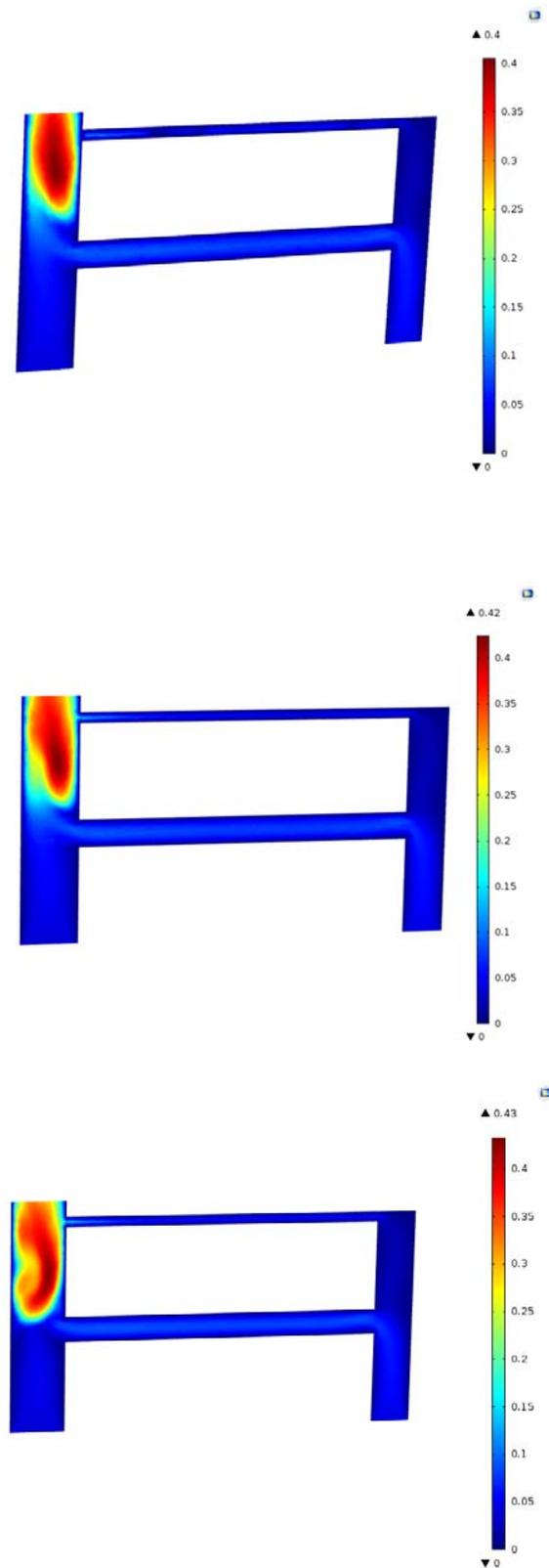


Figura 8.33 Distribución de velocidades en un plano de corte con tres niveles de mallado

Se realiza un estudio de las velocidades con un diagrama de flechas donde se muestra en 3D con vectores (Figura 8.34), para poder observar tanto la magnitud de la velocidad como la dirección del mismo. Así, se verá de una mejor forma el movimiento del aceite mineral por los canales conductores.

Así, se puede ver que el aceite que entra por el canal vertical exterior, en su llegada a la intersección con el canal horizontal intermedio se desvía por el mismo, causando que la velocidad en la parte superior del canal vertical es mucho menor que en la inferior (en la figura es prácticamente inapreciable). La mayoría del caudal se desvía por el primer canal horizontal debido a su mayor sección en comparación con el segundo y una menor altura que vencer para llegar al mismo, lo que supone mucha menor pérdida de carga.

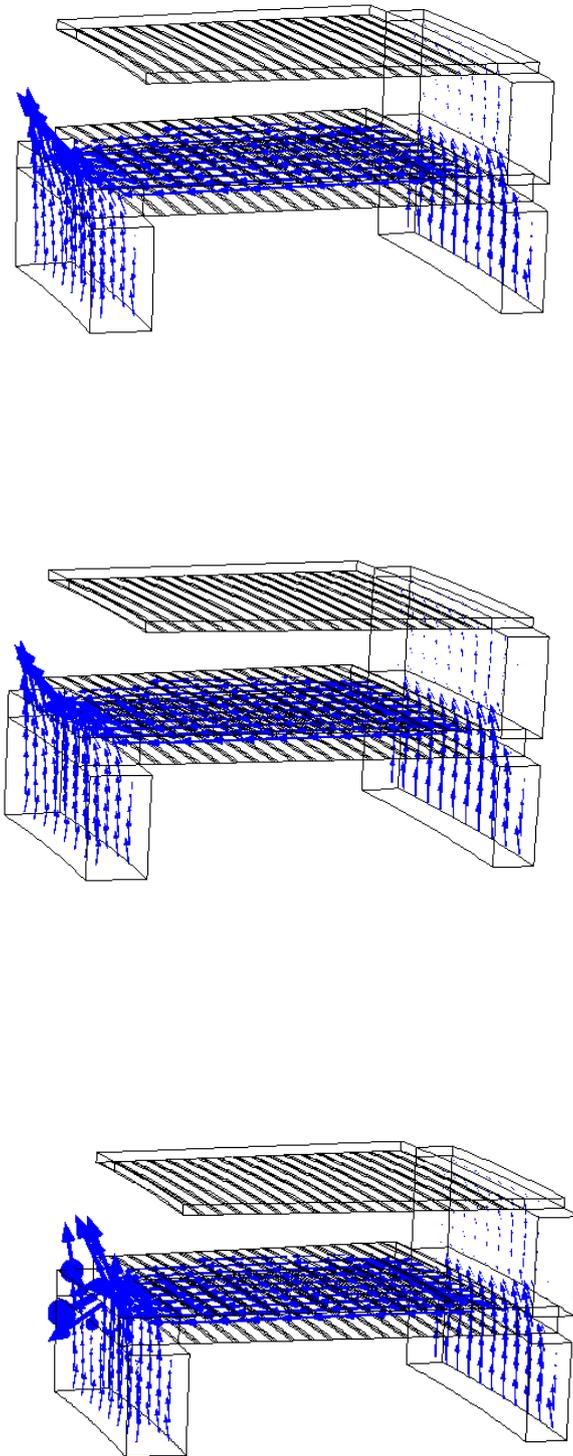


Figura 8.34 Campo de velocidades del aceite mineral con tres niveles de mallado

8.5.3 Mapeado y barrido

En la figura 8.35 se puede observar la distribución de velocidades en un plano radial del transformador, donde apreciaremos las distintas velocidades del aceite mineral. En las figuras, nombraremos al mallado de 239856 elementos como mallado nivel 1, al mallado de 1624992 elementos como mallado nivel 2 y al mallado de 2576888 elementos como mallado nivel 3.

En la figura se puede observar como el máximo de velocidad se da en el canal de salida, donde se une el flujo másico que llega de las dos entradas, aunque de una forma mucho más uniforme a la que se daba en los dos casos anteriores. Además, se observa como el flujo que entra por la parte exterior del mismo se desvía por el primer canal horizontal primario, buscando el camino más sencillo para moverse de una manera más pronunciada que en el caso anterior, provocando una mayor velocidad del aceite en el canal horizontal y mejorando así la refrigeración. Así pues, el aceite que sube por el canal exterior hasta el canal horizontal superior se mueve a una baja velocidad.

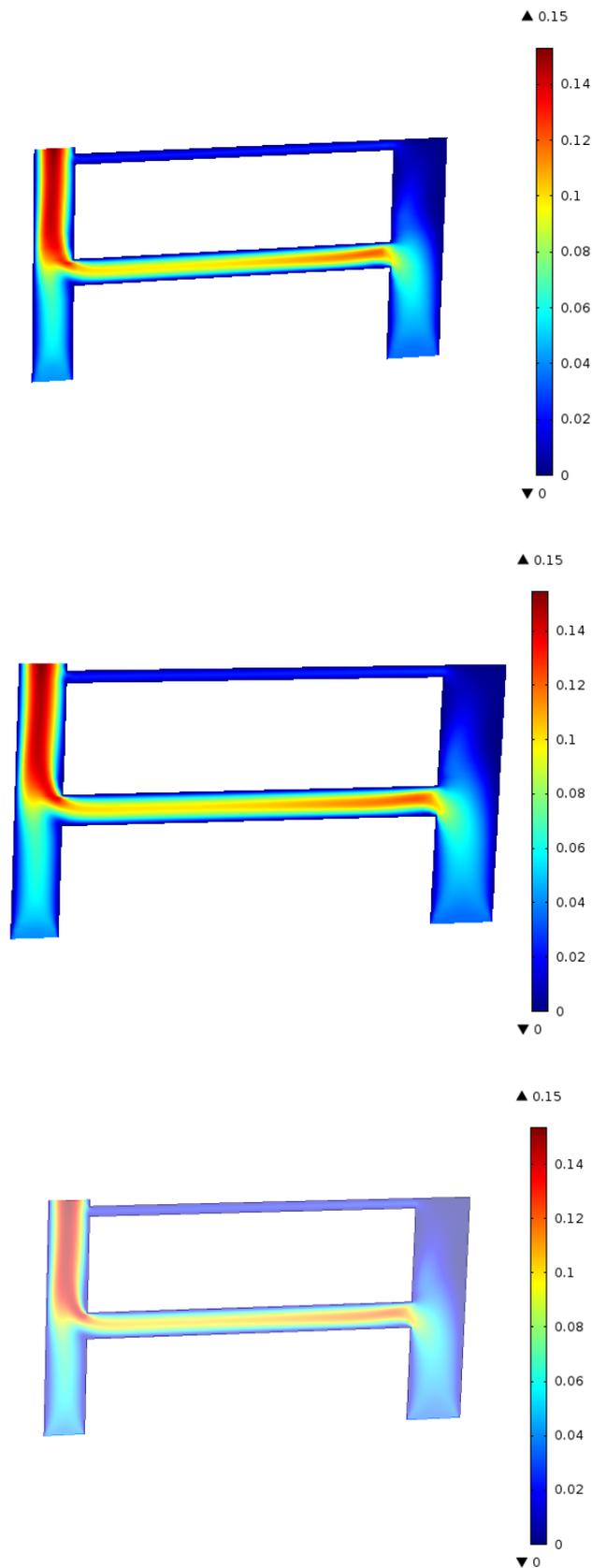


Figura 8.35 Distribución de velocidades en un plano de corte con tres niveles de mallado

Se realiza un estudio de las velocidades con un diagrama de flechas donde se muestra en 3D con vectores (Figura 8.36), para poder observar tanto la magnitud de la velocidad como la dirección del mismo. Así, se verá de una mejor forma el movimiento del aceite mineral por los canales conductores.

Así, se puede ver que el aceite que entra por el canal vertical exterior, en su llegada a la intersección con el canal horizontal intermedio se desvía por el mismo, causando que la velocidad en la parte superior del canal vertical es mucho menor que en la inferior (en la figura es prácticamente inapreciable). La mayoría del caudal se desvía por el primer canal horizontal debido a su mayor sección en comparación con el segundo y una menor altura que vencer para llegar al mismo, lo que supone mucha menor pérdida de carga.

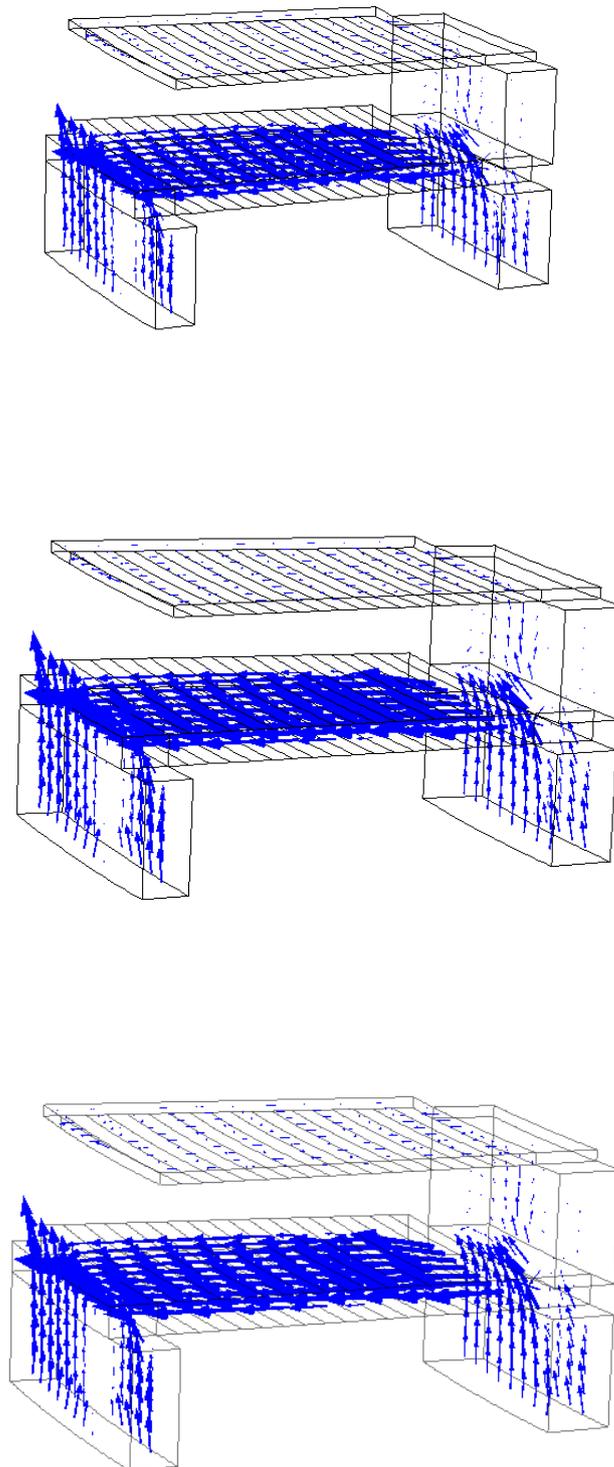


Figura 8.36 Campo de velocidades del aceite mineral con tres niveles de mallado

8.6 COMPARATIVA DE RESULTADOS

En este apartado se procederá a comparar los distintos resultados obtenidos en cada uno de los modelos tanto térmicos como de velocidad.

	Triangular libre		
	Bajo	Medio	Alto
Nº de elementos	652226	1010523	1235936
Calidad media del mallado	0.517	0.609	0.639
$T_{\text{Hot-spot}}$	60.2	60.7	61.3
v_{max}	0.41	0.42	0.43
	Cuadrático libre		
	Bajo	Medio	Alto
Nº de elementos	777865	959027	1265862
Calidad media del mallado	0.477	0.526	0.58
$T_{\text{Hot-spot}}$	60.3	60.9	61.7
v_{max}	0.4	0.42	0.43
	Mapeado		
	Bajo	Medio	Alto
Nº de elementos	239856	1624992	2576888
Calidad media del mallado	0.533	0.612	0.893
$T_{\text{Hot-spot}}$	64.4	68	71.5
v_{max}	0.15	0.15	0.15

Tabla 8.2 Comparativa de los resultados térmicos y de velocidad

Como se puede ver en la tabla 8.2, un mayor número de elementos en cada uno de los mallados genera una mejor calidad de mallado. Además, cuando la calidad del mallado mejora, también aumenta la temperatura máxima del punto caliente. Por otro lado, la velocidad del fluido es independiente de la calidad del mallado, ya que se mantiene aproximadamente constante en todos los niveles de mallado para cada uno de los casos.

Por otro lado, se observa una variación de las temperaturas de los puntos calientes, ya que en los dos primeros casos de estudio la temperatura es similar, teniendo variaciones menores de 0.5°C , mientras que en el mapeado la temperatura difiere de los dos primeros en más de 4°C , y la variación de temperaturas entre los tres niveles es mucho mayor en este último.

Ocurre algo similar en el caso de las velocidades, ya que las obtenidas en los dos primeros casos son velocidades de valores similares, mientras que la velocidad máxima en el mapeado es del orden de 3 veces menor que en el triangular y cuadrático.

9. CONCLUSIONES

Una vez analizados los resultados previamente estudiados, se ha llegado a las siguientes conclusiones con respecto a la influencia del tipo y nivel de mallado sobre el valor y la ubicación de los puntos calientes:

- Independientemente del tipo de mallado, un mayor número de elementos genera una mayor calidad de mallado.
- Una mayor calidad de mallado, con independencia del tipo de mallado, genera temperaturas máximas más elevadas en toda la geometría.
- El caso que genera una mejor calidad de mallado es el tercero, mapeado y barrido con hexaedros.
- La ubicación del punto caliente del papel dependerá tanto del tipo de mallado como de su nivel.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Mufuta. (2000). Modelling of the mixed convection in the windings of a disc power transformer.
- Jesús Fraile Mora. (2003). Máquinas eléctricas (5º ed.). Madrid: Mc Graw Hill.
- Theodore Wildi. (2007). Máquinas eléctricas y sistemas de potencia. México: Pearson.
- F. Torriano, M. Chaaban, P.Picher. (2010). Numerical study of parameters affecting the temperatura distribution in a disc-type transformer winding. *Applied Thermal Engineering*. 30, 2034-2044
- F. Torriano, P. Picher, M. Chaaban (2012). Numerical investigation of 3D flow and thermal effects in a disc-type transformer winding. *Applied Thermal Engineering*. 40, 121-131
- Skillen, A. Revell, H. Iacovides, W. Wu. (2012). Numerical prediction of local hot-spot phenomena in transformer windings, *Applied Thermal Engineering*, 36, 96-105
- Fofana. (2013). 50 years in the development of insulating liquids. 29(5), 13-25.
- Lecuna, F. Delgado, P. Castro, A. Ortiz, I. Fernández and C. J. Renedo, "Thermal-fluid Characterization of Alternative Liquids of Power Transformers: a Numerical Approach," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10/2015. 2015.