

**ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y
ENERGÍA**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO DE OPTIMIZACIÓN EN EL SISTEMA DE
MALLADO MEDIANTE DINÁMICA
COMPUTACIONAL, Y MEJORA DEL MODELO
TÉRMICO DEL DEVANADO DE UN
TRANSFORMADOR DE POTENCIA**

**(Optimization Study in Meshing System Using Computational Dynamics,
and Improvement of the Thermal Model of Winding of a Power
Transformer')**

**Para acceder al Título de
GRADUADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS
ENERGÉTICOS**

Autor: Patricia Argos Ramos

Febrero 2015

Me gustaría expresar mi agradecimiento hacia Ramón Lecuna y Raúl Husillos, director y coordinador, que han supervisado este trabajo, y sin cuyo tiempo y dedicación no hubiera sido posible.

Agradecer a mi familia su apoyo incondicional; a mis profesores, su dedicación; y a 'Las Primis' e 'Ingenieros de Minas S.L.' todos los buenos momentos que hemos compartido y que compartiremos. Ha sido un placer.

Con cariño, a Silvia Jerez

Contenido

I. ALCANCE DEL ESTUDIO	2
II. ESTADO DEL ARTE	15
1. Transformadores de potencia.....	15
1.1. Componentes de un transformador.....	15
1.2. Funcionamiento de un transformador.....	19
1.3. Posibles pérdidas en un transformador.....	20
1.4. Rendimiento de un transformador.....	23
1.5. Refrigeración de un transformador.....	25
1.6. Métodos para evitar la degradación del líquido dieléctrico.....	28
2. Historia de los líquidos refrigerantes.....	32
3. Propiedades principales de los líquidos dieléctricos.....	34
3.1. Propiedades físico-químicas.....	34
3.2. Propiedades eléctricas.....	38
3.3. Influencia de los líquidos dieléctricos en el diseño de los equipos.....	40
3.4. Aislamientos sólidos.....	42
3.5. Rellenado de transformadores con líquidos dieléctricos.....	43
4. Mecánica de fluidos.....	44
4.1. Transferencia de calor.....	44
4.2. Parámetros adimensionales.....	46
4.3. Ecuaciones de Navier-Stokes.....	47
5. Técnicas de análisis numérico.....	58
5.1. Estimación de puntos calientes.....	60
5.2. Métodos numéricos.....	75
5.3. Entornos de dinámica computacional.....	80
6. Situación actual de la presente investigación.....	83
III. CRITERIOS DE LA INVESTIGACIÓN	89
1. Características a considerar del fluido empleado en el estudio de mallados numéricos.....	89
2. Procedimiento del estudio.....	90
IV. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE A EMPLEAR	94
1. Análisis de elementos finitos (mef).....	94
2. Comsol multiphysics.....	98
2.1. Procedimiento general de cálculo.....	100
2.2. Graphical User Interface (GUI).....	102

2.3.	Construcción del modelo	111
V.	DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL CASO EN ESTUDIO; TRANSFORMADOR Y ACEITE MINERAL	129
1.	Transformador	130
2.	Aceite mineral	132
3.	Modelo geométrico original.....	133
3.1.	Global definitions	134
3.2.	Definición del modelo	148
3.3.	Condiciones de contorno	166
3.4.	Mallado.....	166
4.	Resultados simulación.....	173
VI.	PLANTEAMIENTO DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN.....	180
1.	Mallado 1 del modelo original	180
2.	Mallado 2 del modelo original	186
3.	Mallado 3 del modelo original	193
4.	Resistencia interna de cobre despreciable	199
VII.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	210
1.	Resultados diferentes modelos.....	212
1.1.	Mallado 2 modelo original	212
1.2.	Mallado 3 modelo original	215
1.3.	Resistencia interna del cobre despreciable.....	218
2.	Comparativa de datos y conclusiones.....	221
VIII.	BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA	239
1.	Alvarez, L.J.; Durany, J.; Fernández, G.; García, G.; Martínez, A.M.;.....	239
2.	Delgado, F.; Ortiz, A.; Fernández, I.; Arroyo, A.; Macías, J.A.....	239
3.	Rahimpour, E.; Barati, M.; Schäfer, M.....	239
4.	Skillen, A.; Revell, A.; Iacovides, H.; Wei, W.....	239
5.	Torriano, F.; Chaaban, M.; Picher, P.....	239
6.	Torriano, F.; Picher, P.; Chaaban, M.....	239
7.	El Wakil, N.; Chereches, N.C.; Padet, J.	240
8.	Gastelurrutia, J.; Ramos, J.C.; Larraona, G.S.; Rivas, A.; Izagirre, J.; Del Rio, L.....	240
9.	Repositorio de Ucrea Universidad de Cantabria	240
10.	Ramón Lecuna Tolosa;	240
11.	www. ree.es;	241

Capítulo I: Alcance del estudio

I. ALCANCE DEL ESTUDIO

Debido al constante crecimiento y desarrollo del campo industrial y tecnológico, se plantean nuevas formas de continuar con este crecimiento, conocido como desarrollo sostenible, para lo que es necesario conocer las técnicas y materiales empleados actualmente en la industria, a fin de definir nuevas maneras de gestionar los productos de desecho procedentes de los procesos productivos o modificar los materiales empleados en dichos procesos por otros ambientalmente más respetuosos, fáciles de gestionar o reutilizables. Conseguir un desarrollo sostenible y provechoso de los recursos implica una optimización técnica y de costes, la valoración de los efectos medioambientales y la consideración de los potenciales peligros.

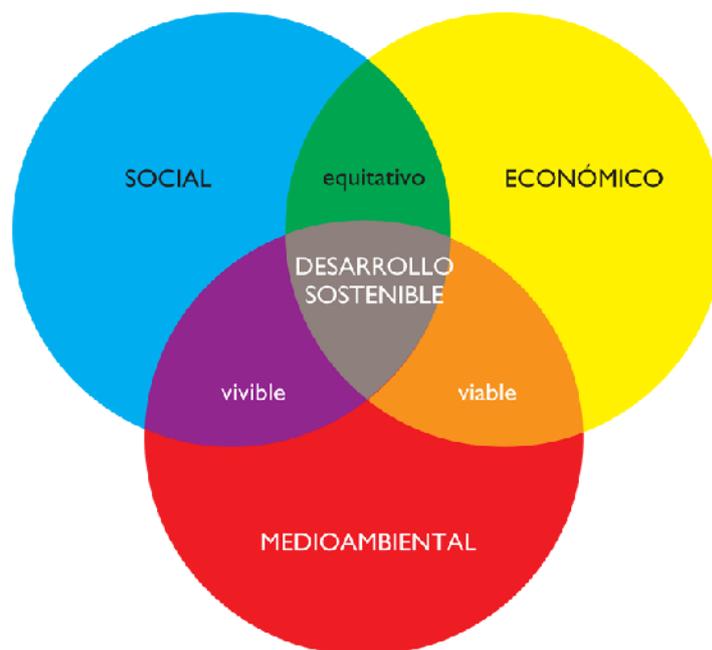


Ilustración 1. Diagrama Idea de Desarrollo Sostenible

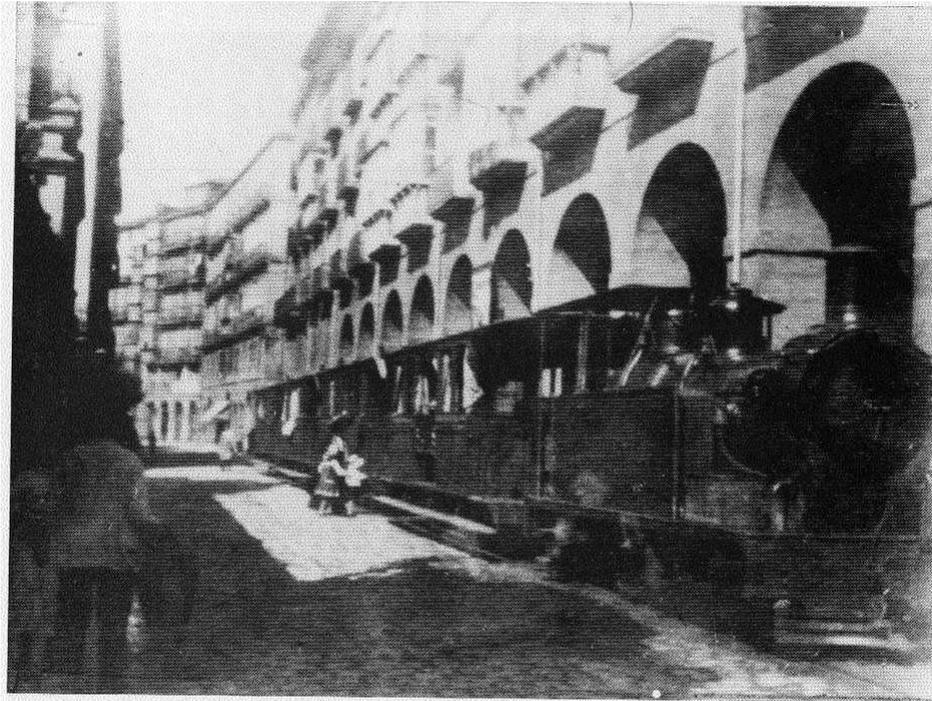
Llevando acabo el desarrollo del ámbito social, el económico y el medioambiental de forma equilibrada y teniendo en cuenta una serie de valores se conseguirá un desarrollo sostenible.



Ilustración 2. Transformador Antiguo



Ilustración 3. Transformador actual



Ferrocarril al Sardinero (Tren de Pombo).
Tenía su estación central en la calle Hernán Cortés (Arcos de Dóriga).

Ilustración 4. Tren antiguo



Ilustración 5. Tren actual

La diferencia entre estos dos tipos de trenes es sólo uno de los infinitos ejemplos que se puede mostrar sobre el desarrollo industrial y tecnológico, no solo en cuanto al aspecto físico y a la mecánica, sino también a la diferencia existente entre la energía utilizada para su funcionamiento; mientras que antes con atizar el hogar con carbón el motor funcionaba, ahora es necesario utilizar ese carbón en las centrales de generación de energía eléctrica, transportar esa energía eléctrica a través de las redes de transporte, transformarla en los centros de transformación para adecuarla a las condiciones requeridas de funcionamiento, y sólo después de todo esto, el tren se pondrá en funcionamiento.

Como consecuencia de éste y muchos otros avances, ha sido necesaria la evolución de las líneas de transporte de energía eléctrica, las cuales han sufrido importantes modificaciones a fin de satisfacer mayores demandas y cumplir con las crecientes exigencias de funcionamiento.

En los siguientes gráficos se puede apreciar la evolución de la demanda eléctrica peninsular desde el año 2009 hasta el 2013, comparando cada año con el anterior; la diversa producción de energía eléctrica a partir de diferentes fuentes y la evolución de las instalaciones.

Evolución de la demanda

Año	GWh	Δ Anual (%)	Δ Anual corregido ^(*) (%)
2009	252.660	-4,7	-4,7
2010	260.530	3,1	2,7
2011	255.631	-1,9	-1,0
2012	251.850	-1,5	-1,9
2013	246.166	-2,3	-2,1

(*) Por los efectos de laboralidad y temperatura.

Tabla 1. Evolución demanda eléctrica España

Crecimiento anual de la demanda (año móvil)

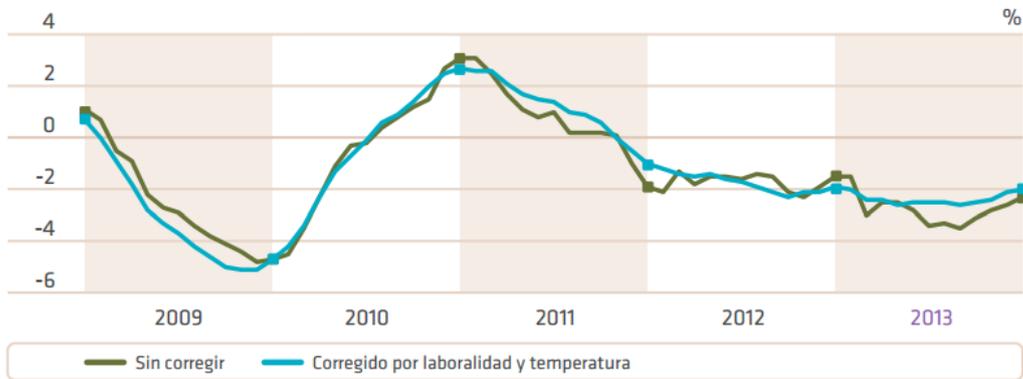


Ilustración 6. Gráfico crecimiento anual demanda eléctrica España

En las siguientes tablas vemos de manera detallada la producción eléctrica del sector eléctrico español, en función de la materia prima utilizada para la generación eléctrica, y más abajo las instalaciones de que consta la REE en materia de km de circuito y capacidad de transformación.

Balance eléctrico anual

	Sistema peninsular		Sistemas extrapeninsulares		Total nacional	
	GWh	% 13/12	GWh	% 13/12	GWh	% 13/12
Hidráulica	34.205	75,8	0	-	34.205	75,8
Nuclear	56.378	-8,3	-	-	56.378	-8,3
Carbón ⁽¹⁾	39.792	-27,3	2.591	-11,9	42.384	-26,5
Fuel/gas ²⁾	-	-	6.981	-7,4	6.981	-7,4
Ciclo combinado	25.409	-34,2	3.574	-8,8	28.983	-31,8
Régimen ordinario	155.785	-10,6	13.147	-8,7	168.932	-10,4
Consumos en generación	-6.241	-20,9	-771	-9,3	-7.012	-19,8
Hidráulica	7.095	52,8	3	-	7.098	52,8
Eólica	53.926	12,0	375	1,8	54.301	12,0
Solar fotovoltaica	7.982	1,9	415	12,6	8.397	2,4
Solar termoeléctrica	4.554	32,2	-	-	4.554	32,2
Térmica renovable	5.011	5,6	9	11,4	5.020	5,6
Térmica no renovable	32.048	-4,3	260	-5,1	32.309	-4,3
Régimen especial	110.616	8,1	1.062	4,1	111.679	8,1
Generación neta	260.160	-3,2	13.438	-7,8	273.598	-3,4
Consumos bombeo	-5.769	14,9	-	-	-5.769	14,9
Enlace Península-Baleares ⁽³⁾⁽⁴⁾	-1.266	-	1.266	-	0	-
Intercambios internacionales ⁽⁴⁾	-6.958	-37,9	-	-	-6.958	-37,9
Demanda (b.c.)	246.166	-2,3	14.704	-2,9	260.870	-2,3

(1) A partir del 1 de enero de 2011 incluye GICC (Elcogás). (2) En el sistema eléctrico de Baleares se incluye la generación con grupos auxiliares. (3) Enlace Península-Baleares funcionando al mínimo técnico de seguridad hasta el 13/08/2012. (4) Valor positivo: saldo importador; Valor negativo: saldo exportador.

Tabla 2. Balance eléctrico anual

Instalaciones de la red de transporte en España

	400 kV	≤ 220 kV			Total
	Península	Península	Baleares	Canarias	
Total líneas (km)	20.641	18.639	1.544	1.293	42.116
Líneas aéreas (km)	20.586	17.939	1.089	1.023	40.637
Cable submarino (km)	29	236	306	30	601
Cable subterráneo (km)	26	463	149	240	878
Transformación (MVA)	75.859	63	2.748	1.625	80.295

Datos de km de circuito y capacidad de transformación a 31 de diciembre del 2013.

Tabla 3. Red de transporte eléctrica

Según datos de Red Eléctrica Española, las instalaciones de la red española de electricidad sufrieron modificaciones durante el año 2013 tales como:

Nuevos parques de 400/220 kV

	Tensión kV		Tensión kV
Grado	400	Brocales	220
Ludrio	400	Eiris	220
Muniesa	400	El Fargue	220
Puebla de Guzmán	400	Gandía	220
San Serván	400	Gavarrot	220
Alcobendas	220	Polígono C	220
Aldaia	220	San Serván	220
Algete	220	Torrellano (Nueva Saladas)	220
Balsicas	220	Villaverde GIS	220

Tabla 4. Nuevas instalaciones 1

Nuevas líneas de transporte a 400 kV

	N.º de circuitos	Km de circuito
E/S Grado L/Soto-Tabiella (*)	2	13,46
E/S Muniesa L/Fuendetodos-Mezquita	1	0,64
L/Abanto-L/Penagos-Güeñes	4	40,26
L/Almaraz-San Serván (*)	2	285,38
L/Penagos-Güeñes	2	5,13
L/Salas-Grado (*)	2	54,70
L/San Serván-Brovaes	2	132,48
TOTAL		532,05

(*) Pendiente de recepción de acta de puesta en servicio.

Tabla 5. Nuevas instalaciones 2

Nuevas líneas de transporte a 220 kV

	N.º de circuitos	km de circuito
E/S Alcobendas L/Fuencarral-S.S.Reyes (*)	2	0,10
E/S Alcobendas L/Fuencarral-S.S.Reyes (subterráneo) (*)	1	1,34
E/S Alcobendas-L/Fuencarral-S.S.Reyes (subterráneo) (*)	2	0,77
E/S Aldaia L/La Eliana-Torrente (subterráneo)	2	1,30
E/S Eiris L/Mesón-Puerto (subterráneo) (*)	1	4,87
E/S Eiris L/Mesón-Puerto (subterráneo) (*)	2	0,77
E/S Eiris L/Mesón-Puerto (*)	1	0,16
E/S Novelda L/Benejama-Petrel (subterráneo)	2	1,54
E/S Novelda L/Benejama-Petrel	2	0,51
E/S S.S. Reyes (subterráneo) (*)	1	0,87
E/S S.S. Reyes (*)	2	2,34
E/S Villaviciosa L/Boadilla-Lucero	2	0,08
L/Aljarafe-Rocío (*)	2	116,00
L/Andujar-Guadame 2 (*)	1	23,00
L/Brovaes-Balboa	1	0,97
L/Gandía-Valle del Cárcer (antes Vilanova) con E/S Valldigna	2	40,90
L/Gandía-Valle del Cárcer (antes Vilanova) con E/S Valldigna (subterráneo)	2	9,43
L/Maragall-Trinitat (subterráneo) (*)	2	7,48
L/Maragall-Trinitat (subterráneo) (*)	1	1,23
Reconfiguración parque S.S. Reyes (subterráneo)	1	0,45
Tres Cantos GIS 220: alimentación a TR5 (subterráneo)	1	0,16
Tres Cantos GIS 220: conexión a E/S de S.S. Reyes (subterráneo)	1	0,22
Tres Cantos GIS 220: conexión a posición híbrida (subterráneo)	1	0,19
TOTAL		214,68

(*) Pendiente de recepción de acta de puesta en servicio.

Tabla 6. Nuevas instalaciones 3

Evolución de la red de transporte

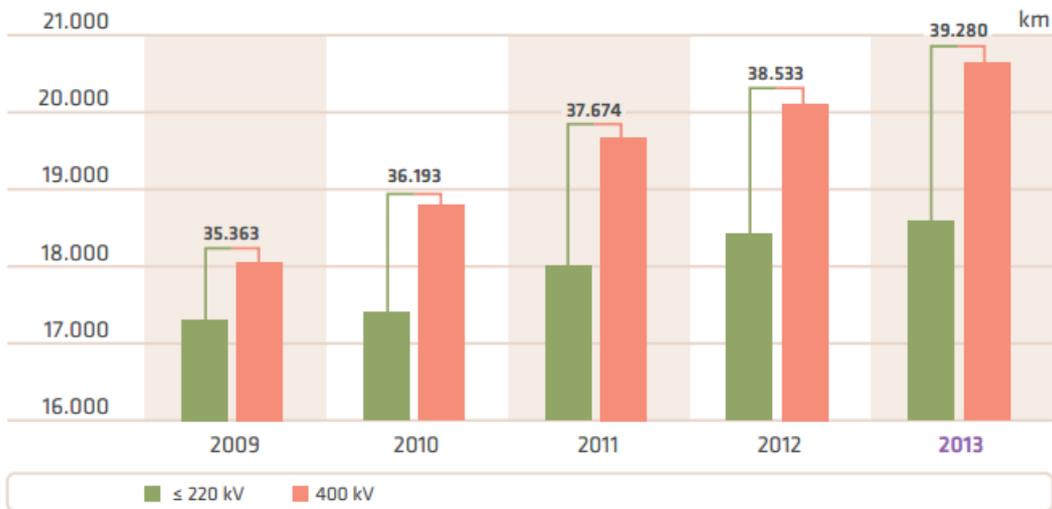


Ilustración 7. Evolución red de transporte

De todos estos datos podemos concluir con que la demanda eléctrica crece, y con ella las exigencias de funcionamiento para optimizar costes y reducir pérdidas. Por ello es necesario actualizar las técnicas empleadas en la generación y el transporte de energía eléctrica, e innovar con nuevas técnicas más eficientes y medioambientalmente sostenibles con fin de cumplir con la idea de desarrollo sostenible anteriormente desarrollada.

Centrándonos en nuestro estudio, dentro de las líneas de transporte de energía eléctrica, como parte fundamental de las mismas, se encuentran los transformadores eléctricos. Para que estos transformadores operen en correcto funcionamiento es necesario que tengan una refrigeración adecuada y dispongan del correspondiente aislamiento eléctrico.

Hasta el momento, con el objetivo de cumplir los dos requisitos para el correcto funcionamiento del transformador, se han estado usando, en los transformadores de potencia, aceites minerales. Los aceites minerales son aceites de origen fósil, provenientes de la destilación de crudo de petróleo. Estos aceites minerales, usados durante décadas, a pesar de cumplir los requisitos que se les exige, presentan una

serie de inconvenientes, que según la idea de desarrollo sostenible, es necesario solventar.

A raíz del conocimiento de los problemas reales que generan estos aceites minerales y de la concienciación medioambiental que viene creciendo desde comienzos de siglo surge, en la industria del transporte y distribución de energía eléctrica, la necesidad de iniciar una línea de investigación que plantee vías alternativas al uso de estos aceites minerales. Las vías de investigación existentes estudian la viabilidad del uso de fluidos dieléctricos alternativos, que sean medioambientalmente respetuosos, mejoren las condiciones de funcionamiento y de seguridad y otras negativas posibles repercusiones. Estos fluidos alternativos son por ejemplo los ésteres naturales y sintéticos y los aceites de silicona. En el desarrollo de estos estudios de viabilidad se emplean técnicas de análisis numérico para simular el funcionamiento de los transformadores. Con estas técnicas se pretende conocer la refrigeración de los transformadores de potencia, debido al interés existente en controlar las deficiencias/puntos caliente, ya que las altas temperaturas derivadas del funcionamiento del transformador degradan los materiales dieléctricos, el aceite y el papel, acortando su vida útil y por extensión la vida útil del transformador.

El calentamiento de los distintos componentes del transformador es la principal limitación que éstos presentan, por lo que hace imprescindible evacuar el calor y refrigerarles a través de los fluidos anteriormente citados.

Por otro lado, de manera complementaria a la línea de investigación arriba mencionada, se encuentra, no tan directamente involucrada con el respeto medioambiental, el estudio que nos concierne. Con los trabajos que a lo largo de este trabajo se van a llevar acabo, se pretenderá analizar la influencia que presentan las técnicas de mallado empleadas para simular la refrigeración de un transformador, en los resultados obtenidos.

Existen dos métodos aplicables en este estudio:



- A. El modelo de parámetros concentrados: Este método provee resultados rápidos y aproximados, basándose en simplificaciones y datos empíricos.
- B. Análisis numérico computacional o Método de Elementos Finitos (FEM): Este método es más exacto, está basado en la solución numérica de las ecuaciones diferenciales que gobiernan los procesos fluido térmicos.

El presente estudio emplea el segundo de los métodos con el fin de analizar y comparar, la influencia de la utilización de diferentes mallados en el modelado numérico de un transformador de potencia ABB de 14 KVA 66/3.6 KV, con refrigeración tipo ONAN, en la veracidad de los resultado.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se basa en la resolución de las ecuaciones que gobiernan el sistema (Navier Stokes) y que derivan de la conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía para un flujo de fluido.

A partir de simulaciones CFD es posible caracterizar con detalle la presión, velocidad y temperatura, permitiendo una comprensión de los fenómenos de fluidos que ocurren en el transformador. El principal inconveniente de CFD es que resulta computacionalmente muy costoso, lo que dificulta la simulación de geometrías excesivamente complejas. Este es el punto clave donde interviene este estudio, en la disminución de la carga computacional mientras se intenta conservar la validez de resultados.

Se realizarán tres simulaciones de un modelo con una herramienta informática de cálculo basada en el método de elementos finitos, FEM. Con este análisis concluye el estudio sobre análisis de mallados, presentando los resultados proporcionados por la herramienta informática y analizando los resultados obtenidos con los datos de partida adoptados.

Por todo lo dicho hasta el momento, comenzaremos realizando un estudio del Estado del Arte a fin de conocer el punto en el que se encuentran las investigaciones llevadas a cabo en este campo de investigación. Se hablará del fluido objeto de estudio, en este

caso analizaremos la refrigeración del transformador ABB 14KVA 66/6.3KV mediante un aceite mineral, incluyendo sus características y sus propiedades que explican las ventajas y limitaciones que posee, así como del transformador sobre el que se plantea la refrigeración. Posteriormente se continuará planteando los criterios a seguir en la investigación, incluyendo los objetivos a alcanzar, es decir, los requisitos mínimos que deben cumplir los mallados estudiados para considerarles representaciones fiables del funcionamiento del transformador.

Capítulo II: Estado del arte

II. ESTADO DEL ARTE

Con la intención de fijar los objetivos a alcanzar por la investigación, y de definir los aspectos más importantes a analizar en los diferentes mallados, para así adoptarlos como buenas representaciones de la refrigeración del transformador estudiado considerando la opción de menor carga computacional posible, se tratará de dar una pequeña explicación sobre la evolución de la refrigeración de los transformadores de potencia y sobre la situación actual de las investigaciones.

1. Transformadores de potencia

Se define cómo transformador de potencia, una máquina estática con dos o más arrollamientos, los cuáles por inducción electromagnética transforman un sistema de tensión y corriente alterna en otro sistema de igual frecuencia pero diferente magnitud en tensión y corriente alterna, para un determinado propósito de transmisión de potencia eléctrica.

Los transformadores son elementos fundamentales en las redes eléctricas, dado que permiten adecuar las magnitudes eléctricas en la producción, en la distribución (altas tensiones, bajas pérdidas) y en consumo (valores medios en consumos industriales, y bajos en domésticos).

1.1. Componentes de un transformador.

Se considera que el transformador, de forma básica, dispone de una entrada y una salida, formadas respectivamente por bobinados generalmente de cobre, pudiendo ser también de aluminio. Son comúnmente denominados arrollamientos, o devanados, primario para el bobinado de entrada y secundario para el de salida. De forma

simplificada, se considera que ambos devanados se encuentran separadamente arrollados a un mismo elemento, denominado núcleo magnético.



Ilustración 8. Centro de transformación

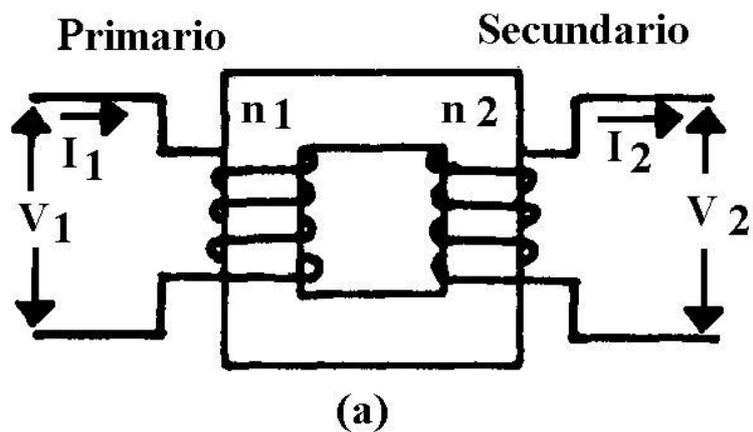


Ilustración 9. Esquema básico transformador

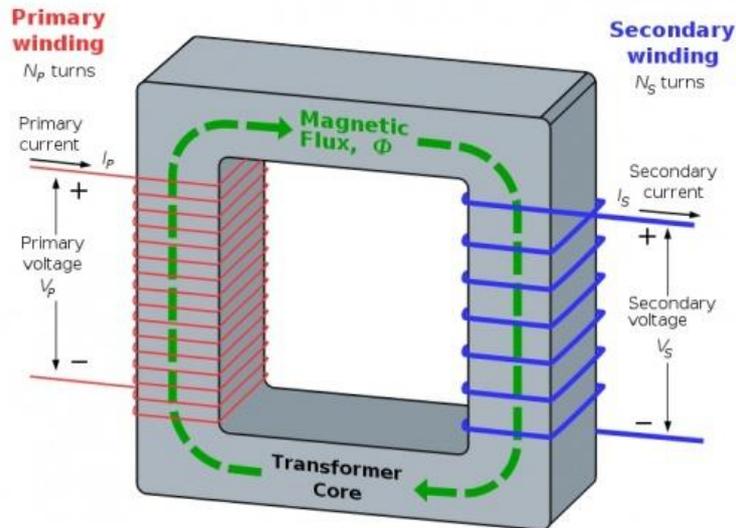


Ilustración 10. Esquema básico transformador 2

El núcleo constituye el circuito magnético, el cual está fabricado de lámina de acero conteniendo un alto porcentaje de hierro y un pequeño porcentaje de silicio. Su función es conducir el flujo magnético entre los arrollamientos, al tiempo que sirven de soporte estructural.

De acuerdo con la posición que guardan los devanados respecto al núcleo en la construcción del transformador, se clasifican en acorazados, en los que, los devanados están en su mayor parte abrazados por el núcleo magnético, y de columnas en los que son los devanados los que rodean casi por completo el núcleo magnético.

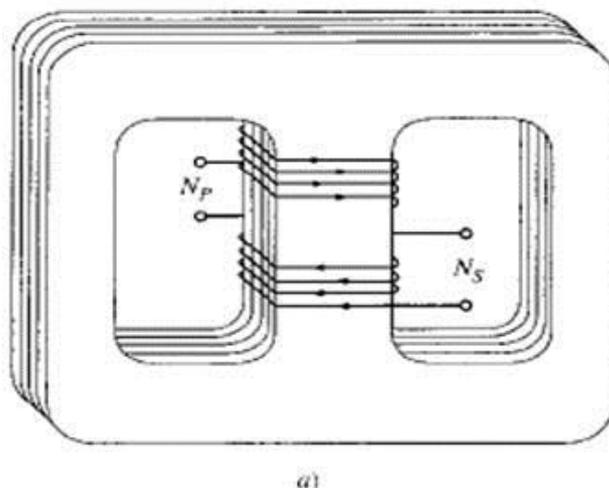


Ilustración 11. Transformador núcleo acorazado

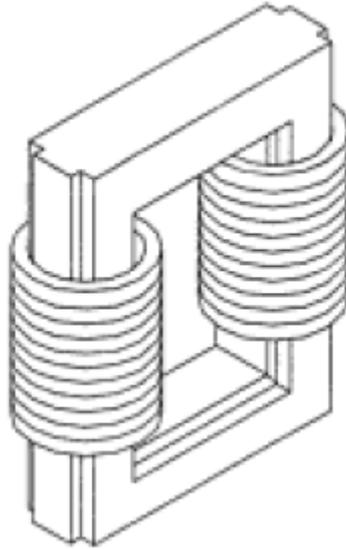


Ilustración 12. Transformador núcleo columnas

Los devanados constituyen el circuito eléctrico del transformador; se realizan por medio de conductores de cobre, en forma de hilos redondos, y de sección rectangular y estarán recubiertos por una capa aislante. Los devanados pueden ser concéntricos o alternados. En los devanados concéntricos los bobinados tienen forma de cilindros coaxiales, colocándose en arrollamiento de baja tensión y a continuación el de alta tensión intercalando entre ellos 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 baja y alta Tensión se suceden alternativamente a lo largo de la columna.

Tanto el núcleo como los devanados del transformador, están alojados en una cuba en la cual van sumergidos en un líquido, normalmente aceite, que tiene como funciones la refrigeración y el aislamiento, y que más adelante vamos a desarrollar, ya que son los objetivos principales a alcanzar en este estudio.

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

Por último, mencionar los aisladores pasantes como parte del transformador encargada de llevar al exterior los bornes de media tensión. Estos aisladores están

construidos de porcelana, rellenos de aire o aceite. Los aisladores pasantes nos pueden permitir distinguir a simple vista el nivel de tensión de un transformador debido a que generalmente, son más altos cuanto mayor es el nivel de tensión del transformador.



Ilustración 13. Aisladores pasantes transformador

1.2. Funcionamiento de un transformador

Los principios fundamentales en que se basan los transformadores, al igual que otras máquinas eléctricas son las leyes de Ampere, Faraday y Lenz simplificadas para campos cuasiestacionarios en circuitos magnéticos.

El funcionamiento de los transformadores se basa en la ley de inducción magnética. Tras conectar los bornes del primario del transformador a la alimentación esta le proporciona una tensión, cerrando el circuito, que genera una corriente a través de él. esta intensidad de corriente es capaz de generar una fuerza magnetomotriz en los devanados del primario, que se traduce respectivamente en una excitación magnética h , y ésta en una inducción magnética b , generando por el núcleo un flujo magnético ϕ que se transmite por el mismo hasta los devanados del secundario, donde según la ley de Faraday y Lenz, es capaz de producir una tensión en los bornes de dichos devanados que, con el circuito del secundario cerrado, se traduce en una intensidad de corriente por el secundario.

Por tanto, con esto se ha conseguido que unas determinadas tensión y corriente en el primario se hayan transformado en otras diferentes en el secundario. La relación de valores depende, de la construcción del circuito magnético (valor de magnetización del núcleo, número de espiras formando el arrollamiento, la sección de estas, y otros factores).

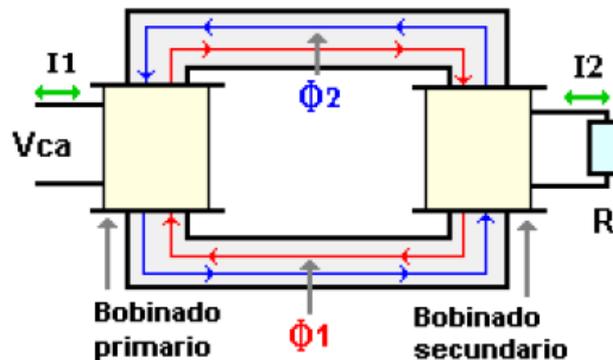


Ilustración 14. Esquema proceso de inducción transformador

1.3. Posibles pérdidas en un transformador

En todas las máquinas eléctricas existe una fracción de la potencia absorbida de la red que se convierte en calor y no se utiliza, constituyendo las pérdidas de la máquina.

El transformador por su construcción tiende a poseer pérdidas en los conductores y en el núcleo, dependiendo del tamaño del núcleo se puede saber la potencia máxima que puede llegar a tener, pero por sus características se llega a perder potencia en forma de calor, cuanto más calor exista mayor será la potencia perdida.

En un transformador se producen principalmente las siguientes pérdidas: por corrientes de Foucault, pérdidas por histéresis y pérdidas en el cobre del bobinado.

Las pérdidas por corriente de Foucault y por histéresis son las llamadas pérdidas en el hierro. Estas pérdidas se producen en el transformador en vacío. Para reducir la

perdida de energía, y la consiguiente pérdida de potencia, es necesario que los núcleos que están bajo flujo variable no sean macizos; deberán estar contruidos con chapas magnéticas de espesores mínimos, apiladas y aisladas entre sí, de esta manera, la corriente eléctrica, al no poder pasar de unas chapas a otras, tiene que hacerlo independientemente en cada una de ellas, con lo que se induce menos corriente y disminuye la potencia perdida por corrientes de Foucault.

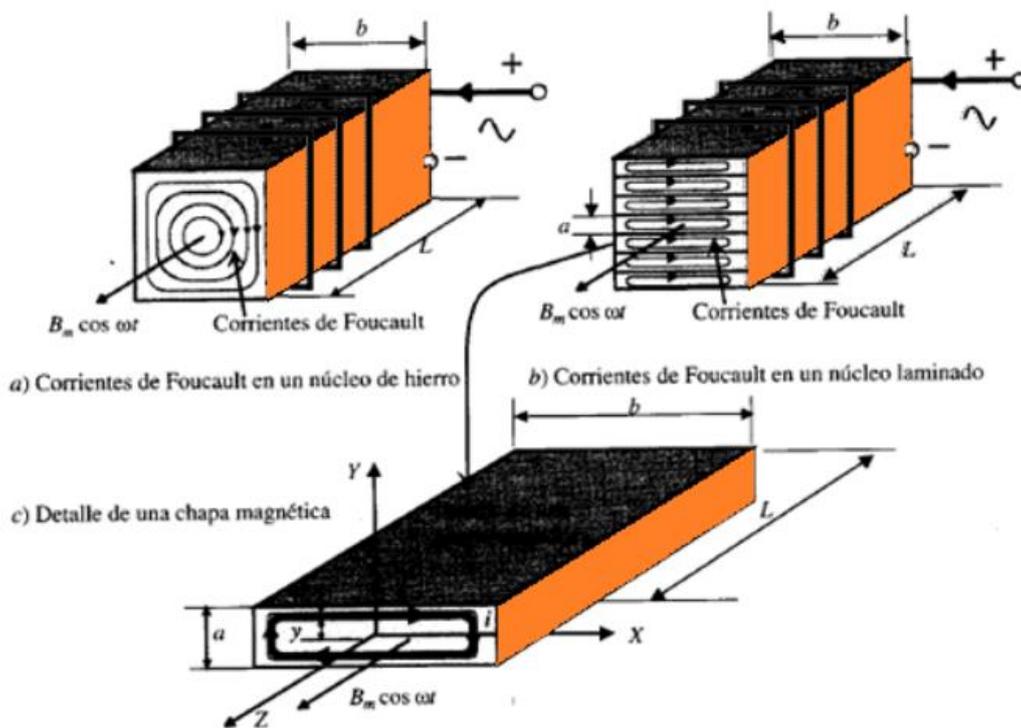


Ilustración 15. Corrientes de Foucault

La potencia perdida por la histéresis depende esencialmente del tipo del material y de la frecuencia, pero como ésta se mantiene constante en una misma zona o país, la inducción magnética dependerá del material de la chapa.

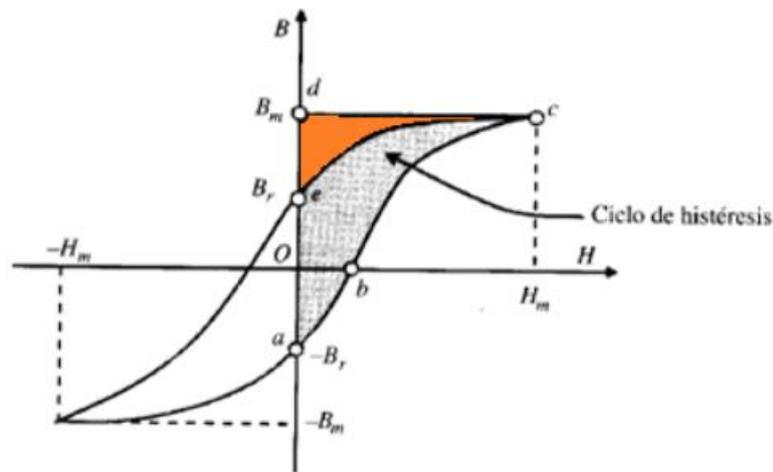


Ilustración 16. Curva de histéresis

La curva de histéresis muestra la curva de magnetización de un material. Sea cual sea el material específico, la forma tiene características similares.

- Al principio, la magnetización requiere un mayor esfuerzo eléctrico. Este intervalo es la llamada zona reversible.
- En un determinado punto, la magnetización se produce de forma proporcional. En ese punto se inicia la denominada zona lineal.
- Finalmente, se llega un instante a partir del cual, por mucha fuerza magnética que induzcamos al material, ya no se magnetiza más. Este es el llamado punto de inducción de saturación, que determina el inicio de la llamada zona de saturación.

Las pérdidas en el cobre o en los bobinados del transformador, se deben a la disipación de calor que se producen en los devanados. Estas pérdidas son proporcionales a las resistencias de cada bobinado y al cuadrado de la corriente que circula en ellos.

Los fabricantes de transformadores suelen proporcionar el dato de la potencia activa que tiene el transformador cuando se realiza el ensayo de cortocircuito. En el ensayo de cortocircuito se conecta el transformador a tensión nominal, cortocircuitando el secundario. Se mide en este ensayo la potencia consumida en el transformador en estas condiciones Pcc. A esta potencia se le denomina pérdidas en el cobre a máxima

potencia, porque es la consumida por los arrollamientos cuando circula la intensidad nominal.

Además de estas pérdidas, que están directamente implicadas en el funcionamiento, existen otras pérdidas que ocurren en la máquina durante su operación. Son las debidas al funcionamiento de elementos auxiliares en el transformador como ventiladores, bombas, etc.

1.4. Rendimiento de un transformador

Pese a la existencia de las pérdidas anteriormente citadas, los transformadores de potencia son máquinas eléctricas muy eficientes, alcanzando habitualmente rendimientos entorno al 99.5% o mayor; o lo que es lo mismo, las pérdidas reales de potencia son usualmente menores del 0.5% de la potencia aparente nominal.

El rendimiento del transformador se define como la relación entra la potencia cedida al exterior de la maquina por el bobinado secundario y la potencia absorbida por el bobinado primario, o lo que es lo mismo, el cociente entre la potencia útil en el secundario y la potencia total entregada en el primario.

$$\text{rendimiento } \eta(\%) = \left[\frac{kVA \text{ nominal}}{(kVA \text{ nominal} + \text{pérdidas totales})} \cdot 100 \right]$$

Ecuación 1. Rendimiento transformador

Las pérdidas totales son la suma de las pérdidas magnéticas y eléctricas. El rendimiento generalmente decrece ligeramente con el incremento de la carga, al aumentar las pérdidas eléctricas.

La existencia de todas las pérdidas se traducen en calentamiento de la máquina. El calor producido durante el funcionamiento en los devanados y en el núcleo, circula a

través del resto de la máquina hasta alcanzar el exterior mediante mecanismos de convección y radiación.

Tras la conexión de la máquina, se produce el incremento progresivo de la temperatura y generación de calor hasta alcanzar las condiciones de servicio, en las que la temperatura se mantiene constante. Esta temperatura, como veremos posteriormente, determina el diseño de la máquina, así como la selección de los materiales aislantes adecuados para lograr unas condiciones de vida y funcionamiento óptimas. El sistema de aislamiento más habitual está formado fundamentalmente por un material poroso de celulosa, polímero natural, impregnado por un líquido aislante.

La elevación de la temperatura por encima de la temperatura de servicio prevista en el diseño, conduce a la aceleración del envejecimiento de los materiales usados para la fabricación del transformador. Con respecto a los materiales aislantes, orgánicos en muchas ocasiones, sufren, en general, una degradación con el incremento de la temperatura llegando a perder su capacidad aislante. Como regla orientativa sobre la problemática de estos sobrecalentamientos para la vida de los aislantes, Montsinger estima que la vida de un aislante se reduce a la mitad o se dobla con la variación negativa o positiva de la temperatura en 10°C (respecto al máximo valor recomendado).

Por tanto, es importante también, la consideración de posibles fenómenos de fallo, como cortocircuitos o corrientes de falta, y su calentamiento asociado, para la selección de sistemas de protección, conexiones a tierra y los aislamientos en estos.

Se ha localizado en internet la existencia de otros polímeros no naturales que se usan como aislante en las carcasas de elementos de alta tensión, tales como Rotafil, que es una marca registrada que utiliza resinas epoxi (polímero termoestable) en la construcción de fibra de vidrio laminado. Las resinas epoxi son excelentes aislantes eléctricos y se usan en muchos componentes para proteger de cortocircuitos, polvo, humedad, etc.



Ilustración 17. Material aislante Rotafil [www.reinhausen.com]

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.

1.5. Refrigeración de un transformador

Es habitual dotar al transformador de sistemas de refrigeración basados en bombas de aceite y ventiladores de aire. Además de esto, es necesario mantener una determinada capacidad de transformación cuando falla alguno de ellos.

1.5.1. Tipos de refrigeración.

Los transformadores están por lo general enfriados por aire o aceite, cualquier método de enfriamiento empleado debe ser capaz de mantener una temperatura de operación suficientemente baja y prevenir “puntos calientes” en cualquier parte del transformador.

La selección del método de refrigeración de un transformador es muy importante, ya que la disipación del calor, influye mucho en su tiempo de vida y capacidad de carga, así como en el área de su instalación y costo.

Para pequeñas potencias, el aire que rodea los devanados produce suficiente evacuación de calor a través de la carcasa hacia el exterior. Si esto no fuese suficiente,

pueden usarse ventiladores adicionales, que fuercen el movimiento del aire en contacto con los devanados.

Para potencias elevadas se hace necesario el uso de un líquido refrigerante, como adelantamos anteriormente, que consiga la evacuación de calor necesaria. En este modo de refrigeración, el líquido cumple simultáneamente las funciones de aislante y refrigerante. El líquido tiene mayor capacidad de aislamiento eléctrico, debido a sus mayores valores de rigidez dieléctrica, e igualmente, mayor capacidad de refrigeración al poseer mayor calor específico y conductividad térmica que el aire.

Se dispone, por tanto, de una cuba llena del líquido refrigerante situándose inmersos el núcleo y los devanados transmitiendo su calor a dicho fluido envolvente. Éste a su vez, debido a la interacción fluido-térmica se desplaza y lleva el calor por el interior de la cuba hacia sus paredes por donde mediante convección y radiación, el calor es expulsado hacia el exterior a través de la carcasa.

El movimiento del líquido a través del transformador puede hacerse por circulación natural o forzada.

En la circulación natural, también llamado flujo no dirigido, los desplazamientos del líquido se producen libremente.

Mediante el empleo de bombas ajustadas para el tipo de fluido concreto, se consigue la circulación forzada o flujo dirigido, al conseguir el movimiento forzado del fluido en una determinada dirección y su paso a través de los devanados, consiguiéndose una más eficiente refrigeración.

En ambos casos, con aire o líquido dieléctrico, puede mejorarse la refrigeración mediante geometrías de la superficie externa de la carcasa o accesorios desmontables aumentando el área de intercambio térmico con formas tales como ondulaciones, aletas o tubos. Para transformadores de gran potencia incluso se puede llegar a optar por incluir intercambiadores de calor con agua mejorando así la refrigeración de la

carcasa o de la cuba del líquido dieléctrico, aunque su uso aumenta la complejidad y coste del diseño.

1.5.2. Nomenclatura de los métodos de refrigeración.

Los Transformadores se identifican de acuerdo con el método de enfriamiento empleada. Para transformadores sumergidos en líquido, dicha identificación se indicará mediante un código de cuatro letras de acuerdo a la norma IEC 60076-2, como se describe a continuación.

La identificación se llevará a cabo mediante cuatro letras, cada una de las cuales hace referencia a una característica.

La primera letra hace referencia al medio interno de enfriamiento:

- Letra O: Líquido aislante/refrigerante mineral o sintético con el punto de combustión $\leq 300^{\circ}\text{C}$.
- Letra K: Líquido aislante/refrigerante con punto de inflamación $> 300^{\circ}\text{C}$.
- Letra L: Líquido aislante con punto de inflamación no medible.

La segunda letra indica el tipo de mecanismo de refrigeración en el medio interno.

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

Por otro lado, la tercera letra hace referencia al medio externo de refrigeración:

- Letra A: indica que el medio es aire.
- Letra W: El medio externo está refrigerado por agua (water).

Por último, y al igual que la segunda letra, la cuarta hace referencia al mecanismo de refrigeración, en este caso del medio externo:

- Letra N: Para el caso de circulación natural.
- Letra F: Para la circulación forzada mediante ventiladores o bombas.

1.6. Métodos para evitar la degradación del líquido dieléctrico.

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

El volumen de líquido usado por transformadores de potencia es realmente grande, por lo que su deterioro prematuro, parada del transformador o sustitución, conlleva un gran coste en el mantenimiento que, por tanto, debe evitarse a toda costa.



Ilustración 18. Accidente incendio transformador

Al ser los aceites minerales o de silicona nocivos para el medioambiente, debe tenerse en cuenta su eliminación cuando sea necesaria su renovación por un nuevo líquido. Es importante también prestar atención, al hecho de que la degradación del líquido, y su consiguiente mal funcionamiento, podría provocar peligro potencial de incendios y explosiones en el transformador, cosa realmente grave con el volumen de líquido puesto en juego.

Todos los fluidos dieléctricos experimentan con el tiempo un proceso de envejecimiento y deterioro de sus propiedades. En todos ellos, aunque en cada uno de forma diferente, la elevación de temperatura, el contacto con aire, la presencia de humedad y de oxígeno provoca la oxidación y posible formación de lodos y otros subproductos que alteran la composición inicial del líquido y disminuyen sus propiedades aislantes y refrigerantes.

Existen varios métodos para preservar las propiedades del líquido del transformador y las estructuras aislantes que este penetra. El diseño de la cuba, es el método más extendido, aunque existen también otros métodos como el Relé Buchholz. Ambos métodos vamos a desarrollarlos a continuación.

1.6.1. Diseño de la cuba

Como hemos dicho anteriormente el diseño de la cuba es el método más extendido para preservar el líquido dieléctrico. Los diseños más comunes son los siguientes:

- Sistemas de presión positiva: llevan consigo el uso de gases inertes para mantener la presión positiva en el espacio de gas. Un gas inerte, habitualmente de una botella de nitrógeno comprimido, es progresivamente inyectado en el espacio de gas cuando la presión interna cae fuera de rango.
- Sistemas de tanque sellado: tienen el tanque interior hermético de la atmosfera y mantienen una capa de gas, un espacio o colchón de gas que se asienta sobre el líquido. El volumen del conjunto, gas y líquido, se mantiene constante. En estos tipos de tanques, pueden darse presiones internas negativas en bajas cargas o temperaturas y presiones positivas con carga e incremento de temperatura.
- Sistemas con depósito de expansión: poseen un depósito auxiliar situado en la parte superior del transformador. Son usados tanto con o sin bolsa de aire. Si la poseen, proporcionan una mayor separación de la atmosfera exterior. Estas bolsas se denominan también, por su funcionamiento, “vejigas” o diafragmas. El tanque principal del transformador está completamente lleno de líquido, y el tanque auxiliar está parcialmente lleno, cambiando esta situación según las expansiones y contracciones del líquido.

1.6.2. Relé de Buchholz

En el campo de la distribución y transmisión de la energía eléctrica, el relé de Buchholz, es un dispositivo de seguridad montado sobre transformadores que tengan una refrigeración mediante aceite, equipado con una reserva superior llamada "conservador". El relé de Buchholz es usado como un dispositivo de protección sensible al efecto de fallas dieléctricas dentro del equipo.

El relé Buchholz tiene dos formas de detección las cuales son:

- En caso de una pequeña sobrecarga, el gas producido por la combustión se acumula en la parte de arriba del relé y fuerza al nivel de aceite a que baje. Un switch flotante en el relé es usado para disparar una señal de alarma. Este mismo switch también opera cuando el nivel de aceite es bajo, como en el caso de una pequeña fuga del refrigerante.

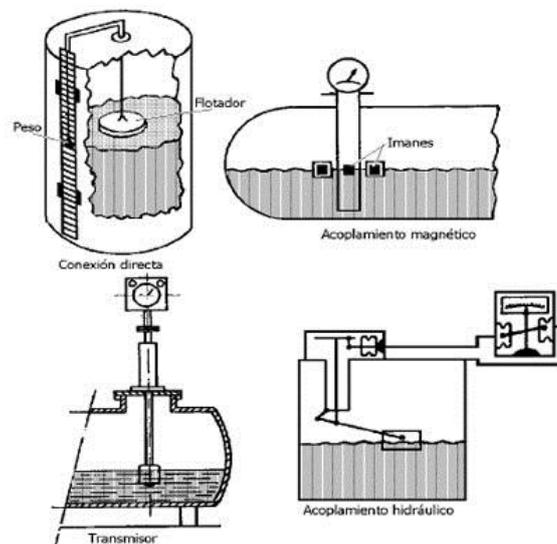


Ilustración 19. Relé de Buchholz

- En caso de producirse un arco, la acumulación de gas es repentina, y el aceite fluye rápidamente dentro del conservador. Este flujo de aceite opera sobre el switch adjunto a una veleta ubicada en la trayectoria del aceite en movimiento. Dicho switch normalmente activa un circuito interruptor automático que aísla el aparato antes de que la falla cause un daño adicional.

El relé de Buchholz tiene una compuerta de pruebas, que permite que el gas acumulado sea retirado para realizar ensayos. Si se encuentra gas inflamable en el relé es señal de que existieron fallas internas tales como sobre temperatura o producción

de arco interno. En caso de que se encuentre aire, significa que el nivel de aceite es bajo, o bien que existe una pequeña pérdida.

2. Historia de los líquidos refrigerantes

Los primeros transformadores construidos tenían pequeñas potencias y para la refrigeración era suficiente el aire del ambiente. A medida que se conseguían transformadores de mayores potencias había que buscar soluciones, la primera solución encontrada para una mayor refrigeración fue, desde comienzos del siglo XX, el uso de aceite mineral obtenido de la destilación del petróleo. Sin embargo, rápidamente se descubrieron problemas en el uso de este líquido, como su potencial peligro de explosión e ignición, ya que en los comienzos de su uso, no había consideraciones sobre la dificultad de su eliminación, no se tenía la concienciación medioambiental que hay hoy en día.

En un intento de conseguir mejores condiciones de seguridad en el funcionamiento de transformadores, a comienzos de la década de los 30, se desarrolló un aceite de origen sintético que conseguía las propiedades aislantes del aceite mineral mejorando la seguridad contra incendios y explosiones en una avería del transformador. En cuanto a su composición química era un hidrocarburo aromático clorado con alto contenido en PCBs (bifenilos policlorados, estos compuestos sufren una variación de sus propiedades en función del grado de cloración, la presión de vapor y su estabilidad en el medio ambiente disminuye con el grado de cloración) que se denominó "Askarel". Aunque poseía una gran estabilidad química, resistencia al fuego y baja volatilidad a temperaturas normales, su eliminación resultaba costosa y el impacto para el medio ambiente era también notable.

Más tarde, hacia la década de los 70, tras algunos accidentes con este líquido en E.E.U.U. y Europa, se comenzó a considerar su peligrosidad en el contacto con personas y el medioambiente, siendo peligroso para la salud incluso en cortas exposiciones de baja concentración, con lo que se prohibió su uso para refrigeración de transformadores.

Aunque simultáneamente se mantuvo el uso de aceites minerales y la investigación con otros líquidos, hacia 1980 comenzó la utilización de una nueva alternativa con aislantes secos como resina epoxi. De esta manera, los devanados del transformador se sitúan completamente encapsulados en esta resina. Este método de refrigeración es apropiado para condiciones que requieran gran seguridad, ya que al ser sólido, en caso de avería no produciría derrames, y tiene muy buenas propiedades frente al fuego al no propagarlo, además de conseguir muy buen aislamiento frente a la humedad y la suciedad. Por el contrario, su construcción y adquisición supone un coste muy elevado.

Paralelamente a estos medios de refrigeración comentados, se han ensayado en ciertas aplicaciones, otros líquidos tales como ésteres sintéticos y naturales (utilizados desde los 70' y 90' respectivamente) o aceites de silicona, utilizados desde el comienzo de las prohibiciones para aceites sintéticos con PCBs.

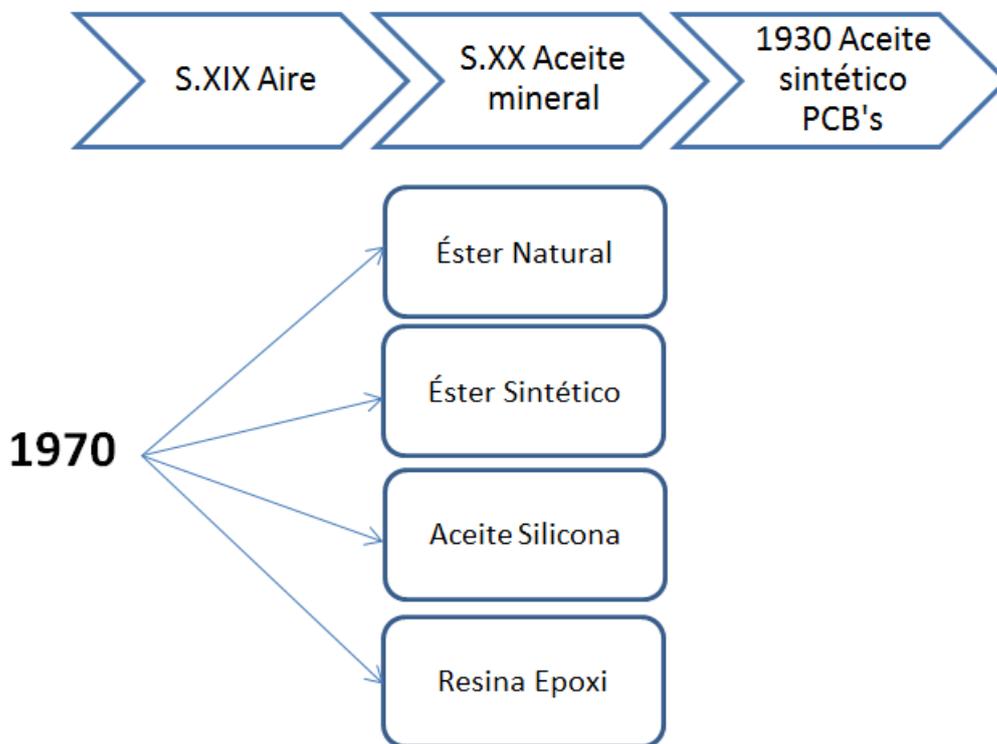


Ilustración 20. Evolución líquidos refrigerantes

El crecimiento del interés por los aspectos medioambientales y la seguridad, en compromiso con la limitación de los costes económicos, hace que existan hoy en día

muchas investigaciones sobre estos últimos líquidos nombrados, para evaluar la sustitución del aceite mineral por estos. Un importante ejemplo de investigación es el realizado por el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Cantabria, departamento que también desarrolla la línea de investigación adoptada en este estudio, el análisis computacional mediante métodos de elementos finitos, en la simulación de refrigeración de transformadores.

3. Propiedades principales de los líquidos dieléctricos

La manera más clara de exponer las propiedades de los líquidos dieléctricos es estableciendo dos grandes grupos de propiedades: las físico-químicas y las eléctricas.

3.1. Propiedades físico-químicas

Dentro de las propiedades físico-químicas, destacamos las siguientes:

3.1.1. Composición química

Es necesario señalar, respecto a este aspecto, que el aceite mineral es una mezcla compleja de hidrocarburos producida de la destilación del petróleo.

3.1.2. Seguridad medioambiental

La biodegradabilidad y la toxicidad son considerados como dos factores importantes a la hora de considerar un líquido aislante, sobre todo en áreas medioambientalmente sensibles en donde un accidente podría ocasionar elevados costes medioambientales y daños a personas. Generalmente los líquidos con una biodegradabilidad elevada y baja toxicidad, son considerados, medioambientalmente hablando, respetuosos.

Los aceites minerales son muy resistentes a la biodegradación y nocivos para el medioambiente.

3.1.3. Oxidación

En cuanto a la oxidación, su existencia puede provocar la modificación sustancial de las propiedades iniciales del líquido en base a las que se hizo el diseño, mediante la aparición de subproductos de la oxidación, deteriorando las propiedades dieléctricas, originando posible corrosión en la cuba, aumento de la viscosidad (deterioro asociado de la capacidad de refrigeración), etc. afectando todo ello negativamente al funcionamiento generalizado del transformador.

Por lo que respecta al aceite mineral, se empieza a oxidar y volatilizar con temperaturas superiores a 105 °C, produciéndose muchos subproductos, resultado de la degradación, entre ellos, ácidos orgánicos y lodos así como la separación del azufre, inicialmente presente en su composición, siendo favorecedor de la corrosión.

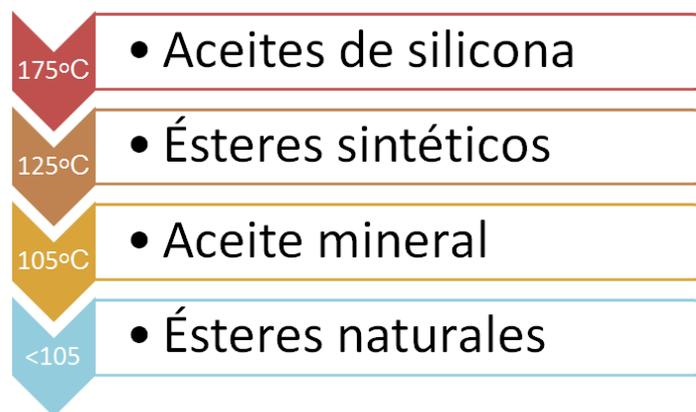


Ilustración 21. Temperaturas oxidación aceites dieléctricos

3.1.4. Viscosidad

La viscosidad juega un papel fundamental en la determinación de la capacidad del líquido como refrigerante. Valores bajos de viscosidad facilitan la impregnación de los aislantes sólidos por parte del líquido dieléctrico expulsando el aire que contienen y mejorando así su comportamiento eléctrico y su vida útil como posteriormente se argumentará.

3.1.5. Seguridad contra incendios

A la hora de elegir un líquido aislante, los usuarios consideran la seguridad contra incendios, un factor clave en aquellas aplicaciones sensibles, donde un incendio puede poner en peligro no solo la instalación, sino también vidas humanas.

3.1.6. Absorción de humedad

Importante también es la estabilidad de las propiedades del líquido frente a la exposición y presencia de humedad y el análisis de las repercusiones sobre el funcionamiento de líquido dieléctrico y los aislantes sólidos.

En la siguiente tabla se realiza un desglose de todas las propiedades citadas y se comparan las propiedades del aceite mineral con las de líquidos alternativos.



Nombre	Aceite mineral	Aceite de silicona	Éster sintético	Éster natural
Tipo de líquido	Destilado del petróleo	Sintético	Sintético	Aceite vegetal refinado
Fuente origen	Petróleo	Producto químico	Producto químico	Cultivos
Composición	Mezcla compleja de hidrocarburos	Siloxanos o polisiloxanos polimerizados	Un poliol con ácidos carboxílicos naturales sintéticos enlazados	Cadena de glicerol con tres ácidos grasos enlazados
Biodegradabilidad	Muy baja	Muy baja	Muy alta	Muy alta
Estabilidad Oxidación				
Tª Inflamación (°C)	160-170	>300	>250	>300
Tª Ignición (°C)	170-180	>350	>300	>350
Saturación de agua a Tªamb (ppm)	55	220	2600	1100
Viscosidad	Mineral < Éster sintético < Silicona < Éster Natural			

Tabla 7. Resumen propiedades físico-químicas

Propiedad	Metodología	Límite
1- Función		
Viscosidad a 40 °C	ISO 3104	Máx. 12 mm ² /s
Viscosidad a -30 °C	ISO 3104	Máx. 1800 mm ² /s
Punto fluidez	ISO 3016	Máx. -40 °C
Contenido agua	IEC 60814	Máx. 30 mg/kg
Voltaje ruptura	IEC 60156	Mín. 30 kV
Densidad a 20°C	ISO 3675 - 12185	Máx. 0,895 g/ml
DDF a 90°C	ISO 14596	Máx. 0,005
2- Estabilidad		
Apariencia	---	Clara, sin materia en suspensión.
Acidez	IEC 62021-1	Máx. 0,01 mg KOH/g
Tensión superficial	ISO 6295	No hay requisitos
Azufre total	ISO 14596	No hay requisitos
Azufre corrosivo	DIN 51353	No corrosivo
Aditivos antioxidantes	IEC 60666	(U) aceites no-inhibidos: no detectable
		(T) aceites con inhibidor: máx 0,08%
		(I) aceites inhibidos: 0,08-0,40 %
Contenido Furfural	IEC 61198	Máx. 0,1 mg/kg
3- Actuación		
Estabilidad oxidación	IEC 61125 (C)	
-Acidez total		Máx. 1,2 mg KOH/g
-Lodos		Máx. 0,8%
DDF a 90°C	IEC 60247	Máx. 0,5
Gasificación	IEC 60628 (A)	No hay requisitos
4- Salud, seguridad y medio ambiente		
Evaporación flash	ISO 2719	Mín. 135 °C
Contenido PCA	BS 2000 parte 346	Máx. 3%
Contenido PCB	IEC 61619	No detectable

Tabla 8. Normas aplicables

3.2. Propiedades eléctricas

Por lo que respecta a las propiedades eléctricas, la mayoría de los parámetros que se estudian buscan conseguir el entendimiento del funcionamiento que permitirá el determinado líquido dieléctrico en su aplicación en el transformador.

Para ello, se caracterizan desde el punto de vista dieléctrico estos fluidos, observando tensiones de ruptura que es capaz de soportar (rigidez dieléctrica), y otras pruebas como la ruptura por pulso de tensión y la descarga parcial.

3.2.1. Tensión de ruptura

La determinación de la tensión de ruptura busca el valor de tensión límite para el que el líquido dieléctrico pierde su capacidad dieléctrica. Así mismo, estas pruebas se realizan también sobre el aislante sólido (papel de celulosa en gran número de aplicaciones) estando éste impregnado con los diferentes líquidos, todo ello de acuerdo a normativas internacionales que caracterizan los resultados.

- Las tensiones de rupturas del papel de celulosa son similares, con independencia del líquido de impregnación.
- Esta característica es extremadamente sensible a la presencia de impurezas en el líquido. Se podría decir que este parámetro es más una medida de su nivel de contaminación que de su capacidad dieléctrica. Por ejemplo, las tensiones de ruptura de los aceites minerales se deterioran rápidamente con el incremento de la humedad al no ser disuelta en el líquido aislante.
- Por otro lado, la presencia de partículas de microfibra de celulosa, que atraen las moléculas de agua y se combinan entre ellas, provoca la reducción de la tensión de ruptura en todos los líquidos a medida que se incrementa la humedad relativa.

3.2.2. Descarga parcial

Otra de las pruebas eléctricas habitualmente utilizadas para caracterizar los líquidos aislantes son las de descarga parcial. Éstas se llevan a cabo con campos magnéticos no homogéneos en gaps de aceite relativamente grandes.

3.2.3. Ruptura por pulso de tensión

Este tipo de test se ha demostrado muy inferiormente afectado por la presencia de impurezas en el líquido con respecto a la medición de la tensión de ruptura previamente analizada. Por lo tanto, permite evaluar de manera más precisa la característica dieléctrica, ajena en este caso a la presencia de impurezas, sirviendo además para comparación e interpretación de los resultados obtenidos por ambas pruebas.

3.3. Influencia de los líquidos dieléctricos en el diseño de los equipos

En este apartado se tratará la repercusión que tiene el uso de líquidos refrigerantes en el diseño de los componentes del transformador. Para ello se realiza la comparación de los parámetros de mayor importancia que se deben de tener en cuenta, como son la viscosidad, oxidación, conductividad, densidad, calor específico, etc.

3.3.1. Vida útil del transformador

Como primera aproximación, la vida útil habitual, en correctas condiciones de trabajo, del aceite mineral usado en un transformador es de aproximadamente 30 años, sin que sean necesarios mantenimientos adicionales a los inicialmente programados.

3.3.2. Diseño de la cuba

Un factor importante sobre elección de estos diseños es el coeficiente de expansión térmica del líquido dieléctrico seleccionado, dependiente de las propiedades del mismo.

Se considera que el transformador dispone de un tanque que puede encontrarse funcionando bajo tres diseños básicos, anteriormente ya citados, y que pueden servir para clasificar los transformadores.

Estos diseños básicos son:

- Tanque de respiración libre con depósito de expansión.
- Tanque de respiración libre con respirador.
- Tanque sellado herméticamente.

La respiración libre con depósito de expansión ha sido la opción elegida, por su sencillez y economía, por la mayoría de los usuarios en todo el mundo a lo largo de muchas décadas.

La respiración libre mediante tubo respirador es una tecnología muy común en el Reino Unido. Resulta recomendable instalar un desecante (silicagel) en el mencionado tubo respirador, con la finalidad de evitar una excesiva entrada de humedad en el tanque.

La tecnología de sellado hermético de los transformadores es bien conocida y ha sido aplicada durante mucho tiempo en transformadores de distribución con tanque corrugado expansible. El hermetismo con radiadores expansibles evita la entrada de oxígeno y humedad.

Ciertos estudios sugieren que el funcionamiento con altas temperaturas requiere de la ausencia de oxígeno. Por ello, el sistema de preservación de aceite debe estar dotado de un sistema que prevenga eficazmente la entrada de aire con humedad y oxígeno. Para cumplir con este requisito, los transformadores con sistemas de aislamiento híbrido se diseñan con depósito de expansión dotado de bolsa de goma que evita el contacto directo aire-aceite.

3.4. Aislamientos sólidos

La vida útil de un transformador depende de varios factores, entre los que destaca como determinante la vida de los aislamientos sólidos.

3.4.1. Aislamiento de celulosa

La celulosa (cartón prensado o papel) con el aceite mineral es la combinación de aislamiento sólido/líquido más comúnmente utilizada en los transformadores. Sin embargo, esta combinación puede tener algunas desventajas operativas. Por ejemplo:

- El aceite mineral es sensible a la entrada de humedad.
- La celulosa no puede ser usada con altas temperaturas.
- El aceite mineral con agua y la celulosa húmeda pueden ocasionar fallos en el transformador.

3.4.2. Otros aislamientos

Cabe destacar la existencia de otros materiales de aislamiento, como por ejemplo la Aramida. Este aislamiento es hoy en día habitualmente utilizado en todo el mundo. Así, su aplicación en tracción ferroviaria, donde se producen altas temperaturas en el transformador por sobrecarga, ha demostrado el bajo impacto de las condiciones de funcionamiento, en la vida útil de este sistema de aislamiento. La Aramida, a pesar de presentar mejores propiedades, no es muy utilizado en transformadores debido a su elevado coste.

Por último, mencionar la existencia de sistemas híbridos de aislamiento. Un sistema de aislamiento híbrido es aquel que aísla las zonas más frías del transformador con papeles tradicionales Kraft a base de celulosa, mientras que el papel de Aramida se aplica en las zonas más calientes, como en conductores envueltos.

3.5. Rellenado de transformadores con líquidos dieléctricos

Con el término rellenado, nos referimos al proceso de retirar el líquido de aislamiento de un transformador operativo sustituyéndolo por uno nuevo.

El procedimiento que debe seguirse es el recomendado por el fabricante del transformador o del fluido, en términos generales, es el siguiente:

La des-energetización de la unidad, su puesta a tierra, el análisis de una muestra del aceite, etc. se debe llevar a cabo de acuerdo con el procedimiento estándar fijado por el fabricante del transformador o del usuario:

- Drenaje del aceite del transformador.
- Lavado con líquido de reposición caliente.
- Drenaje del líquido residual.
- Reemplazo de las juntas y sellos dañados.
- Llenado del transformador con el nuevo fluido.
- Antes de volver a conectar, esperar un tiempo a que el nuevo fluido impregne adecuadamente el aislante sólido.

Un momento crítico del proceso son las etapas de drenaje y lavado; es importante eliminar la mayor cantidad posible de los residuos del aceite reemplazado, con el fin de no comprometer las propiedades del nuevo líquido. La información relativa a la cantidad de aceite mineral residual que puede tolerarse sin que se vean afectadas las propiedades del nuevo fluido puede obtenerse del fabricante de este último.

También es especialmente importante establecer y respetar el tiempo necesario de reposo del transformador (tiempo antes de la energización de la unidad). A menudo se recomienda, como medida adicional de seguridad, la conexión previa en vacío del

transformador durante un periodo de tiempo determinado y antes de conectar la carga.

4. Mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos se encarga del estudio del comportamiento, características y propiedades de los fluidos, bien en movimiento (dinámica de fluidos), bien en reposo (estática de fluidos).

Tradicionalmente este estudio se realiza de forma global e idealizada, mediante análisis integral, útil en muchos casos, pero limitado ya que desde ese enfoque global, no proporciona la caracterización en detalle del fluido en puntos o zonas concretos.

Para estudios en detalle, el análisis diferencial partiendo de una partícula o un volumen finito de fluido, modela matemáticamente su comportamiento al formular leyes fundamentales proporcionando la velocidad, la presión, la densidad y la temperatura del fluido.

El modelo matemático se basa en ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales, y requieren de técnicas de resolución numéricas, lo que hace esta metodología más compleja y difícil de solucionar, pudiendo no existir una solución analítica del sistema de ecuaciones, a lo que hay que añadir la complejidad extra que se añade en el caso de que el modelo tenga que representar un flujo de tipo turbulento, debido a su carácter transitorio y caótico.

4.1. Transferencia de calor

El calor se define como la forma de energía que puede ser transferida de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura. El calor puede ser transferido de tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los mecanismos de transferencia de calor requiere la existencia de una diferencia de temperatura y



siempre desde el medio de más alta temperatura a uno de temperatura más baja. En el caso de los transformadores, la transferencia de calor se realiza solo mediante conducción y convección.

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor entre dos sólidos, mientras que la convección es el mecanismo de transferencia de calor entre un sólido y un fluido que están en contacto a distinta temperatura.

Existen dos tipos de convección: natural y forzada, dependiendo de cómo se inicia el movimiento del fluido. En la convección forzada, el líquido es obligado a circular a través de una superficie o un conducto por fuerzas externas, como ventiladores y bombas. En cambio, en la convección natural la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a unas fuerzas ascensionales. El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior. La convección también se clasifica como externa o interna, dependiendo si el fluido circula por una superficie o a través de un canal. Estos mecanismos pueden ser descritos por números adimensionales que caracterizan el flujo en el interior del circuito de refrigeración del transformador. Estos parámetros nos permiten conocer si el régimen es laminar o turbulento, la eficacia de la transferencia de calor o el crecimiento de las capas límite térmica e hidrodinámica. Más adelante, en el presente apartado describiremos estos números adimensionales (Reynolds y Prandtl), su significado físico e importancia.

Por último y para completar la definición de todos los mecanismos de transferencia de calor, aunque éste no se produzca en la refrigeración de transformadores, la radiación térmica es un mecanismo, que al contrario que la conducción y la convección, no requiere de un medio material para transmitir el calor, la radiación lo transporta tanto a través de la materia como del vacío en forma de ondas electromagnéticas o fotones a la velocidad de la luz. Todo cuerpo debido a su temperatura emite este tipo de radiación, y la recibe desde los cuerpos próximos, siendo el calor emitido función de la temperatura absoluta del cuerpo y de la naturaleza de la superficie.

4.2. Parámetros adimensionales

El número de Prandtl es un número adimensional que indica comparativamente la relación entre los espesores de las capas límites cinemática y térmica.

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

Ecuación 2. Número de Prandtl

Este número mide la efectividad relativa del transporte de momento con respecto al transporte de la energía por difusión en las capas límite hidrodinámica y térmica, respectivamente. Para aceites minerales, el número de Prandtl es generalmente mayor de 100 y la capa límite térmica es más delgada que la capa límite hidrodinámica. El número de Prandtl en fluidos tiene magnitudes comprendidas desde valores inferiores a 0.01 para los metales líquidos hasta más de 100000 para aceites pesados.

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría de la superficie, la rugosidad de la superficie, la velocidad, la temperatura superficial y el tipo de fluido, entre otros aspectos.

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional. Como todo número adimensional es un cociente, una comparación. En este caso es la relación entre los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas de viscosidad}} = \frac{\rho L^2 v^2}{\eta \nu L} = \frac{\rho L v}{\eta} = \frac{L v}{\nu}$$

Ecuación 3. Número de Reynolds

El número de Reynolds nos indica el predominio de la viscosidad. Cuanto mayor sea, menor es la importancia de la viscosidad y viceversa.

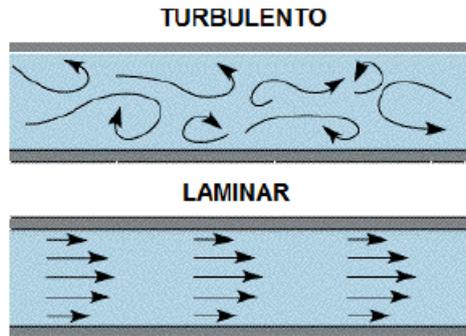


Ilustración 22. Flujos laminar y turbulento

4.3. Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones diferenciales en que se basan los modelos de análisis diferencial son conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes.

Estas ecuaciones se deducen para una cantidad finita de flujo aplicando las leyes fundamentales de conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía. Se considera un fluido dentro de una región fija del espacio (volumen de control, V_c) delimitada por una frontera o contorno (superficie de control S_c), mostrada en la Figura 23.

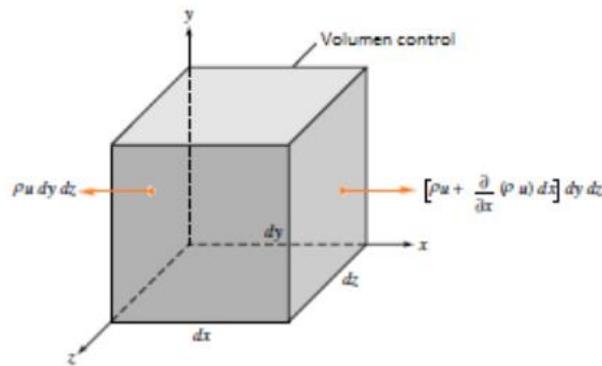


Ilustración 23. Volumen de control elemental mostrando la entrada y salida del flujo másico en las caras x, y, z

Tal y como se dijo, la velocidad es una magnitud vectorial con una componente en cada dirección de los ejes cartesianos y que depende de la posición y del tiempo, según la ecuación 4 que representa el campo de velocidades.

$$\vec{v}(r, t) = u(x, y, z, t)\vec{i} + v(x, y, z, t)\vec{j} + w(x, y, z, t)\vec{k}$$

Ecuación 4. Campo de velocidades

El teorema de transporte de Reynolds considera que, para un volumen de control fijo, la producción de magnitudes como masa, momento, energía, etc. en un sistema se corresponde con la variación de la magnitud dentro del volumen de control y los flujos entrante y saliente de dicha magnitud a través de la superficie de control.

4.3.1. Conservación de la masa

Debido a la ley de conservación de la materia, se considera que, para un volumen finito constante (Figura 23), la variación de la masa en ese volumen respecto al tiempo ha de ser nulo. Esa variación está compuesta, según Reynolds, tanto de la variación de la masa en el volumen de control como de los flujos másicos a través de la superficie de control. Teniendo en cuenta que la masa que contiene ese volumen es función de la densidad, según la ecuación 5,

$$m = \rho \cdot dV = \rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 5. Conservación de la materia

y que el flujo es resultado del producto de la velocidad del fluido, por la sección que atraviesa por la densidad (ecuación 6),

$$\dot{m} = \rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{S}$$

Ecuación 6

se realiza el balance másico sumando la variación con el tiempo de la masa en el volumen finito constante;

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial(\rho \cdot dV)}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \frac{\partial \rho}{\partial t} dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 7

con la resultante de flujos másicos de entrada y salida que atraviesan la superficie del volumen representados y recogidos, respectivamente, en las Figura 24,

Superficie	Flujo másico entrada	Flujo másico salida
x	$\rho u \, dy \, dz$	$\left[\rho u + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) \, dx \right] dy \, dz$
y	$\rho v \, dx \, dz$	$\left[\rho v + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) \, dy \right] dx \, dz$
z	$\rho w \, dx \, dy$	$\left[\rho w + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) \, dz \right] dx \, dy$

Ilustración 24. Flujos másicos en el volumen de control

quedando estos flujos;

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)dx \cdot dy \cdot dz + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v)dx \cdot dy \cdot dz + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w)dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 8

Sumando ambas partes, simplificando e igualando a cero, queda:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0$$

Ecuación 9

Correspondiéndose a partir del segundo sumando con la divergencia del vector $\rho \bar{v}$,
 luego:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{v}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v}) = 0$$

Ecuación 10

En un sistema simplificado considerado como estacionario, la densidad del fluido no varía en función del tiempo, y se llega a que el balance de los flujos que atraviesan las superficies del volumen finito ha de ser nulo.

$$(\rho \bar{v}) = 0$$

Ecuación 11

4.3.2. Conservación de la cantidad de movimiento

Basándose en la segunda ley de Newton, según la cual la variación en la cantidad de movimiento es proporcional a la fuerza neta a la que se somete un cuerpo, resultado de las fuerzas tanto internas como externas, se realiza de nuevo un balance.

Se define la cantidad de movimiento o momento lineal como el producto de la masa por la velocidad, por lo que partiendo de la ecuación 37 y multiplicándola por el campo de velocidades se llega a la ecuación 44.

$$cm = \rho \cdot \bar{v} \cdot dV = \rho \cdot \bar{v} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 12

Por efecto de las fuerzas internas y externas esta magnitud varía respecto al tiempo, reflejándose tanto en el volumen de control;

$$\frac{\partial}{\partial t} \overline{cm} = \frac{\partial(\rho \cdot \bar{v})}{\partial t} \cdot dV = \frac{\partial(\rho \cdot \bar{v})}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 13

como en los flujos entrantes y salientes, recogiendo estos en la Figura 25 para los tres ejes

Superficie	Momento lineal entrada	Momento lineal salida
x	$\rho uV \, dy \, dz$	$\left[\rho uV + \frac{\partial}{\partial x} (\rho uV) \, dx \right] \, dy \, dz$
y	$\rho vV \, dx \, dz$	$\left[\rho vV + \frac{\partial}{\partial y} (\rho vV) \, dy \right] \, dx \, dz$
z	$\rho wV \, dx \, dy$	$\left[\rho wV + \frac{\partial}{\partial z} (\rho wV) \, dz \right] \, dx \, dy$

Ilustración 25. Momentos lineales en el volumen de control

quedando el flujo total;

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u \cdot \bar{v})dx \cdot dy \cdot dz + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v \cdot \bar{v})dx \cdot dy \cdot dz + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w \cdot \bar{v})dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 14

Sumando ambas causas de la variación del momento lineal según Reynolds queda:

$$\left(\frac{\partial(\rho \cdot \bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u \cdot \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v \cdot \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w \cdot \bar{v}) \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 15

Cuyo término entre paréntesis se puede simplificar según la regla de la cadena en:

$$\bar{v} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \right) + \rho \cdot \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)$$

Ecuación 16

El primer término según la conservación de la masa vista en el apartado anterior es nulo, y el segundo término se corresponde con la derivada de la velocidad respecto al tiempo, según la ecuación 17.

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) dx \cdot dy \cdot dz = \rho \cdot \left(\frac{d\bar{v}}{dt} \right) dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 17

Esta derivada de la velocidad respecto al tiempo es el campo de aceleración, que muestra la siguiente equivalencia;

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} \right)$$

Ecuación 18

Luego se puede escribir la ecuación 17 como sigue;

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) dx \cdot dy \cdot dz = \rho \cdot \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} \right) dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 19

La variación del momento se corresponde con la fuerza neta resultante de las fuerzas exteriores que actúan en todo el cuerpo del fluido, e interiores, que actúan en las superficies. Las fuerzas exteriores se suelen reducir a la causada por acción de la gravedad, mientras que las interiores son las causadas por la variación de la presión y de los esfuerzos de cizalla debidas a la viscosidad en dichas superficies.

En el caso de la primera será proporcional a la masa de fluido, y por lo tanto a la densidad y al volumen, según la ecuación 20.

$$F_{grav} = \rho \cdot g \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 20

El diferencial de presión entre las superficies paralelas, multiplicado por estas, da lugar a la fuerza de la presión;

$$F_{pres} = dP \cdot dy \cdot dz + dP \cdot dx \cdot dy + dP \cdot dx \cdot dz$$

Ecuación 21

Por último se tienen en cuenta la variación de los esfuerzos de cizalla entre las superficies paralelas, de manera análoga con las presiones;

$$F_{visc} = dT_{\mu} \cdot dy \cdot dz \cdot \vec{i} + dT_{\mu} \cdot dx \cdot dy \cdot \vec{j} + dT_{\mu} \cdot dx \cdot dz \cdot \vec{k}$$

Ecuación 22

Sumando todas las fuerzas presentes (permaneciendo atentos a que la variación de presión en dirección del flujo es negativa), igualándolo a la variación de la cantidad de movimiento (ecuación 19) y simplificando se llega a;

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = \rho \vec{g} - \frac{dP}{dx} \vec{i} - \frac{dT_{\mu}}{dy} \vec{j} - \frac{dT_{\mu}}{dz} \vec{k} + \frac{dT_{\mu}}{dx} \vec{i} + \frac{dT_{\mu}}{dy} \vec{j} + \frac{dT_{\mu}}{dz} \vec{k}$$

Ecuación 23

Lo que se corresponde con:

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = \rho \vec{g} - \vec{\nabla} P + \vec{\nabla} T_{\mu}$$

Ecuación 24

La ley de Stokes establece que existe una relación lineal entre las tensiones cortantes y la viscosidad, y que están relacionadas con el gradiente de la velocidad.

$$T_{\mu} = 2 \cdot \mu \left[\frac{1}{2} (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{1}{3} \text{Traza} \left(\frac{1}{2} (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) \right) \cdot I \right]$$

Ecuación 25

Los gradientes de los vectores velocidad dan lugar a matrices cuadradas de 3x3, según la ecuación;

$$\nabla \vec{a} = \text{grad}(\vec{a}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial a_x}{\partial x} & \frac{\partial a_x}{\partial y} & \frac{\partial a_x}{\partial z} \\ \frac{\partial a_y}{\partial x} & \frac{\partial a_y}{\partial y} & \frac{\partial a_y}{\partial z} \\ \frac{\partial a_z}{\partial x} & \frac{\partial a_z}{\partial y} & \frac{\partial a_z}{\partial z} \end{bmatrix}$$

Ecuación 26

Mientras que la traza resulta de la suma de los elementos de la diagonal principal de una matriz cuadrada, que al ser un escalar, debe multiplicarse por la matriz unidad.

Sustituyendo la ecuación de Stockes en la ecuación 24 se llega finalmente a

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = \rho \vec{g} - \vec{\nabla} P + \vec{\nabla} (\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)) - \frac{2}{3} \vec{\nabla} (\mu (\nabla \vec{v}))$$

Ecuación 27

O lo que es igual

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \left[-P \cdot I + \mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \vec{v}) I \right]$$

Ecuación 28

De nuevo, en caso de considerar un flujo estacionario, el primer término del lado izquierdo de la igualdad será nulo, quedando:

$$\rho \cdot (\vec{v} \cdot \nabla \vec{v}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \left[-P \cdot I + \mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \vec{v}) I \right]$$

Ecuación 29

Generalizando esta ecuación para casos en que las fuerzas exteriores no se limiten a la acción de la gravedad, por ejemplo en un flujo forzado, queda;

$$\rho \cdot (\vec{v} \cdot \nabla \vec{v}) = \vec{F} + \vec{\nabla} \left[-P \cdot I + \mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \vec{v})I \right]$$

Ecuación 30

4.3.3. Conservación de la energía

Esta ecuación se obtiene de nuevo realizando un balance de energía térmica en un elemento de volumen diferencial, también según Reynolds, en el que la variación de la energía térmica del elemento se corresponde con el balance de la energía térmica entrante, la saliente y la variación neta debida a fuentes de calor dentro del volumen.

El balance de la entrada y salida de calor a través de las superficies del volumen de control de la Figura 23 viene dada por el producto de la variación de flujo térmico y la superficie, de manera similar a lo que ocurre con la masa y con la cantidad de movimiento, quedando:

$$\partial q_x \cdot dy \cdot dz + \partial q_y \cdot dx \cdot dz + \partial q_z \cdot dx \cdot dy$$

Ecuación 31

Sacando factor común resulta:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dz = \nabla \vec{q} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 32

Teniendo en cuenta que el flujo de calor se realiza mediante conducción, que según la ley de Fourier se formula:

$$\vec{q} = k\nabla T$$

Ecuación 33

Luego introduciendo esta ecuación 33 en la 32 se llega a:

$$\nabla \vec{q} \cdot dx \cdot dy \cdot dz = \nabla(k\nabla T) \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 34

La generación de calor, suponiéndose uniforme Q, por unidad de volumen será;

$$Q \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 35

El calentamiento del volumen se traduce como el aumento de temperatura de la masa contenida en el en función de su calor específico. Esta masa depende de la velocidad, y por tanto el calentamiento queda;

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 36

La derivada de la temperatura respecto del tiempo es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{dz}{dt}$$

Ecuación 37

E introduciendo los equivalentes a la velocidad;

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} u + \frac{\partial T}{\partial y} v + \frac{\partial T}{\partial z} w$$

Ecuación 38

De nuevo se modifica en:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v}\vec{\nabla}T$$

Ecuación 39

Y se sustituye en la ecuación 36, quedando:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v}\vec{\nabla}T \right) dx \cdot dy \cdot dz$$

Ecuación 40

Igualando y simplificando las ecuaciones 34, 35 y 40 queda finalmente:

$$\nabla(k\nabla T) + Q = \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v}\vec{\nabla}T \right)$$

Ecuación 41

Para un flujo estacionario se elimina la derivada parcial respecto al tiempo pues es nula.

$$\nabla(k\nabla T) + Q = \rho C_p (\vec{v}\vec{\nabla}T)$$

Ecuación 42

5. Técnicas de análisis numérico

El motivo de intentar representar de la manera más aproximada el funcionamiento de un equipo como los transformadores de potencia, y en concreto de una parte tan importante como el sistema de refrigeración, del que depende la vida útil, puede parecer evidente. Para el usuario de la instalación conocer la temperatura en un transformador es importante para determinar la carga que puede sostener y, en base a ella y al uso que le se pretende dar, estimar la durabilidad del equipo. Para el



diseñador es incluso más importante, pues sirve para dimensionar y adecuar cada componente del transformador a la potencia nominal esperada, desde la cantidad de cobre en los arrollamientos y demás conductores, el tipo de refrigeración y sus conductos, el aislamiento necesario e incluso el diseño del sistema de control.

Los excesos de carga en el transformador producen:

- Temperaturas en devanados, partes fijas, aislamiento y aceite por encima de los límites. En los aislantes conllevan el deterioro de las propiedades mecánicas a altas temperaturas y la degradación por hidrólisis, formando ácidos.
- Incremento del flujo de dispersión en el núcleo aumentando las pérdidas por esta causa.
- Variaciones en la humedad y contenido de gas de aislantes y líquido refrigerante. El gas reduce la capacidad dieléctrica del refrigerante. La humedad reduce la vida útil del aislante.
- Mayor estrés de los conductores

En consecuencia aumenta el riesgo prematuro de fallo asociado a las mayores corrientes y temperaturas, tanto a corto como a largo plazo. Los transformadores de potencia son más sensibles a las sobrecargas, lo que junto con su importancia en el sistema eléctrico, hace que sus temperaturas límites sean inferiores.

Por tanto los beneficios derivados de la estimación del funcionamiento son varios, estudiando la condición del transformador se puede alargar la vida útil evitando hacerlos funcionar por encima de sus condiciones de servicio, logrando un beneficio económico, y no sólo por esta vía, sino también al evitar las consecuencias económicamente negativas del funcionamiento en sobrecarga o de un corte, o incluso mediante el ahorro de un correcto dimensionamiento durante el diseño.

Ante dichas necesidades de previsión y en respuesta a ellas han ido surgiendo métodos más o menos precisos (y complejos), que han ido mejorando con el tiempo su

capacidad de generar resultados fiables. La implementación de los sensores de fibra óptica en los ensayos en transformadores ha conseguido que los parámetros empíricos de estos modelos matemáticos sean más acertados, aumentando la precisión de los resultados que se obtienen.

5.1. Estimación de puntos calientes

Durante el análisis térmico del transformador se estudia la transferencia de calor a través de los equipos. El modelado térmico consiste en utilizar el análisis térmico para desarrollar un modelo matemático que prediga la distribución de temperaturas de los equipos. La temperatura de punto caliente es el principal factor que limita el uso de los transformadores, por ello es fundamental su conocimiento. Su precisión depende de los principios que guían el diseño del modelo y de la precisión de los parámetros utilizados. Las principales fuentes de error son:

- En el sistema de medición, muy sensible
- En los cálculos numéricos debido a redondeo y estimación
- Errores debido a suposiciones erróneas durante el modelado

En transformadores ya construidos se realizan pruebas en funcionamiento en los que mediante sensores de fibra óptica o termopares se miden directamente temperaturas en partes concretas estimando el valor y posición de los puntos calientes a partir de ellas, o bien se toman muestras del refrigerante y se analizan los gases disueltos en ellos, puesto que algunos de esos gases son expulsados por los materiales orgánicos aislantes sometidos a altas temperaturas, pudiendo relacionar su concentración con la magnitud de dichas temperaturas, o incluso se procede a estudiar el estado de los aislamientos cuando un transformador es retirado o falla. La normativa IEC 60076-2 recopila la forma y condiciones en que se llevan a cabo estas pruebas y cómo se obtienen las temperaturas de punto caliente.



Desde mediados de los 80, la medición directa de los puntos calientes ha ido ganando terreno, a medida que mejoraban las prestaciones de los sensores, que eran frágiles y costosos, buscando el compromiso entre el número necesario de sensores y la localización óptima de los mismos. Generalmente se considera que los puntos calientes son más propensos a aparecer en los discos superiores, el flujo disperso es superior y la temperatura alrededor también, pero hay casos en que se encuentran más abajo en los devanados, por lo que hay que repartir los sensores.

Sin embargo, durante la etapa de diseño no se pueden realizar mediciones ni análisis. Tradicionalmente los incrementos máximos de temperatura tomados durante el diseño estaban estandarizados, y se extrapolaban desde diseños preexistentes partiendo de factores de general aceptación, para ser comprobados durante ensayos en el control de calidad. Con el surgimiento de diseños mayores y más sofisticados los puntos calientes pasaron a estimarse a partir y en función de las características del transformador, en procedimientos más críticos, que requieren de herramientas informáticas adecuadas para llevarse a cabo.

Por tanto los métodos de estimación de temperaturas, ordenados según nivel creciente de detalle son:

- Métodos de correlación
- Modelos de redes termo-hidráulicas (THNM)
- Dinámica computacional de fluidos (CFD)

Estos métodos no son exclusivos ni independientes, se pueden aplicar a diferentes fases del diseño y utilizar los datos obtenidos en uno como fuente del otro. Esto se justifica en parte debido a que tanto los modelos de redes como la dinámica computacional requiere un gran esfuerzo de cálculo, incluso cuando se realizan simplificaciones en el modelo, y aunque, si bien, los modelos de redes requieren un considerable menor esfuerzo al modelar la distribución de flujos y temperaturas en el transformador, no pueden hacerlo en puntos concretos dentro de los conductos, ignorando los efectos de fenómenos como las venas calientes. Esto se debe a que

mediante los modelos de redes se recrea globalmente la disposición de la red de refrigeración, mientras que la dinámica computacional utiliza una discretización espacial que le permite detallar los flujos en cualquier punto.

En vista del tiempo y esfuerzo necesarios, no es razonable esperar que la modelización por los métodos más detallados se realice en el día a día del diseño de transformadores, reservándose para cuando se tengan que verificar factores empíricos en diseños tipo o se realicen modificaciones significativas en los diseños.

La elección del tipo de modelado por tanto depende del tipo de transformador y de sus diferentes fases de diseño. Por ejemplo para transformadores modificados, teniendo la información de los ensayos de funcionamiento disponibles, o donde el aceite es sustituido por otro, puede bastar con un modelo térmico simple. Para nuevos modelos en fabricación, en cambio, conocido el diseño, se utilizan los más novedosos modelos para lograr predicciones de temperatura precisas.

5.1.1. Métodos de correlación

En estos casos hay que referirse a IEC 60076-7 [24] pues proporciona modelos matemáticos que, en función de la carga, temperaturas del medio refrigerante y el tiempo, estiman temperaturas de operación del transformador, particularmente la temperatura de punto caliente, que a su vez sirve para evaluar el envejecimiento del transformador en ese momento. Se suele considerar el incremento de temperaturas durante el funcionamiento estacionario del transformador, aunque también es importante conocerlas durante regímenes transitorios y en sobrecarga.

Esta metodología se basa en el uso de un diagrama térmico básico de los transformadores refrigerados en aceite (Figura 26), que representa la temperatura frente a su coordenada Y en el transformador, en el que ya de inicio se supone que lineal el aumento de la temperatura a medida que el flujo asciende en el transformador, suponiendo la primera simplificación, tal y como se puede ver por la

relación de las temperatura del aceite en el fondo del transformador (punto D), la temperatura media del aceite en el tanque (punto C) y la temperatura del aceite mezclado en la salida de los canales de los devanados (punto B), que en este método equivale a la temperatura media de salida del transformador (punto A), aunque no suele coincidir ya que dicha mezcla no es perfecta.

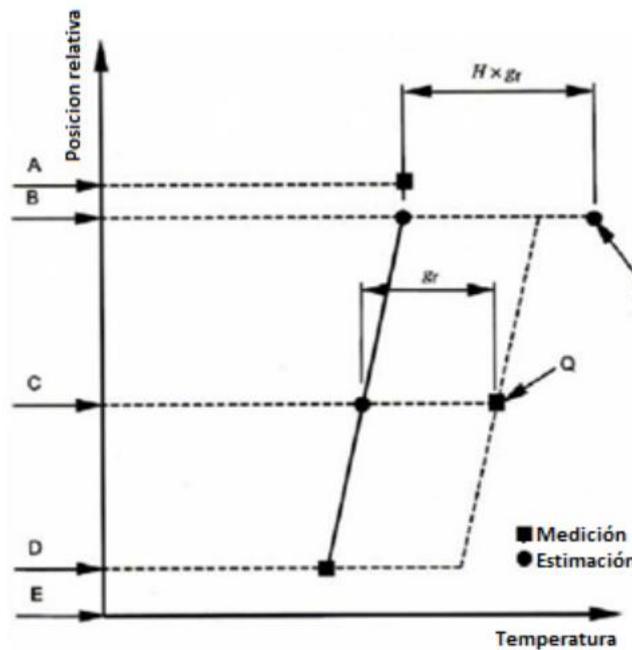


Ilustración 26

Siendo:

- A: Temperatura media de salida del tanque
- B: Temperatura media de la mezcla en la salida de los devanados (a menudo asumida igual que A)
- C: Temperatura media del aceite en el tanque
- D: Temperatura del aceite en la base de los devanados
- E: Fondo del tanque
- gr : Gradiente entre las temperaturas medias de tanque y devanados
- H: Factor de punto caliente
- P: Temperatura de punto caliente
- Q: Temperatura media del devanado determinada mediante medición de resistencia

Para conocer estos valores se recurre a las mediciones de los test de funcionamiento en régimen nominal. La estimación de la temperatura de punto caliente se realiza mediante la ecuación:

$$T_h = T_{wo} + H \cdot g$$

Ecuación 43

Siendo T_h la temperatura de punto caliente, T_{wo} la temperatura promedio de los devanados, equivalente al punto B, en la salida del transformador, H el factor de punto caliente y g el gradiente de temperatura entre el devanado y el aceite. Se ve cómo se asume que la temperatura de punto caliente coincide en la salida del aceite en el devanado, aunque estudios encuentran 15 ° de diferencia entre esta y la verdadera. El gradiente se calcula mediante la diferencia entre la temperatura media del devanado (punto Q), obtenida mediante mediciones con resistencia, y la estimación de la temperatura media del aceite (punto C), siendo otro foco de generación de incertidumbre.

El factor de punto caliente H es a su vez resultado del producto de otros dos factores, según la ecuación 44.

$$H = Q \cdot S$$

Ecuación 44

Siendo Q el factor de punto caliente relativo a las pérdidas adicionales, y S el factor de punto caliente relativo a la eficiencia de la refrigeración, factores adimensionales para estimar el incremento del gradiente medio de los devanados por estas causas, pues la temperatura de punto caliente depende tanto de la magnitud de las pérdidas como de las variaciones en la corriente de refrigerante.

Q es un ratio entre dos pérdidas, una función escalar basada en una condición estacionaria a una determinada carga y posición de la derivación, definido en coordenadas cilíndricas como:

$$Q = (r, z, T)/Q_{media}$$

Ecuación 45

Donde el primer término es la densidad de pérdidas en la posición marcada por r, φ y z, a una determinada T y el segundo es la pérdida media en el devanado a su temperatura media (W/m³). También se puede expresar por el número de disco del devanado (z) y por el conductor en el disco (r).

De igual forma con S;

$$S = (r, z, T)/S_{media}$$

Ecuación 46

Siendo el primer término es la resistencia termal local y el segundo la resistencia media (K/W).

Como el flujo de calor tiene direccionalidad la resistencia dependerá de varias resistencias en paralelo de los aislamientos, capas de aceite, del cobre (despreciado), considerando que la temperatura dentro de cada elemento se considera constante y su resistencia interior se desprecia. También se considera que la distribución de temperaturas entre conductores de un mismo disco de un devanado es nula, e incluso entre discos.

En caso de un valor Q grande, durante el diseño, se puede jugar con S, aumentando la superficie de refrigeración, para que S, y en consecuencia el factor H, sea menor y no se produzca un punto caliente, por ejemplo añadiendo canales axiales dentro de un disco espaciador radial o añadiendo un espaciador radial dentro de un devanado con canales axiales de refrigeración.

Q y S son dependientes de la temperatura. A mayores pérdidas mayor temperatura y mayor flujo debido a que disminuye la viscosidad del aceite.

El factor H varía de caso en caso, dependiendo de las características del transformador y de su régimen de funcionamiento, por lo que debe calcularse específicamente para situación.

5.1.2. Modelos de redes termo-hidráulicas

Este método, al igual que la dinámica computacional, recae sobre principios básicos de conservación del calor, de la masa y del momento, aplicados en cada uno de los pequeños elementos en que se divide el dominio tratado. Al contrario que en la CFD, en los modelos de redes se describen estos principios mediante conjuntos de ecuaciones algebraicas, más fáciles de resolver que las diferenciales, con el objetivo de modelar las distribuciones de temperatura y flujo en las distintas partes del transformador. Usan relaciones empíricas para el factor de fricción y los coeficientes de transferencia de calor basándose en mediciones experimentales aisladas o indirectas, con coeficientes que deben ser determinados experimentalmente para cada nuevo diseño.

Comprende dos modelos independientes: hidráulico y térmico. El primero describe el flujo del aceite a través de una red de conductos y uniones, de manera similar a como ocurre en circuitos eléctricos, según la analogía hidráulico-eléctrica, equivaliendo la intensidad al flujo, y la caída de tensión a la variación de la presión. La ecuación básica para equilibrios de caída de presión es la ecuación de Bernoulli, en cada ciclo independiente del aceite (parte interior activa y parte exterior refrigerante), aunque se puede estudiar la refrigeración en su conjunto en todo el sistema. La Figura 27 presenta un ejemplo de equivalencia de parte de un circuito de refrigeración a un modelo de red hidráulica.

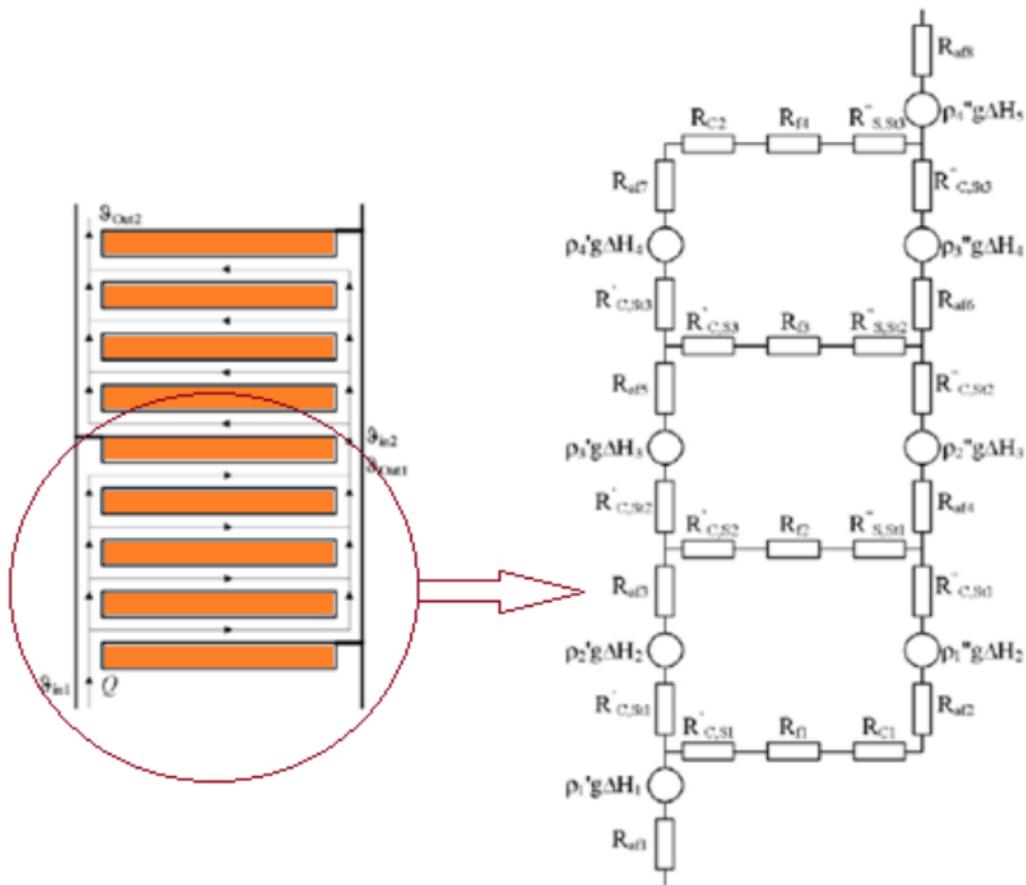


Ilustración 27

En los nodos se produce la suma de presiones estáticas y dinámicas, de modo similar a lo que ocurre en los nodos de los circuitos eléctricos, según las leyes de Kirchhoff. Las caídas de presión por fricción se representan mediante resistencias de fricción hidráulica para los canales axiales y radiales, y las pérdidas locales por convergencia y divergencia de flujos y esquinas mediante resistencias hidráulicas.

Las presiones gravitacionales se describen como generadores de presión.

Hay que remarcar que las caídas de presión están calculadas para los flujos a temperaturas locales. Los elementos de la red hidráulica dependen de las temperaturas del aceite, que dependen de su flujo másico y del calor transferido por parte de los elementos sólidos donde se genera (devanados, núcleo y elementos constructivos), siendo estos dos también entre sí interdependientes. Por tanto la red

hidráulica no es lineal en cuanto las resistencias dependen del flujo, debiendo resolverse por procedimientos numéricos iterativos resolviendo completamente la red, y simultáneamente de las redes que describen la transferencia de calor.

En ciertos elementos se pueden hacer simplificaciones que con un error despreciable permitan desacoplar ambas redes. Cuando no es posible se requieren más recursos y más tiempo de computación.

La aproximación a los cálculos térmicos sobre las partes sólidas del transformador, enfocándolas en donde se genera el calor, se encaran mediante redes térmicas, solapando el modelo térmico con el hidráulico. Los devanados intercambian el calor a través de los aislamientos con el refrigerante, es decir mediante conducción por el aislamiento, y mediante convección desde la superficie del aislamiento hasta el refrigerante.

La distribución de aceite tiene influencia en las temperaturas y en los coeficientes de transferencia de calor desde el aceite. En consecuencia el caudal tiene influencia en la temperatura de las superficies sólidas.

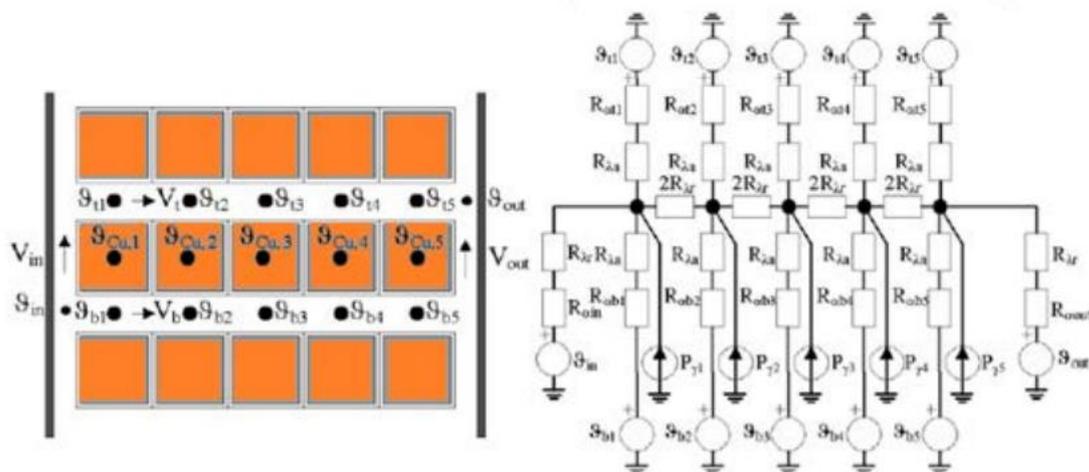


Ilustración 28



La Figura 28 muestra una red térmica de un disco entre canales radiales de refrigeración. El modelo tiene en cuenta prácticamente todos los fenómenos relevantes; la caída de presión en los conductores, resistencias a la conducción de calor por los aislamientos de los conductores, cambio de la temperatura del aceite a lo largo de los conductos de refrigeración radiales, coeficiente local de transferencia de calor por convección en la superficie de los conductores con el aceite (valores cambiantes a lo largo de los conductos radiales de refrigeración).

De nuevo se usa la equivalencia con el circuito eléctrico. Cada conductor se representa por un nodo, por tanto las pérdidas de energía y la resistencia a la conducción de calor en ellos se desprecian. Están presentes las resistencias, representando la conducción y la convección, los gradientes de temperatura se representan como fuentes de voltaje y las fuentes de calor como fuentes de intensidad.

Los diferentes acercamientos a THNM difieren tanto en cuanto detalle emplean en subdividir el dominio espacial de interés como en la forma en que modelan la transferencia de calor y la presión de elemento en elemento en la red global. Los primeros modelos han sido construidos bajo muchas simplificaciones, tanto como resultado de restricciones (peores recursos computacionales que los actuales), como debido a propósitos específicos (reducir la complejidad). Sin embargo para lograr una completa revisión de la evolución de estas técnicas numéricas se deben tener en cuenta alguna de estas simplificaciones.

- Aproximar una simetría axisimétrica cilíndrica del transformador a una de conductos rectangulares de sección constante
- Asumir la temperatura de la superficie de los discos conductores como constante.
- Considerar las líneas de flujo del aceite paralelas y su flujo completamente desarrollado.

Modelos más sofisticados ya toman en consideración la variación de la temperatura a lo largo de direcciones radiales y axiales, y dan importancia a las pérdidas pequeñas, que realmente tienen gran influencia en la distribución de flujos y las caídas de presión.

El resultado del método aquí descrito es una distribución detallada del caudal de aceite y de las temperaturas en el aceite y en el aislamiento, partiendo de la geometría exacta del transformador, las propiedades físicas de los materiales, la temperatura de entrada, dependiente del medio de refrigeración exterior, la distribución de pérdidas y el caudal de entrada.

En cuanto a las pérdidas lo mejor es especificar las pérdidas adicionales en cada conductor a la temperatura dada. Las pérdidas generadas por la componente resistente de la corriente continua son fáciles de obtener y con ellas el valor de las pérdidas en cada conductor a su temperatura final. Existen diferentes niveles de simplificación.

Recalcular las pérdidas a la temperatura media del devanado.

- Tomar las pérdidas como si la temperatura del devanado fuese igual al valor de garantía.
- Tomar las mismas pérdidas en cada conductor de un disco.
- Tomar pérdidas adicionales constantes en todo el devanado.

La imprecisión causada por la simplificación crece en este listado. En modelos detallados de redes termo-hidráulicas la última es inaceptable y la penúltima no es recomendable.

5.1.3. Dinámica computacional de fluidos

Es la rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran flujos de fluidos y transferencia de calor mediante la resolución de ecuaciones de continuidad. Realmente reemplaza los sistemas de ecuaciones diferenciales parciales por un sistema algebraico de ecuaciones que pueden ser resueltas por ordenadores. De esta forma se consigue predecir comportamientos y conocer las variables durante el proceso estudiado.

Surgida durante la década de los 70 del siglo XX, para simular problemas de fluidos sencillos, su evolución de la dinámica computacional ha sido paralela a la de los equipos informáticos, alcanzando en los 80 la capacidad de resolver completamente la ecuación de Navier-Stokes. Durante los 90 se expandió a otros campos, como el de la Química, la transferencia de calor, el estudio de los esfuerzos en sólidos.

Actualmente se ha generalizado, saliendo del campo de la investigación, para ser aplicada en ingeniería a nivel industrial, como en estudios aerodinámicos de los vehículos, que permitan mejorar su diseño, a nivel medioambiental, monitorizando la dispersión de contaminantes en el medio, o en las ciencias de la salud, simulando el flujo sanguíneo.

La simulación computacional de cualquier proceso físico consta de tres etapas; pre-procesado, procesado y post-procesado.

El primer paso consiste en definir el problema, modelarlo matemáticamente, fijar que variables son de interés de cara a su medición y plantear las condiciones del modelo, posicionándolo e idealizándolo, de forma que, finalmente, se obtenga una solución única y representativa, si bien no siempre es posible ya que a menudo no se comprende la totalidad de los fenómenos que tienen lugar en él. Así, se genera la geometría, el enmallado y la configuración de la simulación. Se representa esa idealización de la realidad mediante un modelo matemático constituido por las ecuaciones de gobierno del problema físico.



Es fundamental que el modelo matemático empleado para describir el fenómeno a estudiar, esas ecuaciones de gobierno, sean idóneas, por lo tanto de inicio hay que elegirlo cuidadosamente entre las opciones que muestra el software de computación. Por ejemplo las ecuaciones de Navier-Stokes, aceptadas generalmente para representar con precisión el movimiento de fluidos. Se trata de ecuaciones generalmente complejas y difíciles de resolver tanto analítica como computacionalmente, por lo que a menudo también se realiza una simplificación del modelo matemático adaptándolo a ecuaciones más sencillas.

La resolución del modelo matemático es precisamente el segundo paso del proceso. Tras la selección de un modelo apropiado, junto con las condiciones de contorno adecuadas fijadas en la definición del problema se procede a dar solución a las ecuaciones de gobierno. La capacidad computacional actual de los equipos permite abordar un problema fluido-térmico de geometría compleja directamente resolviendo las ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes que lo gobiernan sin necesidad de simplificarlo. Los algoritmos numéricos permiten manejar las enormes matrices resultado de los procesos de discretización, que consisten en convertir las ecuaciones diferenciales de conservación de masa, momento lineal y energía en ecuaciones algebraicas gracias a métodos matemáticos como el de los elementos finitos.

Esto requiere un gran esfuerzo y tiempo, en función de la complejidad del modelo estudiado, tanto desde el punto de vista computacional como por parte del usuario, pero se logra conseguir una solución detallada inalcanzable por otras técnicas, siendo, por tanto, una herramienta útil para resolver aspectos específicos del diseño y validar soluciones y coeficientes empíricos de otros métodos.

El procedimiento de cálculo de la dinámica computacional parte de los datos introducidos por el usuario en el programa, comenzando con la generación de la geometría, mediante diseño asistido por ordenador, con el nivel de precisión y fidelidad necesarios al modelo real, localizando en ella los límites del dominio de estudio. Sobre la geometría se realiza el mallado del dominio computacional, en el que

se divide en pequeñas porciones o celdas, en las que se va a resolver las ecuaciones de gobierno, calculando propiedades físicas del dominio representado.

El grado de complejidad del mallado y su geometría son variables, deben buscar un compromiso entre la precisión de los resultados obtenidos y los requeridos costes computacionales. Partiendo del mallado de la geometría se realiza la discretización de las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas y a su resolución por métodos iterativos. El programa alcanza la solución aproximada del modelo cuando se cumplen los criterios de convergencia fijados por el diseñador. Dicha solución es pormenorizada en toda la geometría del problema.

En el tercer estadio del proceso llega el momento de analizar los resultados obtenidos, y sacar conclusiones. La dinámica computacional predice las propiedades del dominio estudiado con gran detalle, ofreciendo un conocimiento interno pormenorizado. Sin embargo consume recursos económicos, computacionales, temporales y requiere usuarios con amplia experiencia y formación especializada.

A la hora de aplicar la dinámica computacional de fluidos en el estudio de la refrigeración de transformadores de potencia los esfuerzos suelen centrarse en la modelización de los devanados y los radiadores, ya que son las partes en que se produce principalmente la transferencia de calor y de cuyo conocimiento exacto depende la vida útil del transformador.

La mecánica de fluidos se encarga del estudio del comportamiento, características y propiedades de los fluidos, bien en movimiento (dinámica de fluidos), bien en reposo (estática de fluidos).

Tradicionalmente este estudio se realiza de forma global e idealizada, mediante análisis integral, útil en muchos casos, pero limitado, pues, desde ese enfoque global, no proporciona la caracterización en detalle del fluido en puntos o zonas concretas.

Para estudios en detalle el análisis diferencial, partiendo de una partícula o un volumen finito de fluido, modela matemáticamente su comportamiento al formular leyes fundamentales proporcionando la velocidad, la presión, la densidad y la temperatura del fluido.

El modelo matemático se basa en ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales, y requieren de técnicas de resolución numéricas, lo que hace esta metodología más compleja y difícil de solucionar, pudiendo no existir una solución analítica del sistema de ecuaciones, a lo que hay que añadir la complejidad extra que se añade en el caso de que el modelo tenga que representar un flujo de tipo turbulento, debido a su carácter transitorio y caótico.

Para salvar esta problemática se suele aplicar a modelos más sencillos, de flujo laminar y condiciones de contorno adecuadas, como es el caso del flujo completamente desarrollado en conductos, como en los sistemas de refrigeración de los transformadores.

De cara a identificar esas condiciones de contorno apropiadas, conviene clasificar el flujo, ya no sólo entre laminar o turbulento, sino en función del campo de velocidades, parámetro que representa suficientemente el flujo.

Así se establece la direccionalidad del flujo. La velocidad, como magnitud vectorial, se puede identificar en función de sus tres componentes en las direcciones de los ejes cartesianos. En función del número de dichas componentes que sean nulas el flujo en cada punto del campo podrá ser unidireccional, bidireccional o tridireccional.

Hay que tener en cuenta la dependencia del campo de velocidad de las coordenadas espaciales, su dimensionalidad, es decir, si el módulo de la velocidad varía en función del espacio, pudiendo ser en cuanto a este aspecto variable o uniforme.

Por último hay que definir la estacionalidad, dependencia de la velocidad en función del tiempo, siendo flujo estacionario o transitorio.

Existen otros aspectos del flujo que afectan a la velocidad, como la condición de no deslizamiento. El flujo al encontrarse con una superficie sólida se ve interrumpido, de forma que las componentes de la velocidad que lo atraviesan se anulan. Esto afecta no sólo a dichas componentes en la superficie del sólido, sino también a las tangenciales, por lo que la velocidad del fluido resulta nula. Por efecto de la viscosidad del fluido, la fricción con esta capa ralentiza a la adyacente, y así sucesivamente, dando lugar a perfiles de velocidad como el que se muestra en la Figura 29.

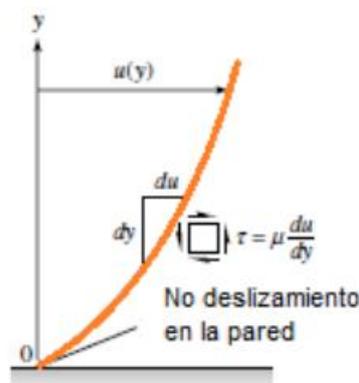


Ilustración 29

Se ve como otra variable que complica el modelo, haciendo más complejas las leyes en que se basa, es la viscosidad, frecuentemente despreciada a fin de contar con fluidos ideales, sobre todo en las capas de fluido distantes de una superficie. A menor número de variables y dependencias muestre el modelo, más sencillo será el desarrollo matemático que lo represente y más fácil de solucionar. En cuanto a este último aspecto se han desarrollado técnicas de resolución numéricas de las ecuaciones diferenciales que se implementan en códigos computacionales que son ejecutados por computadoras mediante dinámica computacional de fluidos.

5.2. Métodos numéricos



Los métodos numéricos son útiles en las ocasiones en que no es posible obtener la solución exacta de una ecuación diferencial parcial. Cuando esto sucede se procede a representar su solución continua de la ecuación mediante una serie de valores que conformen una solución discreta que se le aproxime, para lo que se recurre a discretizar el dominio de definición de las variables de las que depende dicha función, tomando una serie de valores equidistantes, en lo que supone la generación de una malla o red formada por los subdominios creados.

Posteriormente, mediante métodos iterativos, se interrelacionan las soluciones discretas obtenidas para los subdominios hasta que converjan en una solución única aproximada del problema a representar.

La primera aplicación de métodos numéricos en la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales fue llevada a cabo por John von Neumann mediados los años 40. Desde entonces los métodos de descomposición de problemas multifísicos y multiescala juegan un papel importante en la solución numérica de ecuaciones diferenciales parciales espacio y tiempo dependientes.

Estos estudian las ecuaciones diferenciales discretizadas espacialmente, mediante esquemas divisorio-iterativos, reduciendo la computación necesaria al dividir el problema en muchas partes pero mucho más simples.

Tres opciones clásicas a considerar de cara a la solución numérica de las ecuaciones diferenciales parciales de este tipo de problemas matemáticos son el método de las diferencias finitas (MDF), el método de los elementos finitos (MEF) y el método de los volúmenes finitos (MVF).

Estos tres métodos no sólo se diferencian en la manera en que proceden a la discretización del problema, sino que también muestran variaciones en cuanto a la forma de las ecuaciones diferenciales que estudian (diferencial o integral), y al tipo en que se encuadran (elíptica, parabólica o hiperbólica). De estas características depende si factores como las condiciones iniciales y de contorno, o los operadores utilizados en

la discretización son los adecuados para posicionar correctamente el método de forma que llegue a una solución adecuada.

5.2.1. Método de las diferencias finitas

Es, de los tres, el método más antiguo. Se basa en la aplicación de la expansión local del desarrollo de series de Taylor para aproximar las ecuaciones diferenciales mediante una red cuadrada de líneas, una malla estructurada en que cada punto está identificado por índices i, j, k , en coordenadas cartesianas, colocada sobre el dominio del problema, para construir la discretización. Dicha red se forma entre los nodos propios de la misma y un conjunto de puntos vecinos, en los que se guardan las variables del problema, como se ve en la Figura 30.



Ilustración 30

Cuanto más fina es la red, más proximidad muestran los puntos entre sí, y menos parámetros dependen de la discretización.

La solución de las ecuaciones se lleva a cabo aproximando sus derivadas parciales a diferencias finitas de la variable entre dos puntos de la red, realizadas a lo largo de la plantilla entre un nodo y sus vecinos, reemplazándolas. Para ello se utilizan operadores que realizan esta equivalencia, más o menos complicados en función del grado de la derivada parcial. La principal ventaja del método de diferencias finitas es su simplicidad teórica y la posibilidad de aumentar la precisión del método incrementando el orden de aproximación de las derivadas.

Que la red sea cuadrada es una de las principales problemáticas del método a la hora de manejar geometrías complejas en problemas multidimensionales, lo que dio origen al planteamiento de utilizar la forma integral de las ecuaciones diferenciales parciales, puesto que no requieren de ninguna estructura concreta en la red, y hacen un tratamiento más natural de las condiciones de contorno, surgiendo gracias a ello al desarrollo de las técnicas de elementos y de volúmenes finitos.

5.2.2. Método de los elementos finitos

Este método ofrece gran flexibilidad a la hora de ocuparse de geometrías complejas, ya que no requiere que el mallado sea equidistante, por lo que se ha extendido en la ciencia y la ingeniería a la hora de resolver problemas estructurales, mecánicos y termodinámicos.

El método transforma un sistema físico, con un número infinito de incógnitas, en uno que tiene un número finito de incógnitas relacionadas entre sí por un gran número de elementos de tamaño finito. Por tanto parte de la división del dominio de interés en una sucesión de poliedros no solapados, los elementos finitos, que dan lugar a una red con las aristas compartidas entre ellos y con sus vecinos. En los nodos se considera que existen ciertos grados de libertad y acciones del sistema físico, que caracterizan y permiten resolver las ecuaciones diferenciales que representan el problema. El número total de nodos multiplicado por el número de variables del problema es el número de grados de libertad. Cada elemento está representado por una matriz de rigidez, que representa la interacción entre los grados de libertad del conjunto de nodos que lo delimitan, y es a través de estos nodos que se transmite la solución de un elemento, para servir como condición de contorno de los elementos adyacentes, siguiendo el procedimiento iterativo, hasta alcanzar una solución de convergencia. La geometría puede ser estructurada o no, tal y como se muestra en la Figura 31.

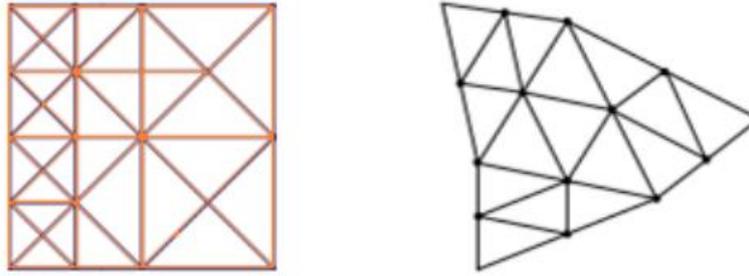


Ilustración 31

Además los elementos pueden aplicarse en espacios bi y tridimensionales.

5.2.3. Método de los volúmenes finitos

Este método usa las mismas redes que el de elementos finitos, dividiendo el dominio en poliedros, y al igual también que este otro método, emplea las ecuaciones de conservación en su forma integral. Sin embargo se divide la región en un número de volúmenes de control, siendo necesario definir en cada volumen generado puntos de control, colocando esos nodos bien en su centro, o en los vértices, como se ve en la Figura 32, donde se representan todas las propiedades del elemento, uniendo ese nodo con los de volúmenes adyacentes, siendo esta la red donde se realizan los balances de conservación de distintas magnitudes.

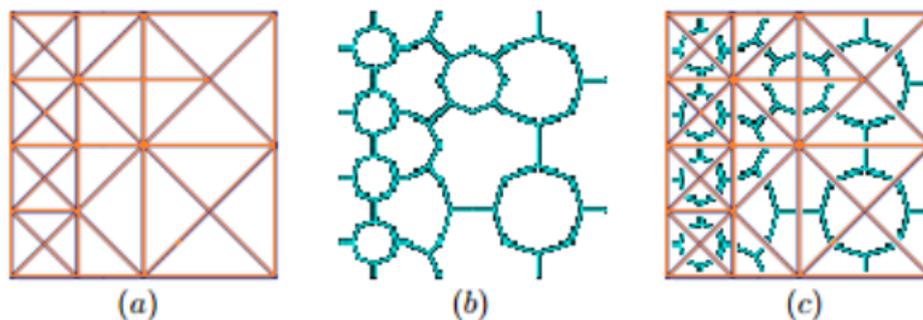


Ilustración 32

Al igual que ocurre con el método de elementos finitos se discretizan las integrales de las ecuaciones diferenciales, para finalmente llegar a un sistema no lineal de ecuaciones algebraicas.

Este método es adecuado para simular problemas con grandes gradientes y particularmente con discontinuidades.

5.3. Entornos de dinámica computacional

Existen varias empresas dedicadas a programar y ofrecer software de dinámica computacional, como Ansys, OpenFOAM, Nisa, Code-Saturne, Comsol, Star-CD, Flow-3D, Phoenix, etc. Se diferencian principalmente en base a las capacidades adicionales que tiene cada programa.

Una manera de comprobar cuan extendido está el uso de estos entornos de computación es mediante las referencias que aparecen al realizar una búsqueda en Google Académico. Mediante esta comprobación se puede ver cómo, entre estos software citados, los más extendidos son ANSYS, con 474.000 referencias, y COMSOL con 80.800, a mucha distancia de la competencia, rondando las 10.000 para cada programa. Por tanto este apartado se centra en ambos entornos de simulación, a fin de realizar una comparativa de sus capacidades.

5.3.1. ANSYS Fluent

Se trata de un software desarrollado específicamente para el modelado físico de los fluidos. Es actualmente uno de los paquetes de software más completos para el modelado mediante dinámica computacional, pues combina su gran capacidad de representar gran variedad de modelos físicos y de obtener resultados rápidos y precisos, con su compatibilidad con otros software de simulación de la propia compañía y con los principales sistemas de diseño asistido por ordenador, lo que le da la capacidad de llevar a buen puerto la simulación de problemas de carácter

multifísicos, como aquellos que involucren tanto el flujo de un fluido como la transferencia de calor y trabajo. El sistema provee de todas las herramientas necesarias comprobar y optimizar el funcionamiento tanto de una instalación ya existente como de otra en proceso de diseño, ofreciendo la posibilidad de conocer su funcionamiento interno sin necesidad de desarrollar prototipos reales, de manera precisa, gracias a que en él han trabajado expertos reconocidos en los campos de la ciencia y la ingeniería asociados los principios físicos, los métodos matemáticos y la programación involucrados en las simulaciones.

Así mismo, Fluent es capaz de modelar físicas complejas incluyendo análisis de fenómenos transitorios, flujos multifase, reacciones químicas, radiación y dinámicas de partículas. Los modelos están completamente testados y validados para asegurar que los resultados de las simulaciones sean fiables. Las metodologías de resolución disponibles en este programa son tanto el análisis de elementos finitos como el de volúmenes finitos.

En cuanto a la geometría de los modelos, el programa permite modelar tanto en 2D, como en 2D axisimétrico y 3D, permitiendo de cara al mallado multitud de opciones, incluyendo triángulos o cuadriláteros para 2D, tetraedros, hexaedros, pirámides, poliedros para 3D y mallados mixtos.

5.3.2. COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics es un poderoso entorno interactivo para modelar y resolver todo tipo de problemas científicos e ingenieriles. Este programa consta de un escritorio integrado con un constructor de modelos donde se tiene una visión completa del mismo a la vez que acceso a todas las funcionalidades del programa.

Permite la generación de modelos multifísicos que puedan resolver fenómenos dependientes de varios campos físicos simultáneamente, sin requerir un gran conocimiento del programa y la teoría física para llevarlo a cabo.

Utilizando los interfaces de los módulos físicos y gracias al soporte de propiedades avanzadas de los materiales es posible construir modelos mediante la definición de cantidades físicas tales como propiedades materiales, cargas, límites, fuentes y flujos en lugar de recurrir a las ecuaciones físicas subyacentes. Se pueden aplicar siempre esas variables, expresiones o números directamente en dominios, superficies, aristas y puntos, independientemente del mallado computacional.

COMSOL entonces compila internamente una serie de ecuaciones que representan el modelo completamente. Cuando COMSOL resuelve los modelos se vale del método de los elementos finitos, realizando el análisis por esta vía mediante variedad de solucionadores numéricos.

COMSOL Multiphysics crea secuencias para grabar todos los pasos que crean los ajustes de la geometría, mallado, estudios y el solucionador y la visualización y presentación de resultados. Con esto consigue que sea sencillo modificar algún apartado concreto y recomenzar desde el la secuencia.

Las áreas de aplicación de COMSOL se recopilan a continuación.

- Acústica
- Biociencia
- Reacciones químicas
- Corrosión
- Difusión
- Electroquímica
- Electromagnetismo
- Dinámica de fluidos
- Celda de fuel y electroquímica
- Geofísica
- Transferencia de calor

- Sistemas microelectromecánicos (MEMS)
- Microfluidos
- Ingeniería de microondas
- Óptica
- Trazado de partículas
- Fotónica
- Plasma
- Flujo en medios porosos
- Mecánica cuántica
- Radiofrecuencia
- Dispositivos semiconductores
- Mecánica estructural
- Fenómenos de transporte
- Propagación de ondas

Muchas aplicaciones en el mundo real involucran el acoplamiento simultáneo en un sistema multifísico de ecuaciones diferenciales parciales procedentes de más de una de estas áreas. COMSOL es capaz de llevar a buen puerto la simulación de dichos sistemas.

6. Situación actual de la presente investigación

Estudiados y presentados el funcionamiento de los transformadores y de sus sistemas de refrigeración, se procede a la revisión de la bibliografía específica, artículos y resúmenes de conferencias en los que se exponen las más recientes investigaciones en estos campos, pudiendo comprender mejor la información que ahí se presenta, y así conocer que líneas de investigación se están siguiendo, tomándolas como ejemplo a la hora de enfocar el estudio realizado en el presente trabajo.

La búsqueda de artículos se ha realizado en bases de datos, principalmente en la base IEEEXplore (Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE), accesible desde el

portal de la biblioteca de la universidad de Cantabria, introduciendo en el buscador palabras clave asociadas a la temática de este estudio.

Es evidente que existe una expansión mundial de las redes eléctricas, causado por el continuo desarrollo de los países industrializados y de aquellos en vías de desarrollo. Para cumplir con la idea de desarrollo sostenible, se están llevando a cabo diferentes investigaciones en este sector, tal y como se ha indicado en apartados anteriores, entre las que se encuentra la utilización de métodos de elementos finitos para el estudio de mallados en modelados numéricos.

Con estos métodos se analizan los fenómenos que tienen lugar en el interior de los objetos modelados, a fin de determinar la distribución de temperaturas y velocidades en todo el modelo y el comportamiento de los fluidos dentro de los canales. De esta manera, perfeccionando los mallados utilizados en el estudio, simulamos de la manera más real posible y encontramos deficiencias en el funcionamiento que podrían afectar a la vida, en este caso de estudio, del transformador.

Toda la experiencia en laboratorios, ha llevado a la publicación de gran cantidad de artículos, la mayoría los cuales emplea métodos de simulación 2D. Sin embargo, a medida que las prestaciones de los ordenadores han mejorado y han alcanzado la capacidad de procesar grandes cargas de datos, se han simulado modelos en 3D, como el utilizado en el presente estudio. Es de estos artículos científicos de donde se ha obtenido la información para la redacción del presente estudio.

En la primera década del milenio se han publicado varios artículos utilizando como método la resolución de las ecuaciones diferenciales que gobiernan los procesos fluido-térmicos. El objetivo principal de prácticamente todos estos artículos es la determinación de las distribuciones de velocidad y temperaturas de un aceite mineral dentro de una sección 2D de un devanado.

Los artículos de interés encontrados son los siguientes:

- Mufuta y Van den Buck modelaron el flujo másico de un aceite mineral en una geometría 2D de un devanado de un transformador de potencia hallando su influencia en la refrigeración mediante el cálculo de parámetros adimensionales (Nu, Re, Gr) {{69 Mufuta, J.-M. 2000;}}.
- Seis años más tarde, El Wakil et al. estudiaron la transferencia de calor y el flujo del fluido en dos devanados alrededor de un núcleo de un transformador reductor trifásico tipo capa por medio del análisis de seis modelos 2D diferentes {{71 El Wakil, N. 2006;}}.
- En 2007, Rahimpur et al. calcularon la influencia de algunos parámetros (pérdida de calor, número de arandelas, altura de los radiadores y geometría del canal) sobre la distribución de temperaturas de un modelo 2D de un devanado de tipo disco con arandelas y refrigeración por convección natural {{72 Rahimpour, E. 2007;}}.
- Dos años más tarde, Smolka et al. realizaron una revisión del estado del arte sobre simulaciones numéricas de flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos electromagnéticos. Presentaron, además, una innovadora simulación 3D de dinámica de fluidos así como una simulación electromagnética de un transformador trifásico seco de media potencia {{74 Smolka, J. 2009;}}.
- En 2010, varios modelos 2D de un paso de un devanado de baja tensión (LVW, Low Voltage Winding en inglés) perteneciente a un transformador trifásico tipo disco fueron simulados por Torriano et al, utilizando Ansys, observando el efecto que tenía sobre la solución el grado de exactitud del modelo, y la influencia del flujo másico de entrada y las condiciones de contorno sobre las distribuciones de temperatura y flujo de los canales. También determinaron la posición de los puntos calientes en el devanado {{75 Torriano, F. 2010;}}. Es decir, realiza un estudio muy completo, aplicando diferentes simplificaciones en el modelo del transformador, en cuanto a su geometría, la distribución de las pérdidas, las condiciones de contorno, despreciando condiciones que pueden parecer necesarias, a fin de comprobar cómo afectan a la

representatividad de los resultados obtenidos. También recurren a los parámetros adimensionales para caracterizar el flujo del fluido.

- Más recientemente, en 2012, los mismos autores realizaron una comparación 2D-3D de la misma geometría, determinando la existencia de flujos tridimensionales que no pueden ser despreciados, como ocurre en el modelo 2D {{77 Torriano, F. 2012;}}. El mismo año, Skillen et al. desarrollaron un modelo 2D basado en la geometría del transformador de Torriano con cuatro pasos por columna. La presencia de penachos calientes en algunos conductos horizontales y la transmisión de venas calientes de un paso al siguiente (acoplamiento del flujo) eran las conclusiones principales de este artículo {{70 Skillen, A. 2012;}}.
- Un año antes, en 2011, Gastelurrutia et al. presentaron rebanadas finas de varios transformadores con refrigeración ONAN (modelos 2D) donde se calculaban numéricamente el flujo del aceite y las distribuciones térmicas, permitiendo así su comparación de los resultados experimentales {{76 Gastelurrutia, J. 2011;}}.
- Durante el desarrollo del presente estudio se está llevando a cabo un Doctorado de Estudio de simulación fluido-térmico de cuatro aceites dieléctricos alternativos basados en ésteres naturales, por D. Ramón Lecuna Tolosa en colaboración con el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Cantabria; dicho Estudio pretende demostrar la viabilidad de la sustitución de un aceite mineral por un líquido alternativo para la refrigeración de un TT de potencia. En el citado Estudio de Doctorado toma parte D. Fernando Delgado San Román, Doctor de la UC y que también ha realizado una publicación sobre la misma línea de investigación; realizan un estudio comparativo del comportamiento térmico de distintos tipos de refrigerantes alternativos a fin de comprobar cómo sus diferentes propiedades influyen en la eficacia de la refrigeración, y por tanto en la vida útil del transformador, también de discos, para lo que establecen un modelo geométrico, le dotan de unas condiciones de contorno y ecuaciones diferenciales de gobierno basadas en los balances de materia, energía y momento lineal, tal y como se describen

en el apartado 2.4.2 y resuelven dicho modelo para cada tipo de refrigerante mediante un software de dinámica computacional.

Todos los artículos mencionados en el anterior párrafo usan el aceite mineral como líquido dieléctrico. Además, la mayoría de los modelos usados han sido realizados en dos dimensiones a fin de superar las limitaciones computacionales. En cambio, en este estudio se simula una sección 3D de los conductos de refrigeración del LVW de un transformador real. Además, esta geometría es simulada usando un modelo físico en el cual la flotabilidad y las fuerzas viscosas son lo único considerado para establecer la convección natural. Con la finalidad de realizar este trabajo se desarrolló una metodología de análisis utilizando las distribuciones de flujos y temperaturas y parámetros como el tradicional coeficiente de transferencia de calor por convección (h) y uno nuevo, el criterio de refrigeración (P).

Podemos concluir diciendo que las investigaciones llevadas a cabo en este campo, han demostrado la influencia del flujo másico de aceite en la refrigeración del trafo, han analizado la transferencia de calor, la distribución de temperaturas y se ha admitido la existencia de determinados parámetros tridimensionales no despreciables. Además, se ha estudiado en 2D el efecto que tenía sobre la solución el grado de exactitud del modelo, y la influencia del flujo másico de entrada y las condiciones de contorno sobre las distribuciones de temperatura y flujo de los canales.

Para llevar más allá este estudio realizado por Torriano, se analizará la influencia del tipo de mallado adoptado en los resultados obtenidos mediante la modelización numérica en 3D de un transformador trifásico ABB 66/6.3 KVA de refrigeración tipo ONAN. Esta comparativa no ha sido desarrollada anteriormente para tal fin; únicamente por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Cantabria a fin de demostrar la viabilidad de la sustitución de un aceite mineral para la refrigeración de un transformador de potencia por un líquido refrigerante alternativo, a los que ya se ha hecho mención en el presente capítulo.

Capítulo III: Criterios de la investigación

III. CRITERIOS DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se realiza una breve mención sobre las características fundamentales del aceite, a tener en cuenta a la hora de representar computacionalmente la refrigeración del transformador analizado, y se describirá el procedimiento a seguir.

1. Características a considerar del fluido empleado en el estudio de mallados numéricos

Por todo lo dicho hasta el momento en cuando a funcionamiento/operación y refrigeración de los transformadores, las principales características a analizar en el fluido dieléctrico para que cumplan los valores y los requisitos adecuados de funcionamiento, así como las condiciones de refrigeración y aislamiento exigidas por el fabricante del transformador son:

- El calor específico; es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad.
- La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En otras palabras la conductividad térmica es también la capacidad de una sustancia de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras moléculas adyacentes o a sustancias con las que no está en contacto.
- La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales, es debida a las fuerzas de cohesión moleculares.
- La densidad es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia. La densidad media es la razón entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa.

2. Procedimiento del estudio

Durante los anteriores capítulos se han estudiado el fundamento, funcionamiento, problemática y función de los transformadores, su refrigeración y las leyes termodinámicas que lo rigen, así como las técnicas y tecnologías aplicadas actualmente a tal efecto, mediante la lectura de libros, artículos y trabajos relacionados con esta temática, comprobando la actual importancia que la simulación física a través de la dinámica computacional tiene en el diseño y monitorización de instalaciones como los transformadores de potencia, ya que permite estudiar con precisión su funcionamiento como ningún otro método. Sin embargo también se ha visto que es una metodología complicada, tanto teóricamente como en su desarrollo, que consume recursos económicos, temporales y requiere de personal formado específicamente para su aplicación.

El presente estudio se dirige hacia el aumento de la precisión de los resultados obtenidos mediante la mejora de la técnica y también hacia reducir los costes computacionales y temporales que la misma exige.

Los estudios actuales en que esta se aplica suelen dirigirse a comprobar como de eficaces son variaciones a las que se somete el diseño del transformador, o modificaciones en el funcionamiento del mismo, sin embargo es interesante también estudiar cómo se desarrolla la simulación, y si esta se puede realizar de la forma más económica posible, sin renunciar a la verosimilitud de los resultados obtenidos. Es en este punto donde interviene el presente estudio comparativo de mallados en simulación.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es hacer un análisis comparativo de cómo llevar a cabo la simulación de la refrigeración de un transformador intentando hacer compatible el coste computacional con la capacidad del modelo de lograr resultados adecuados y representativos. Para ello se realizarán tres diferentes simulaciones de refrigeración de un mismo transformador, empleando un único aceite refrigerante



mineral, y se comparará la discrepancia de los resultados obtenidos con los proporcionados inicialmente para la comparativa y que se tomarán como verdaderos.

El programa elegido para llevar a cabo las simulaciones es COMSOL Multiphysics, puesto que según los artículos analizados en el capítulo anterior, parece que su uso se está extendiendo y es el software utilizado habitualmente por el departamento al que se suscribe este trabajo.

Una vez programado el software a emplear, en este caso Comsol Multiphysics, con los valores característicos del fluido a emplear (aceite mineral Nytro 10XN), se procederá a la simulación de la refrigeración del trafo y se tratará de buscar puntos calientes y diferentes deficiencias en el mallado empleado para subsanarlas y perfeccionar el mismo; se emplearán diferentes mallados de diferentes características y detalle en función de la representatividad del dominio a mallar.

El primer paso en la aplicación de la dinámica de fluidos computacional, consiste en la discretización espacial o geométrica del dominio para poder realizar la discretización de las ecuaciones que gobiernan el fluido.

Existen básicamente dos tipos de mallados:

- **Mallado estructurado:** En el que cada punto de la malla está inequívocamente identificado por los índices i, j, k , en coordenadas cartesianas. Las celdas de la malla son cuadriláteros en 2D y hexaedros en 3D.
- **Mallado no estructurado:** Las celdas y los nodos de la malla no tienen un orden particular, es decir, las celdas o los nodos cercanos a uno dado, no pueden identificarse directamente por sus índices. Los elementos de la malla, en este caso, son una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2D y tetraedros y hexaedros en 3D.

El tipo de discretización espacial a emplear, depende del tipo de discretización de las ecuaciones empleado, así como de la estructura interna de datos empleados para resolver el flujo. El método de las diferencias finitas, que discretiza las ecuaciones de Navier-Stokes en forma diferencial, requiere una malla estructurada de puntos en los que se guardan las variables de flujo.

Por otro lado, en el método de los volúmenes finitos es necesario definir puntos de control en cada volumen generado; precisamente es en estos vértices donde se guardan las variables, que dependiendo del método empleado pueden ser definidos en el centro del elemento o en los vértices de las celdas.

En resumen, se planteará el problema y se formularán las ecuaciones que lo gobiernan, se establecerán las condiciones de contorno y se generará una malla de volúmenes finitos.

Finalmente se analizarán los resultados obtenidos y se compararán con los datos de partida (Q , h_c , T^a) proporcionados para realizar la comparativa de mallados observando la disparidad de resultados, si lo hubiese, en función del mallado empleado.

Capítulo IV. Descripción del software a emplear

IV. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE A EMPLEAR

Una vez fijados los objetivos del trabajo, llega el turno de adquirir los conocimientos acerca del entorno de trabajo en el que se va a representar e intentar solucionar el problema físico, en este caso COMSOL Multiphysics.

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 (MEF) en la que se apoya la herramienta informática que se utiliza en este estudio, Comsol Multiphysics, y a continuación, se presenta este programa y su modo de funcionamiento.

1. Análisis de elementos finitos (mef)

Siendo la base matemática del programa el análisis de los elementos finitos, es importante profundizar en el funcionamiento de este método.

Como se ha visto en apartados previos, el método de elementos finitos, y su aplicación, el análisis de elementos finitos, es una técnica computacional utilizada para obtener soluciones aproximadas a un problema matemático, mediante técnicas numéricas estándar, como el método de Euler, o de Runge-Kutta, en el cual una serie de variables dependientes a calcular, deben satisfacer una ecuación diferencial en todos los puntos del dominio de definición del problema, tal y como se representa en la siguiente figura, cumpliendo un conjunto de condiciones de contorno.

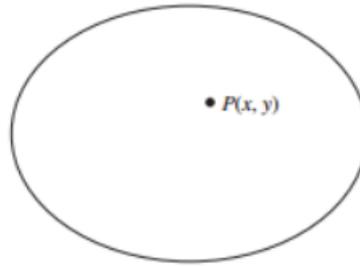


Ilustración 33. Dominio de definición

La razón de aplicación de este método es que es muy difícil, y en muchos casos imposible, obtener una solución exacta a la ecuación mediante métodos algebraicos, debiendo recurrir a métodos numéricos como el que aquí se trata. Para ello se recurre a dividir el dominio en pequeños elementos o subdominios, de tamaño finito, pero no diferencial. Es lo que se conoce como discretización espacial.

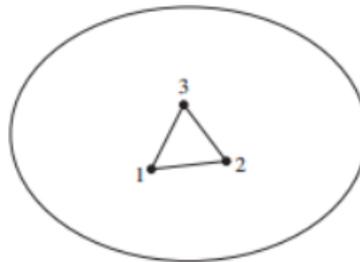


Ilustración 34. Elemento o subdominio del dominio de discretización

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. Es decir, esto tiene como objetivo que en los elementos las ecuaciones de gobierno se traduzcan en ecuaciones algebraicas de más fácil resolución.

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 es modelado por un sistema de ecuaciones, lineales o no. El número de ecuaciones que es necesario resolver es proporcional al número de nodos.

Dichos subdominios están definidos por sus vértices, puntos en los que la variable de campo $\phi(x, y)$ es calculada, y por tanto conocida, que son los arriba mencionados nodos. Los nodos colocados en la frontera del elemento se conocen como exteriores, son compartidos con los elementos adyacentes. Los interiores se encontrarían en el seno del propio elemento. La sucesión de elementos, representados por sus vértices y sus fronteras da lugar a la malla de la discretización.

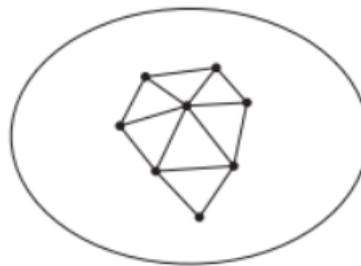


Ilustración 35. Malla de discretización

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.

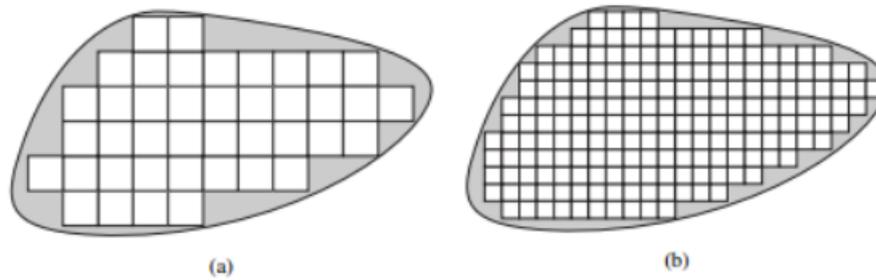


Ilustración 36. Opciones de mallado de un dominio

En la anterior imagen se puede ver cómo, con mayor número de elementos más pequeños es posible ajustar mejor el mallado a la geometría del dominio, a lo que podría contribuir haber elegido un tipo de mallado más acorde a la región que se quiere discretizar. El hecho de que el mallado sea más fino conlleva que la convergencia del modelo hacia la solución exacta sea mejor, sin embargo el conseguir la convergencia hacia una solución no conlleva que la solución alcanzada sea la adecuada, por lo que se debe prestar atención a si dicha solución es lógica, encaja con los fenómenos físicos y las leyes matemáticas que los representan y si las discontinuidades que se encuentren en los valores de los puntos frontera entre distintos elementos son asumibles.

Otra forma de mejorar la convergencia es aumentar el orden de los polinomios utilizados en la interpolación, sin aumentar el número de elementos del mallado.

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.

Resumiendo, en cualquier sistema a analizar podemos 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 deseamos 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 nos determinan el estado y/o posición del nodo.

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

2. 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 4.2. por los motivos indicados anteriormente.

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 verificaran 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 interactivo para todas las etapas del proceso de modelado (preproceso, proceso y postproceso): Así se denomina la interfaz gráfica del programa, el medio por el cual el programa muestra la información al diseñador y este puede acceder a los comandos para llevar a cabo la simulación. Por tanto, desde el punto de vista de este trabajo, es importante conocer el interfaz de comunicación con el software antes de proceder con la construcción del modelo, ya que de esta forma será más eficiente y eficaz.
- 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.

2.1. 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.

2.1.1. Preprocesado

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 usarán en la siguiente etapa de procesado del modelo. Esta etapa inicial de preproceso, en el caso de Comsol Multiphysics, se lleva a cabo tal y como se describe a continuación.



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.

Todos estos pasos se verán descritos en mayor detalle en puntos posteriores de este capítulo, “Graphical User Interface (GUI)”.

2.1.2. Procesado

Seleccionado y abierto el modelo, el segundo paso en esta etapa de proceso es la representación de la geometría que desea estudiarse. 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.

En nuestro caso, nos saltaremos este paso, ya que la representación geométrica nos ha sido proporcionada debido a la complejidad y a la cantidad de horas a dedicar en dicha representación.

2.1.3. Postprocesado

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. Es decir, estos valores se asocian a los diferentes subdominios de forma individualizada.

En este momento, 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. Es en este punto donde interviene nuestro estudio. 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.

Tal y como se ha mencionado en apartados anteriores, crearemos tres mallados diferentes y se ejecutarán las correspondientes simulaciones. A partir de este punto, se considerará el tiempo de simulación, y se analizarán los resultados obtenidos. Éstos se compararán con los datos de partida proporcionados para realizar la comparativa y determinar la influencia del tipo de mallado seleccionado en los resultados obtenidos.

2.2. Graphical User Interface (GUI)

Así se denomina la interfaz gráfica del programa, el medio por el cual el programa muestra la información al diseñador y este puede acceder a los comandos para llevar a cabo la simulación. Por tanto, desde el punto de vista de este trabajo, es importante conocer el interfaz de comunicación con el software antes de proceder con la construcción del modelo, ya que de esta forma será más eficiente y eficaz.

2.2.1. Model Wizard

Es la pantalla de inicio del programa si este se inicia sin cargar ningún modelo previo. En ella se especifica inicialmente la dimensión espacial del modelo, entre las opciones disponibles.

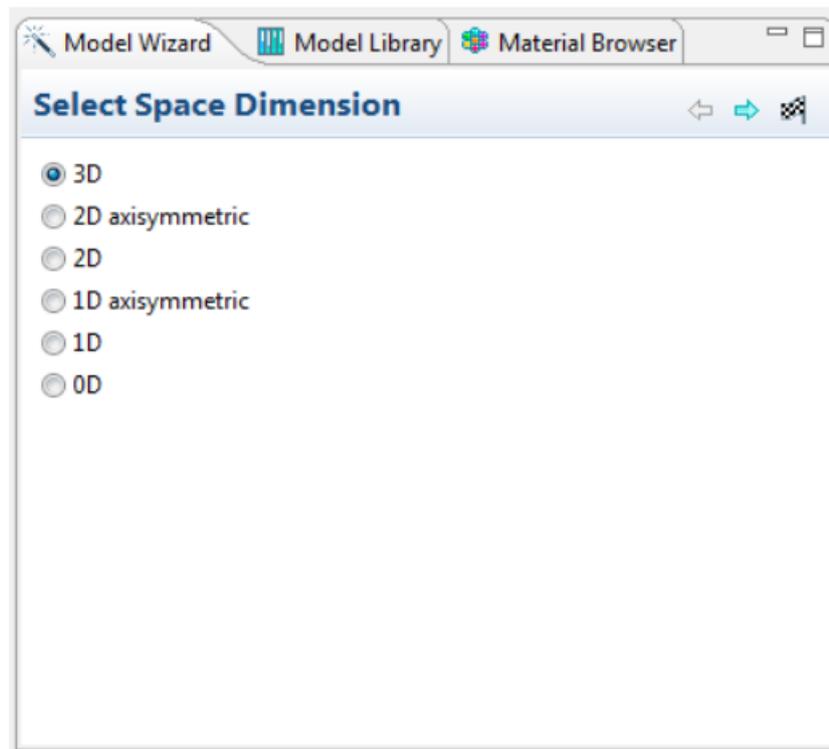


Ilustración 37. Model Wizard

Para realizar la selección basta con pinchar en la opción deseada y continuar con las especificaciones iniciales del modelo pulsando en la flecha azul de la esquina superior izquierda, tal y como se ve en la anterior imagen.

Las opciones axisimétricas se aplican a geometrías, tanto superficies como volúmenes, provenientes de revolución de una geometría más simple. En dichos modelos se ahorra parte del coste operacional y computacional representando tan sólo las geometrías origen antes de la revolución, siendo el software quien se encarga de trasladar los resultados a la geometría completa, pero sin necesidad de representarla. Este tipo de dimensión será la utilizada en el presente estudio.

El Model Wizard, tras elegir la geometría, pasa a mostrar los módulos teóricos de los que dispone el software, tal y como se ve a continuación. Se pueden seleccionar varios módulos distintos a la vez, para lo que basta con pulsar sobre ellos con el botón izquierdo del ratón y a continuación añadirlos pulsando en el símbolo + que se encuentra bajo las opciones. Al hacerlo esos módulos se añaden en el apartado Selected physics y en el apartado Dependent Variables aparecen las variables dependientes y sus símbolos.

Los módulos opcionales con los que cuenta el programa son:

- AC/DC Module
- Acoustics Module
- Batteries & Fuel Cells Module
- CFD Module (Computational Fluid Dynamics)
- Chemical Reaction Engineering Module
- Corrosion Module
- Geomechanics Module
- Heat Transfer Module
- MEMES Module
- Microfluidics Module
- Nonlinear Structural Materials Module
- Optimization Module
- Pipe Flow Module
- Plasma Module
- RF Module
- Structural Mechanics Module
- Subsurface Flow Module

Para continuar hay que pulsar de nuevo la flecha azul de la esquina superior derecha, como en el paso anterior, pudiendo también volver a la anterior pantalla para modificar alguna de las elecciones previas.

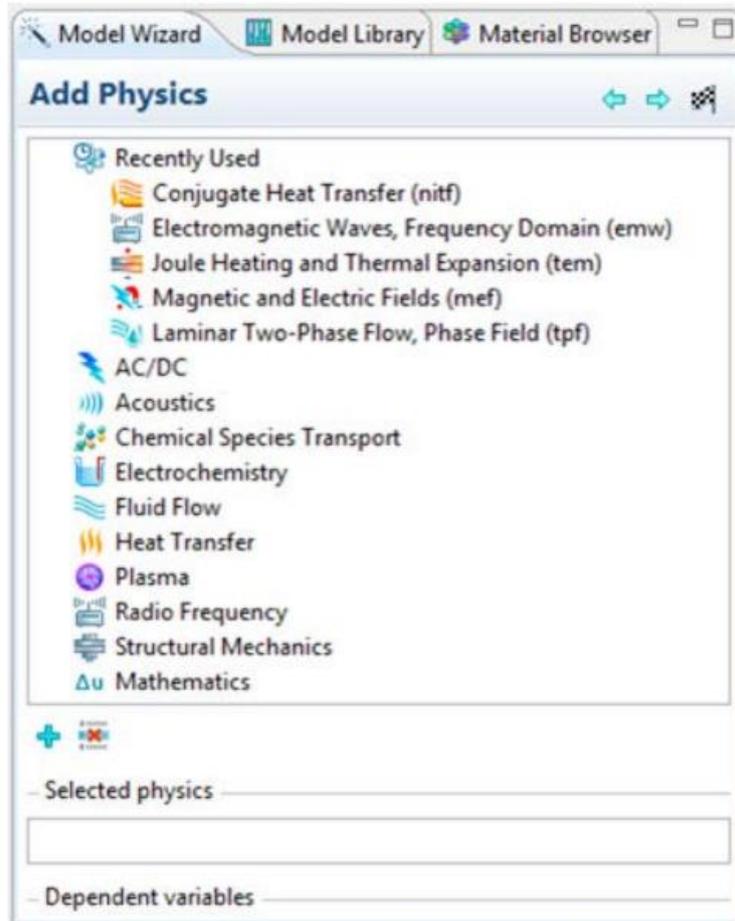


Ilustración 38. Model Wizard 2

La que sigue es la última pantalla de especificación previa del modelo, referida a las condiciones en que se va a llevar a cabo el estudio.

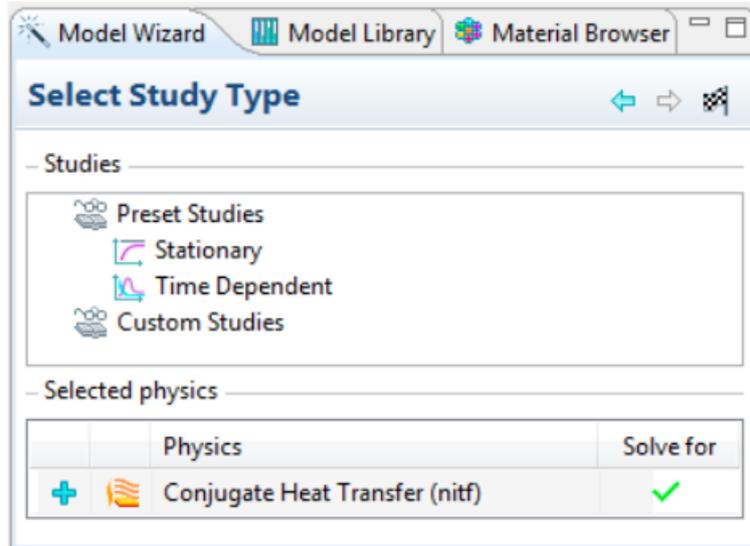


Ilustración 39. Model Wizard 3

Se puede seleccionar entre estudios considerando las variables en estado estacionario o ver cómo evolucionan con el tiempo, o incluso optar por estudios personalizados. Las opciones que aparecen dependen del módulo escogido en anteriores pasos. Para finalizar con esta etapa y con el Model Wizard basta con pulsar sobre la bandera de meta.

2.2.2. Model Builder

Refleja estructuradamente cada paso transcurrido durante el proceso de modelado, desde la definición de variables, definición de la geometría y el modelo físico, hasta el informe final de resultados. Para ello se vale de un formato en árbol o cascada, en el que pinchando en los nodos se despliega cada apartado, mostrándolo con más detalle.

La figura muestra la configuración inicial por defecto de este menú tras el paso desde el Model Wizard.

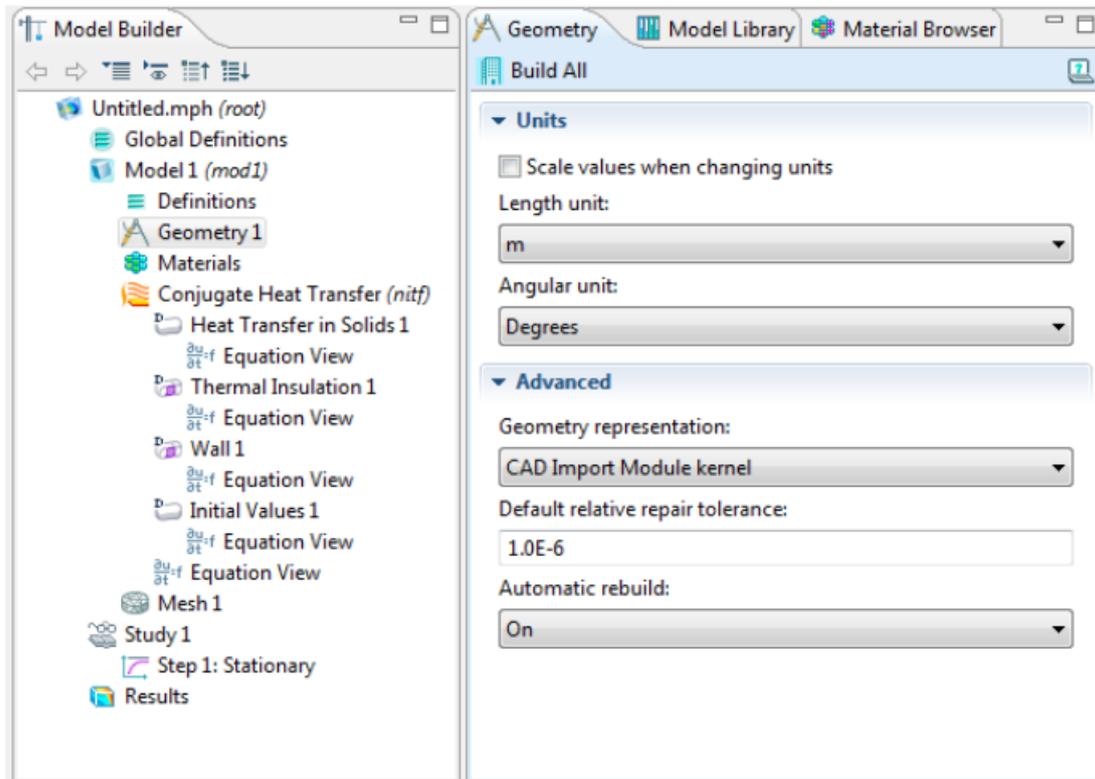


Ilustración 40. Model Builder

Como se puede observar en la anterior figura varios de los elementos necesarios para realizar el modelo son indicados de manera automática por el propio programa, lo que es especialmente útil para los usuarios noveles.

Haciendo 'Click' con el botón derecho del ratón en cualquiera de los pasos del modelado se despliega el menú contextual que muestra los elementos y operaciones que se pueden incluir o realizar en dicho paso, tales como incluir más apartados o gestionar el propio nodo (eliminarlo, duplicarlo, habilitarlo o deshabilitarlo, y modificar su nombre y propiedades). Es posible, en caso de necesidad, de cara a la correcta construcción del modelo, trasladar los elementos simplemente arrastrándolos de su posición original a la deseada, siempre dentro de los límites del propio apartado al cual pertenecen.

Al seleccionar un elemento del árbol en el que se pueden incluir especificaciones por parte del diseñador aparece, junto a la pantalla del Model Builder, otra con el nombre

por defecto del apartado seleccionado, en el que se muestran las opciones de modificación de sus especificaciones.

2.2.3. Material Browser

Esta pantalla gestiona la base de datos que incluye COMSOL en cuanto a materiales y sus propiedades. Como se puede ver en la siguiente figura también sigue un sistema en cascada tematizado, mostrando materiales recientemente usados por el diseñador, un listado genérico, y otros que reúnen los materiales en función de características o aplicaciones en común. Así también cuenta con la opción de añadir a la librería materiales definidos por el usuario.

Desde este menú se pueden añadir al modelo materiales predefinidos en el apartado correspondiente, evitando tener que definirlos cada vez que se quieran aplicar en un modelo.

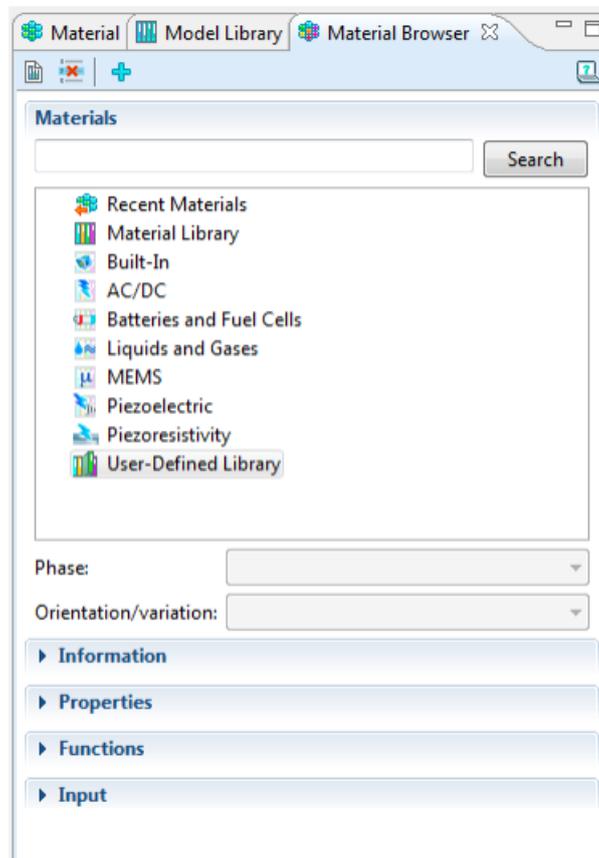


Ilustración 41. Material Browser

De igual forma, es útil para comprobar las propiedades de los materiales guardados en la base de datos, tan sólo eligiéndolos y desplegando la opción.

2.2.4. Model Library

Esta interfaz muestra otra base de datos, pero esta vez de modelos preprogramados, muchos de ellos asociados a los tutoriales que la empresa promotora del software tiene preparados, y que pueden ser utilizados como base para otros nuevos mediante su adaptación.

2.2.5. Graphics

A través de esta pantalla COMSOL muestra tanto la geometría del modelo, bien a medida que se va construyendo o una vez finalizada, y los gráficos con los resultados de las simulaciones.

Presenta varios accesos directos a distintas opciones de visualización y de selección de dominios de la geometría, lo que facilita enormemente su manejo. Entre estas opciones se encuentran la selección de vistas de la pieza, el método de visualización, siendo muy similar en esto a programas específicos de diseño asistido por ordenador.



Ilustración 42. Graphics

2.2.6. Messages, Progress, Log & Results

Estas son las últimas pantallas que aparecen en la interfaz del programa. Se encargan de mostrar mensajes de error y del proceso, estado del progreso de la simulación, tomar anotaciones de los pasos seguidos y mostrar resultados tales como tablas, gráficos, etc.

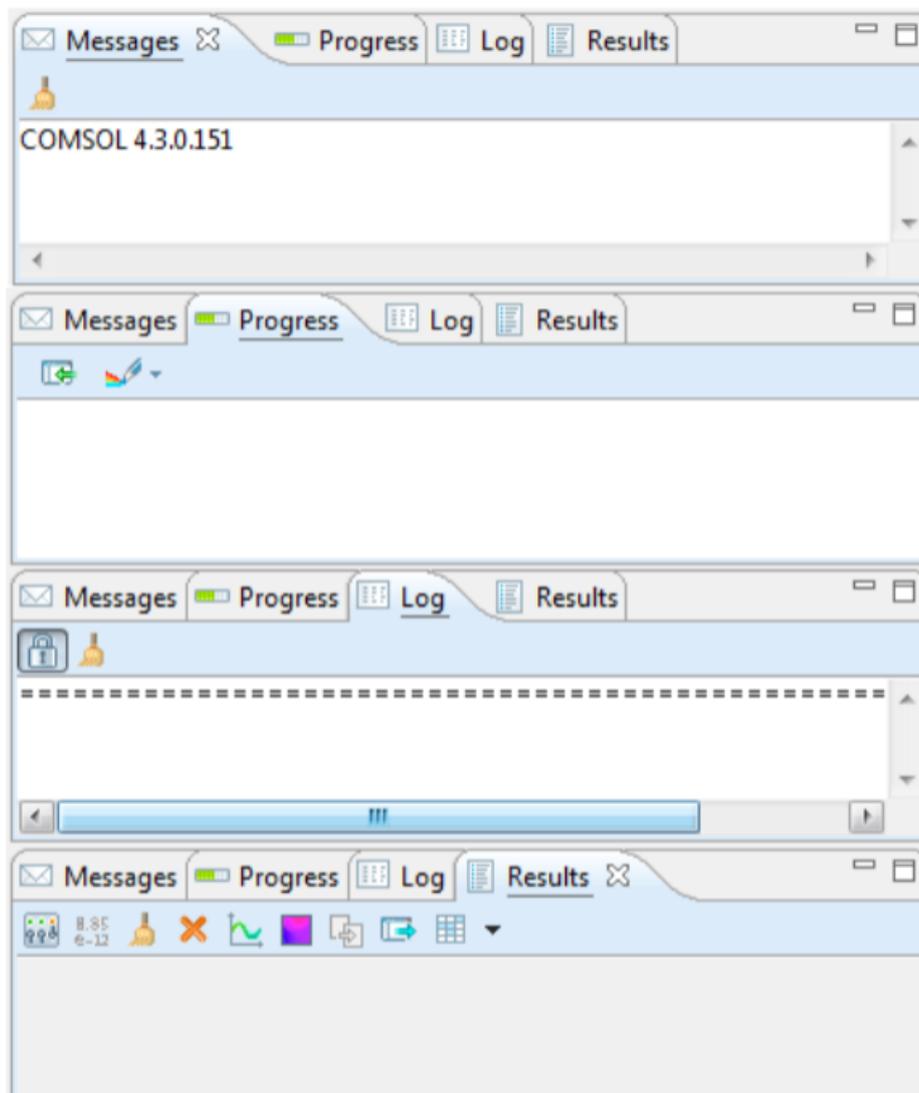


Ilustración 43. Messages, progress, log and results

2.3. Construcción del modelo

Este apartado hace referencia a la distribución en árbol de la pantalla Model Builder del GUI, describiendo cada uno de los nodos que son de importancia de cara a la construcción del modelo y su ejecución, y con ellos, el proceso de creación.

Este proceso es el que se toma como ejemplo a la hora de realizar las simulaciones.

2.3.1. Root

Es el primer punto del árbol de elementos del Model Builder, englobando en su seno todos y cada uno de los posteriores, que en el siguiente nivel de importancia son global definitions, Model, Study y Results. Una misma raíz puede acoger varios elementos de los tipos intermedios. La raíz recibe el nombre del archivo de guardado .mph. Pulsando sobre ella con el botón derecho del ratón aparece un menú contextual en el que se pueden añadir tanto modelos como estudios adicionales a la raíz.

Haciéndolo con el botón izquierdo del ratón aparece una pantalla adyacente al Model Builder, mostrada en la Figura 44, con información sobre el archivo: nombre, ubicación, fecha de creación, sistema de unidades, programa y módulos utilizados, etc. Alguno de estos aspectos es modificable.

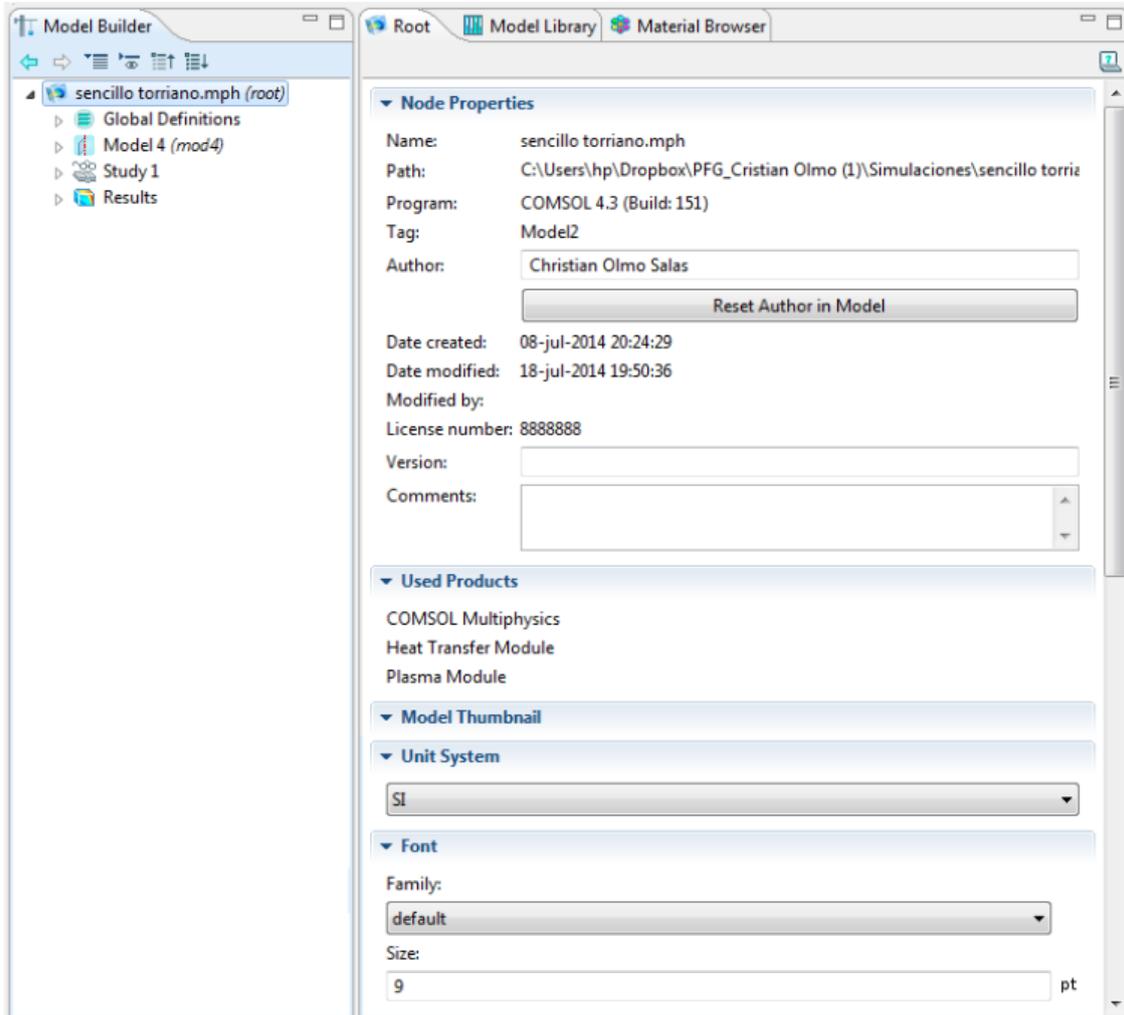


Ilustración 44. Model builder Root

2.3.2. Global definitions

En este primer paso se definen una serie de parámetros, variables y funciones generales que son vigentes para todos los modelos o estudios construidos dentro de la raíz.

Para añadirlos en este apartado, como siempre, basta con pulsar sobre él con el botón derecho del ratón, para que aparezca un menú, como el mostrado en la Figura 45. Se puede comprobar la variedad de funciones distintas que COMSOL admite.

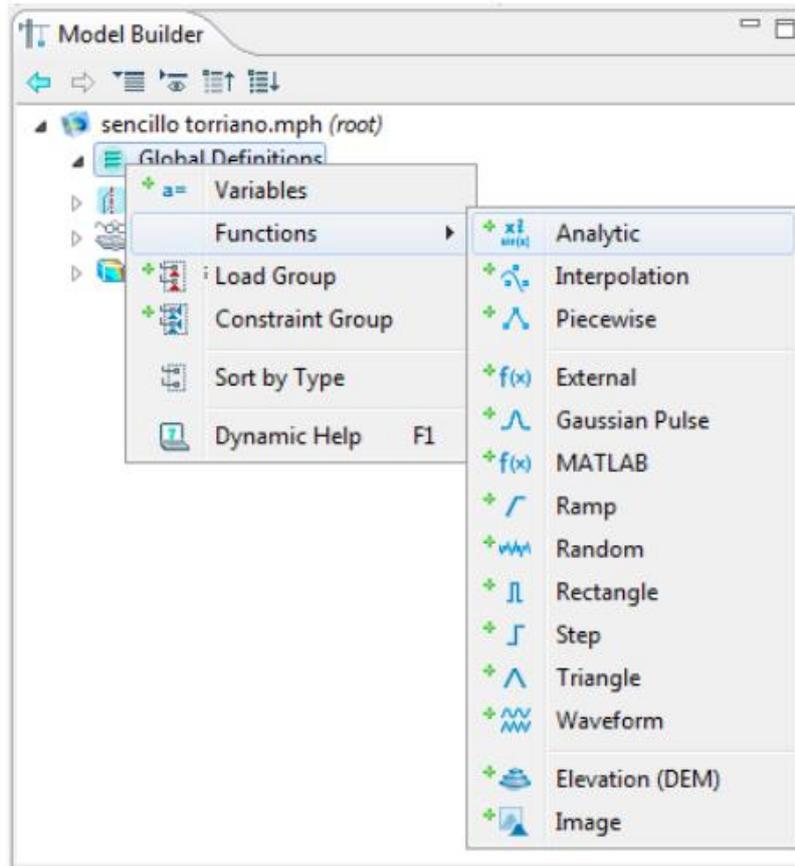


Ilustración 45. Global definitions

Elegido el tipo de definición que se quiere añadir aparece la pantalla de especificaciones en el que se procede a introducir los datos requeridos. En el apartado parámetros se fijan el valor de las constantes, junto con su símbolo, sus unidades y una descripción.

Estas han de ser válidas para todos los posibles modelos que se vayan a construir en la raíz. Una opción muy interesante de este software es la posibilidad de guardar en un archivo los parámetros de forma que puedan ser utilizados en otras ocasiones, sin tener que volver a introducirlos manualmente, simplemente importándolos. De manera similar se procede con las variables. La Figura 46 muestra las pantallas en que se introducen estos datos.

En el caso de las funciones se deben introducir sus nombres, las expresiones matemáticas de las mismas, en lenguaje Excel, sobradamente extendido, y tanto las

unidades de la función como de las variables. Además incluye una opción de graficar la función, pudiendo seleccionar el intervalo de valores a representar y las características de la gráfica.

La Figura 47 muestra cómo es la pantalla de introducción de la función.

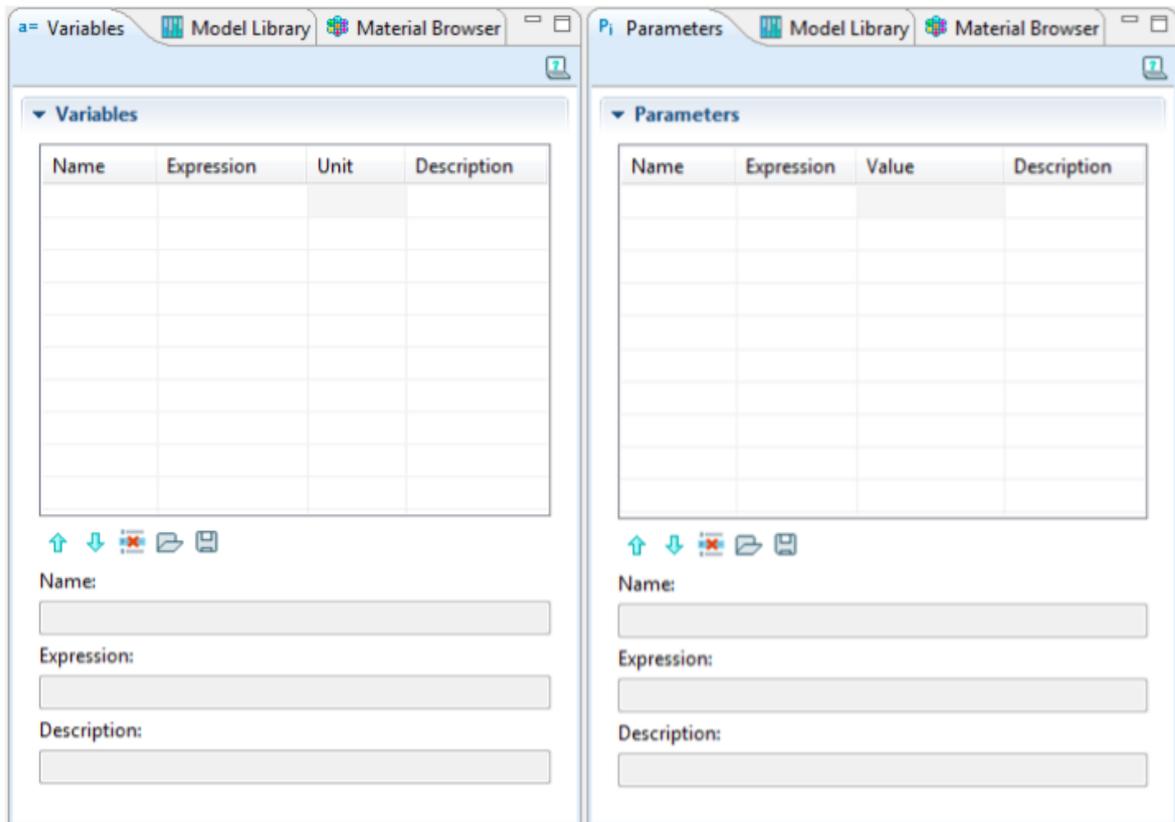


Ilustración 46. Introducción de variables y sus funciones características

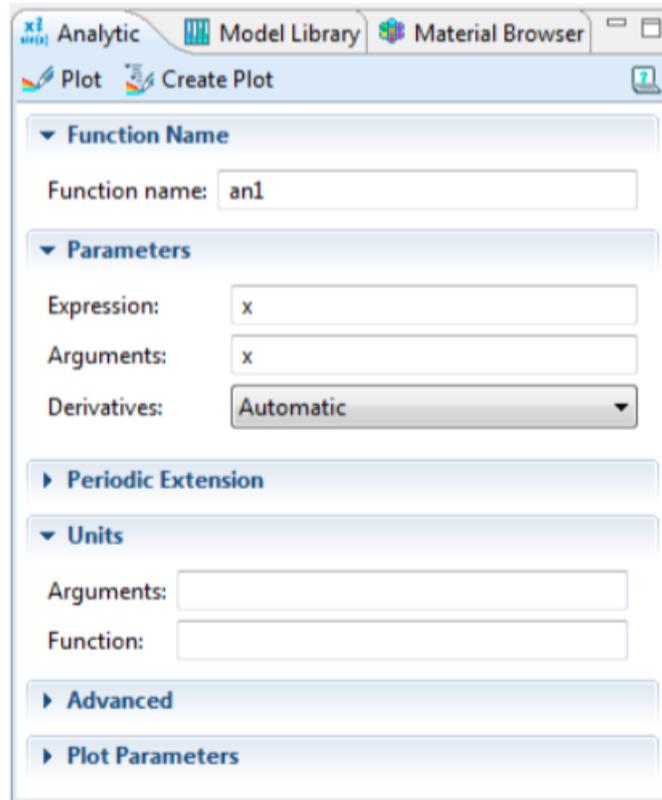


Ilustración 47. Imprimir gráfica

2.3.3. Model

Tras fijar las definiciones globales llega el momento de construir el modelo concreto que se desea simular. De nuevo el proceso comienza con la declaración de las definiciones; variables y funciones, esta vez específicas del modelo concreto que se está construyendo. El proceso y el interfaz gráfico son similares a los de las Global Definitions.

A continuación se procede a generar la geometría del modelo. Este proceso se puede realizar mediante un programa externo de diseño asistido por ordenador, como el AutoCAD, y posteriormente importar el modelo desde el archivo, aunque COMSOL cuenta con su propia herramienta de diseño, más rudimentaria, pero igualmente eficaz, y con la que el diseñador puede estar seguro hay 100% de compatibilidad.

Inicialmente se deben fijar las unidades que tienen las dimensiones que se introducen para generar el modelo, pulsando sobre Geometry con el botón izquierdo de despliega la pantalla correspondiente.

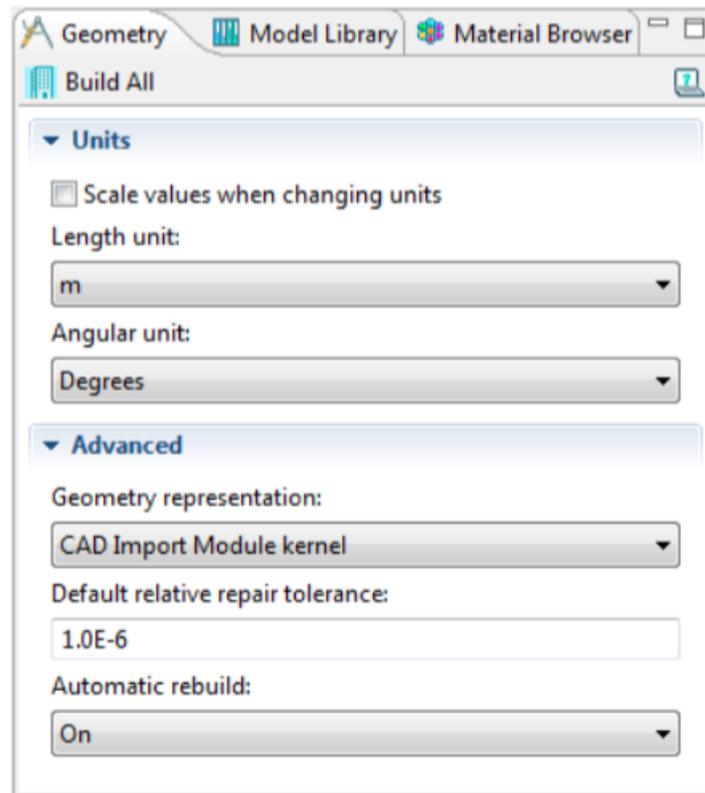


Ilustración 48. Model

De nuevo, con el derecho, aparece el menú contextual con las opciones geométricas disponibles, mostradas en la Figura 49 para un modelo de geometría 3D. En el caso de que ninguna de estas opciones satisfaga las necesidades del diseñador existe la opción de generar un modelo 2D escogiendo Work plane y mediante revolución, extrusión y acciones similares conseguir el modelo 3D deseado. De igual manera este programa cuenta con la capacidad de realizar operaciones booleanas (estructura algebraica que esquematiza las operaciones lógicas Y, O, NO y SI, así como el conjunto de operaciones unión, intersección y complemento) de unión, diferencia, y la generación de matrices, para simplificar y facilitar el proceso de creación.

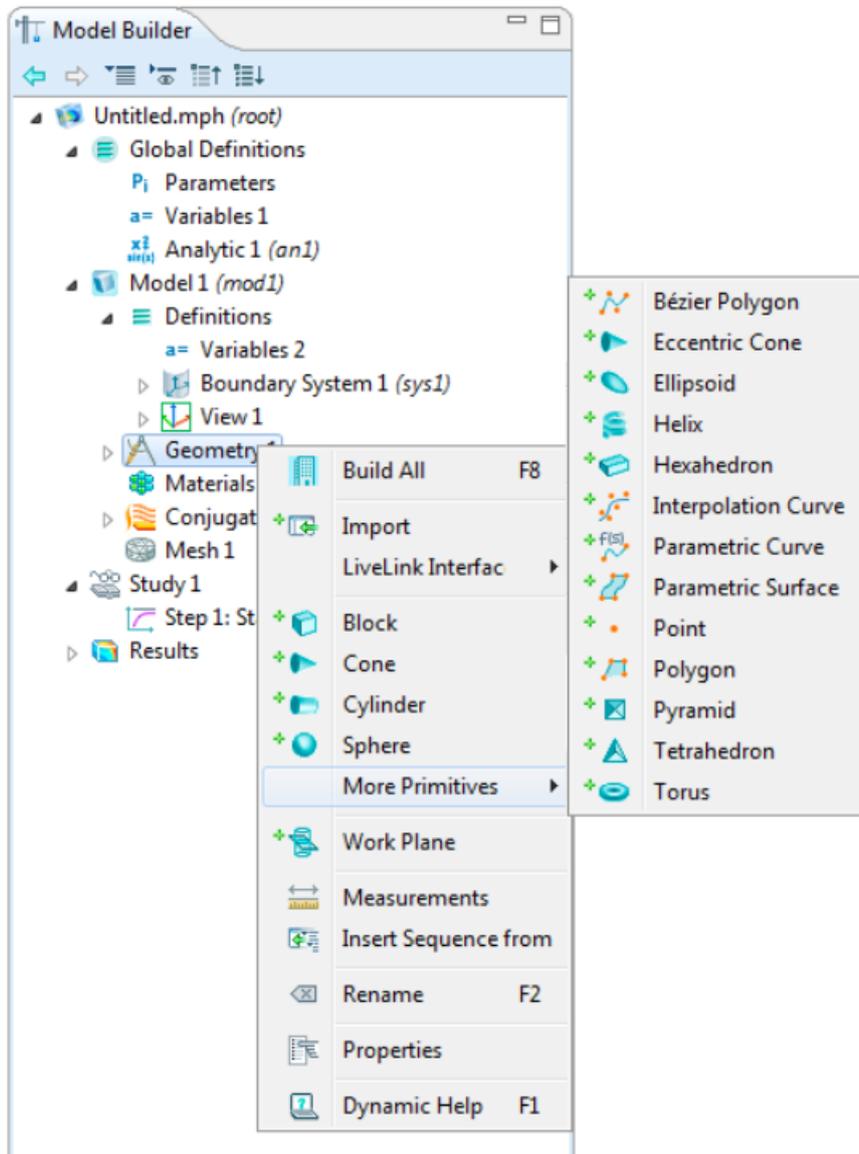


Ilustración 49. Geometry

Conviene, sobre todo ante modelos más complicados, tener muy claro el proceso de creación del modelo y los pasos que se deben seguir durante el mismo, para intentar evitar errores, aunque los creadores del sistema han previsto esta posibilidad dotándolo de mecanismos que facilitan la solución de los errores, pudiendo añadir y modificar los elementos de la geometría en cualquier paso de su generación.

De cara a los siguientes pasos es conveniente que la geometría esté preparada, ya que se depende de ella para continuar el proceso.

En este punto es conveniente regresar al apartado Definitions del modelo, puesto que con la geometría ya resuelta, se pueden agrupar sus dominios, superficies, etc en función de lo que están representando, gracias a sus propiedades y características en común, a través del comando Selections–Explicit del menú contextual. Al seleccionarla aparece una pantalla adyacente donde recopilar dichos elementos en común, agrupándolos así una única vez, pudiendo utilizar esta selección directamente para evitar tener que hacer la selección de elementos uno por uno cada vez que sea necesario. Conviene dar un nombre a cada selección para identificarla fácilmente.

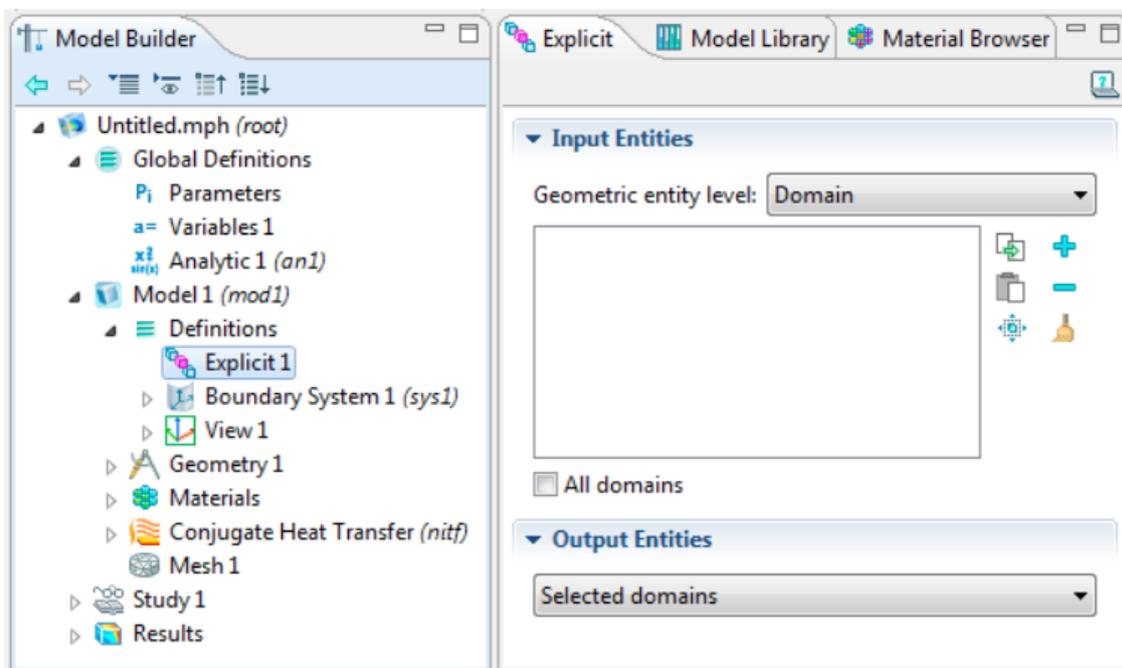


Ilustración 50. Definición del modelo

Para introducir cada elemento de la geometría, se debe pulsar sobre él con el botón izquierdo, lo que en geometrías complejas se hace más complicado puesto que dicho elemento puede ser interior. Para estos casos es útil modificar la forma de representación de la geometría a un modelo alámbrico en la ventana Graphic, que representa tan sólo las aristas de los elementos. Aun así el programa por defecto selecciona el elemento que se toca directamente, para lo que, si se sigue pulsando sobre el elemento en la misma posición, la selección va cambiando entre los que se encuentran en dicha posición, permitiendo elegir los que subyacen en el modelo. Se puede seleccionar más de un elemento si al tiempo que se pulsa sobre ellos se

mantiene el botón control del teclado apretado. A continuación la selección se añade a la ventana de Input Entities (Figura 50) clicando sobre el símbolo +. Los otros controles permiten eliminar un elemento (-), vaciar la ventana (brocha), copiar la selección de elementos o pegar una proveniente de otra definición o incluso enfocar en la geometría algún elemento de la selección, lo que permite comprobar si esta ha sido correcta.

Tras la geometría llega el momento de definir los materiales de los que está hecha físicamente en la realidad, y lo que es más importante de cara a la simulación, sus propiedades físicas. Para ello en el apartado materiales se debe hacer click derecho para ir incluyendo cada uno de los materiales presentes en el modelo, bien desde el Material browser o definiéndolo manualmente desde cero. Conviene modificar el nombre de cada material por el nombre real para identificarlos más fácilmente.

En el caso de la introducción manual, se puede proceder de la misma forma con las propiedades, o recurrir a las definiciones vistas en apartados previos, sólo con incluir el símbolo dado a cada una de ellas. Como se puede ver en la Figura 51 en este punto se deben incluir las partes de la geometría (dominios, fronteras, aristas, puntos) asociados con el material que se esté definiendo.

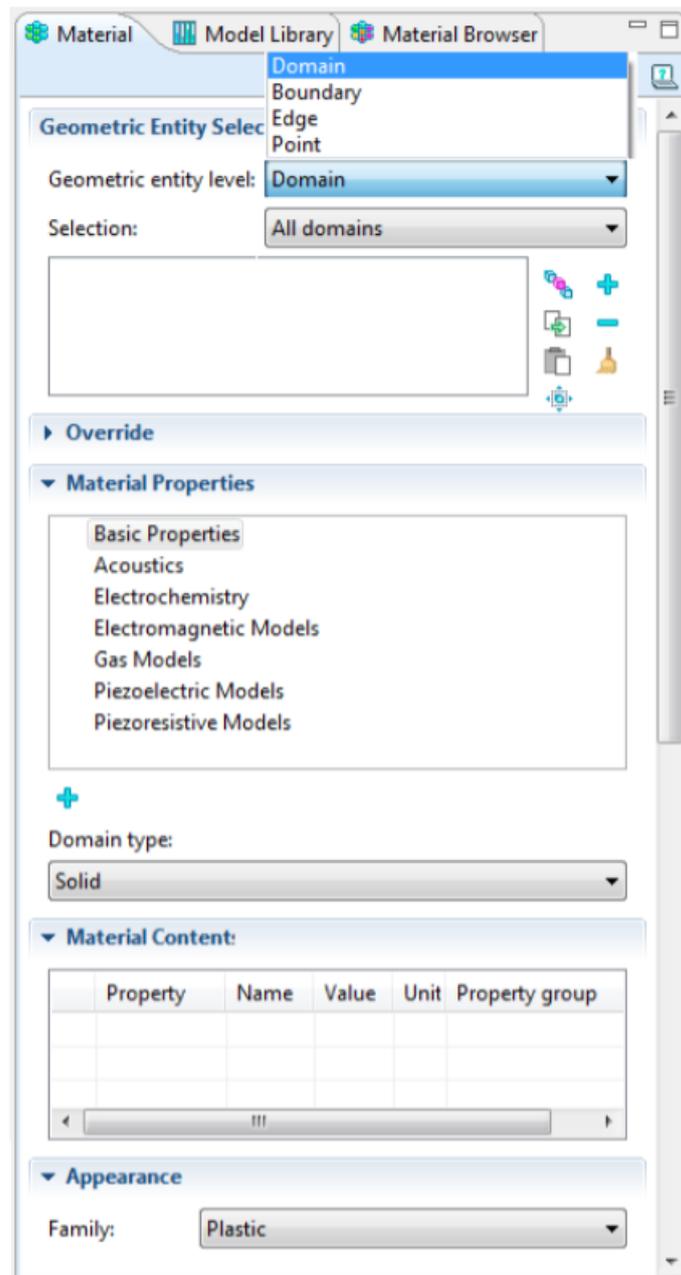


Ilustración 51. Definición de dominios

Tras seleccionar las zonas de la geometría, se debe hacer lo mismo con las propiedades que se quieren introducir en la definición del material, entre el listado disponible, añadiéndolas con el símbolo +. Una vez fijadas, se deben introducir los valores que tienen dichas propiedades, así como sus unidades, de acuerdo con el sistema de unidades del modelo. Opcionalmente es posible dar apariencia a cada uno de los materiales definidos de forma que sea la que adopten los dominios respectivos del material.

En el caso de que alguna propiedad física no haya sido incluida en la definición cuando es requerida por la física del modelo aparecerá una señal de alerta junto al nombre del material. El siguiente paso en la construcción del modelo es dotarle de las físicas apropiadas, en función del módulo elegido inicialmente y las condiciones de contorno establecidas.

Desde el primer momento algunas de estas aparecen por defecto, en función del tipo de simulación que se va a realizar, aunque suele tenerse que añadir las necesarias para completarla. Si bien estas primeras no se pueden modificar, al incluir las nuevas algunos de sus aspectos se sobrescriben, anulándose. La adición de las físicas que faltan, respecto a dominios, superficies, aristas o puntos, se hace desde el menú contextual con el botón derecho. De nuevo el diseñador debe tener claro cuales debe añadir para la correcta simulación del problema y la obtención de los resultados deseados.

La Figura 52 muestra dicho menú para un caso de Conjugate Heat Transfer.

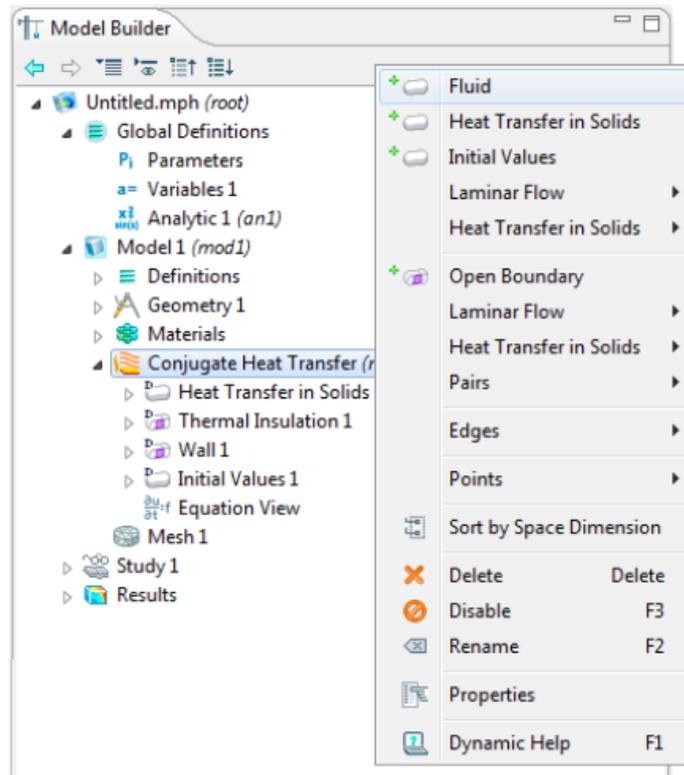


Ilustración 52. Definición de las condiciones de contorno

En este paso se vuelve a recurrir a parte de las definiciones realizadas en pasos previos, pues to que están parte de ellas relacionadas con las condiciones de contorno del modelo. El último elemento del modelo se corresponde con el mallado, Mesh, utilizado para la discretización del dominio espacial del modelo, sobre el que posteriormente se aplicarán los métodos matemáticos para la resolución de las ecuaciones de continuidad, ecuaciones que se pueden visualizar en el apartado de físicas.

Las opciones a la hora de mallar la geometría van desde la forma de este, pudiendo ser triangular, en retícula o al azar en 2D, o mediante tetraedros, cubos, prismas en 3D, permitiendo el sistema hacer combinaciones de ellos, si se cumplen las condiciones. Otra opción de mallado se refiere a la luz de la misma, es decir la distancia entre las líneas de la red, que es regulable, fijando un rango de tamaños en Size, lo mismo que la distribución de esas distancias, que se puede modificar en algunas de las geometrías haciendo que no sean uniformes en el seno del dominio, lo que es útil de cara a afinar la simulación en según qué zonas haciendo que en ellas el mallado sea más fino. La

proporción que guardan estas zonas más finas con respecto a las que no lo son se fija numéricamente a criterio del diseñador.

El resultado del mallado fija el número de elementos con que va a contar el modelo. En general, a mayor número de estos, mayor será el coste computacional de llevar a cabo la simulación, tanto en tiempo como en recursos, memoria RAM principalmente.

En este punto conviene de nuevo regresar a las definiciones del modelo. En este apartado del modelo existe la posibilidad de fijar parte de las magnitudes físicas que debe calcular y mostrar el programa, y que de no definir aquí no lo haría, o por lo menos no de la forma en que se desea. Para ello el diseñador se vale del comando Probes (sondas o sensores virtuales) del menú contextual (Figura 53).

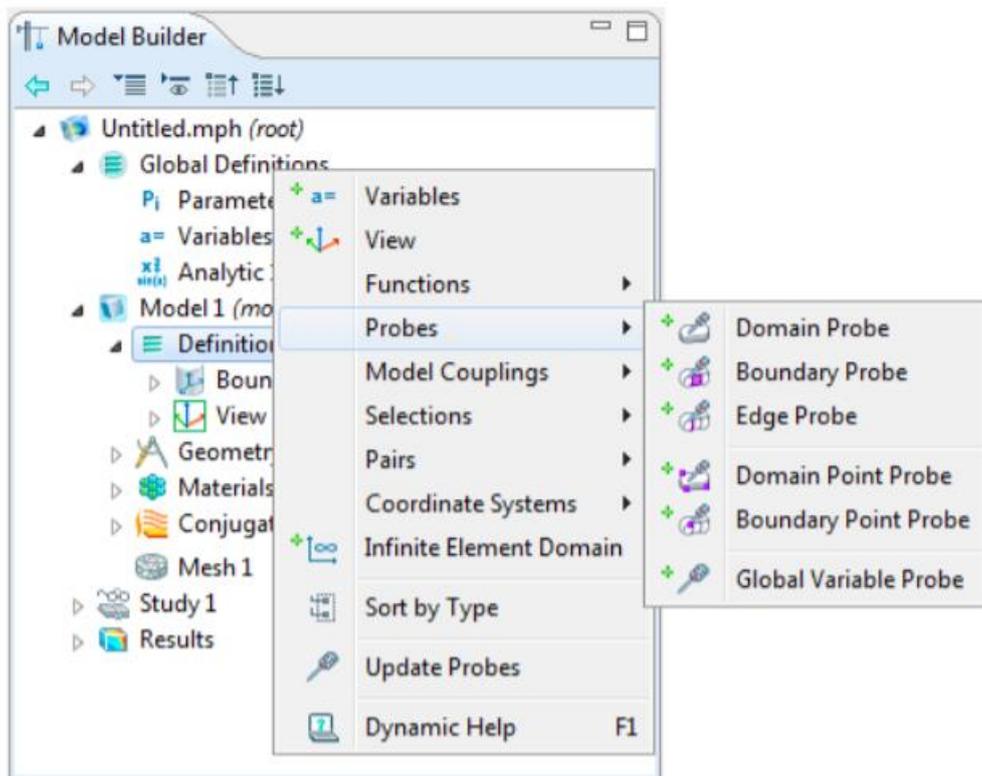


Ilustración 53. Obtención de resultados mediante 'Probes'

Esta opción permite, para las regiones de la geometría que se desee, calcular cualquiera de las variables asociadas al modelo físico, tanto en valores promedio como máximos, mínimos.

De cara a los resultados da la posibilidad de disponer de estos cálculos preparados para poder representarlos gráficamente. De nuevo las variables disponibles dependen del módulo físico en que se encuadra la simulación, ya que están predefinidas en una base.

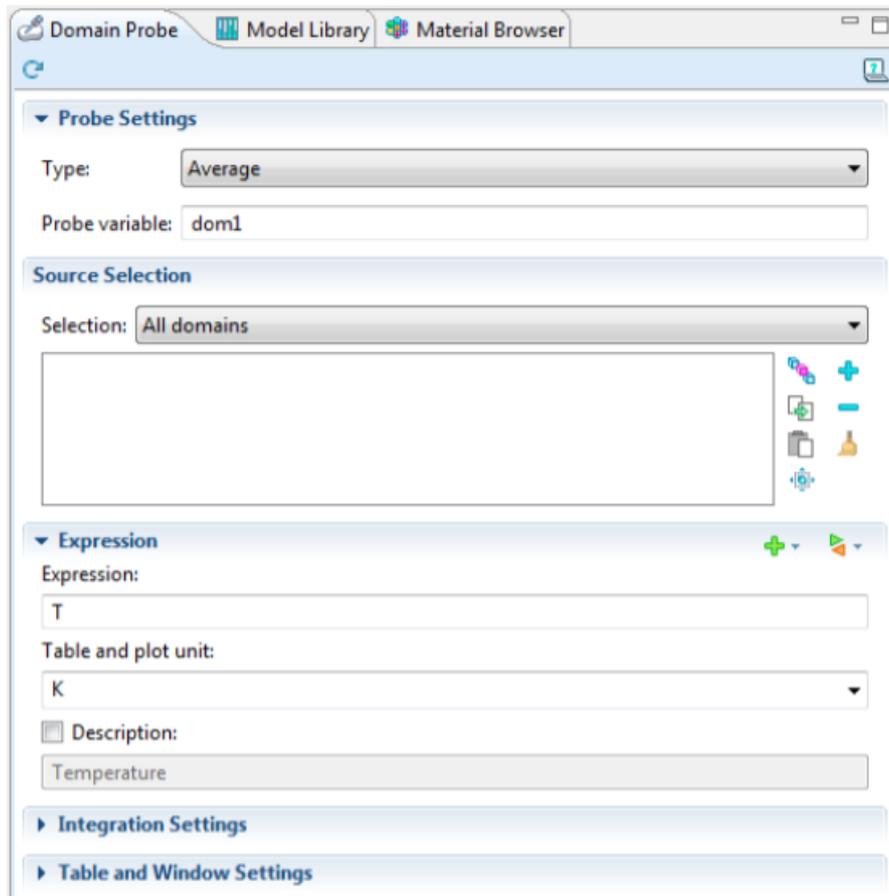


Ilustración 54. Elección de los resultados a mostrar

La selección de zonas se realiza igual que en otros apartados. La de variables físicas pulsando en los dos iconos verdes en Expression, + para añadir una, las flechas para sustituirla.

2.3.4. Study

En este elemento un diseñador novel poco más tiene que hacer que marcar la física a ejecutar, elegir el mallado, en caso de que se disponga de más de uno, activando la

pantalla del nodo Step 1, y computar, dar la orden de iniciar la simulación cuando el modelo esté listo (Figura 55).

Al igual que con el modelo cabe la posibilidad de contar con más de un estudio, pudiendo ejecutarlos sin interferencia, salvo por el hecho de que sólo se guardan los resultados del último estudio realizado.

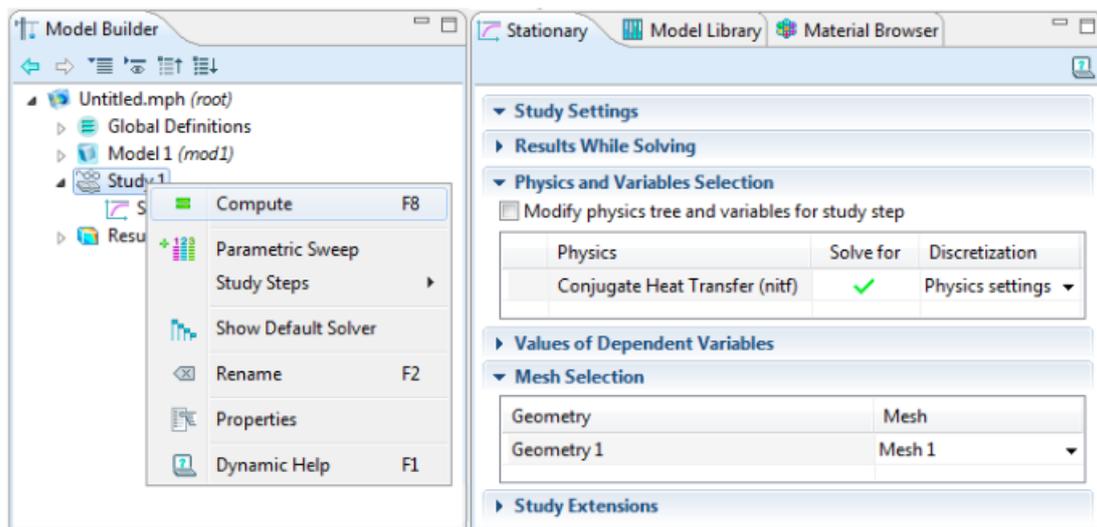


Ilustración 55. Iniciar la simulación

A medida que se ejecuta el programa, en la zona de gráficos aparece tanto el consumo de memoria RAM que requiere COMSOL para llevar a cabo la simulación, como se representa la convergencia del proceso, en caso de que esta llegue a producirse, cesando el cálculo de la solución cuando se alcanza un rango de error entre la última solución y su predecesora del orden que sea fijado.

Profundizando más en las opciones disponibles se puede seleccionar la forma en que el programa realiza los cálculos, según diferentes procedimientos, como se ve en la Figura 56. Dentro de Stationary Solver aparecen las opciones de resolución, diferenciándose en el procedimiento seguido, el consumo de RAM y de tiempo.

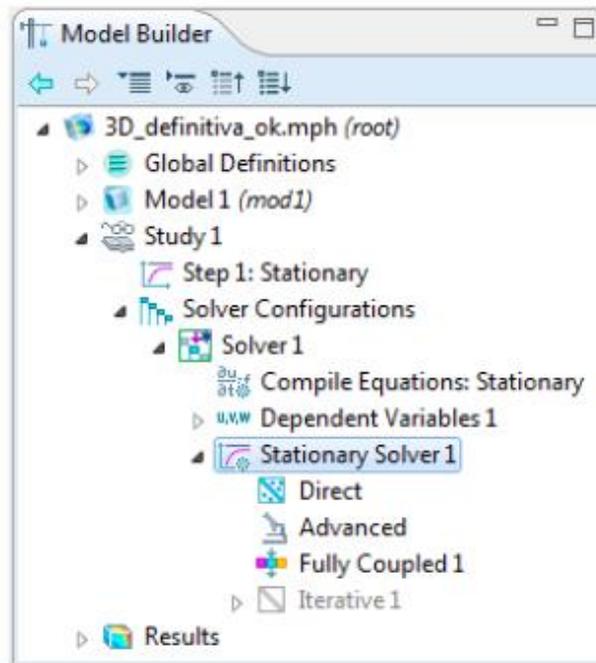


Ilustración 56. Selección del tipo de simulación

2.3.5. Results

Finalmente en esta rama del Model Builder se manejan los resultados de la simulación, fijando cuales y en qué forma se quiere que aparezcan, ya sea como gráficos, videos, tablas, informes, de cualquiera de las variables que por defecto gestiona el programa, más las solicitadas por el diseñador a través de los Probes.

Otra vez las opciones disponibles están adaptadas a las condiciones prefijadas. Por ejemplo, en un modelo 3D, se pueden representar variables de cualquiera de las formas que muestra la Figura 57.

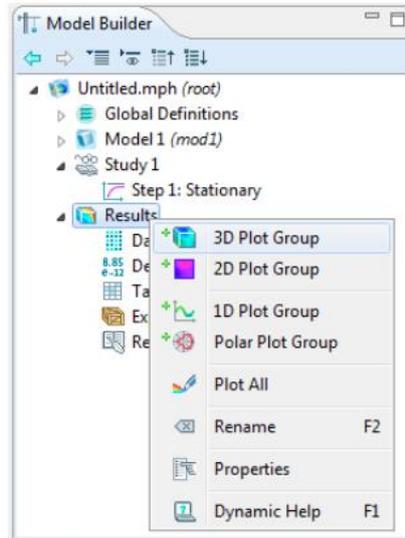


Ilustración 57. Mostrar resultados

Una vez seleccionados los tipos de resultados a obtener, se puede adaptar en la ventana adyacente no sólo su apariencia, también que datos se quiere representar a partir de los datos procedentes del estudio.

Finalmente, de cara a contar con los resultados de las sondas, hay que evaluarlas, realizándose en el nodo Derived Values dentro de Results (Figura 59). Al hacerlo los resultados de las mismas aparecen tanto en forma de Tablas individuales, una para cada sonda, en el nodo siguiente, Tables, y al tiempo en la pantalla de resultados en la esquina inferior derecha del programa.

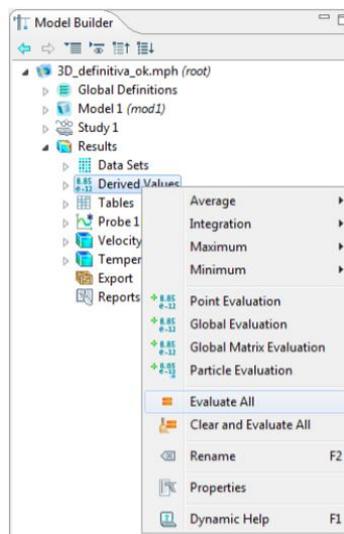


Ilustración 58

Capítulo V. Descripción del caso de estudio

V. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL CASO EN ESTUDIO; TRANSFORMADOR Y ACEITE MINERAL

Como mencionamos anteriormente, este estudio analiza la influencia del tipo de mallado seleccionado en la simulación de la refrigeración de un transformador sobre los resultados obtenidos. Este análisis se ha realizado usando una sección del LVW (Low Voltage Winding o devanado de baja tensión) de un transformador trifásico. Las características eléctricas nominales de este transformador son 14 MVA, 66/6.3 kV, Dyn11, y su refrigeración es de tipo ONAN, que como vimos en el capítulo II del presente estudio significa:

- Letra O: Líquido aislante/refrigerante mineral o sintético con el punto de combustión $\leq 300^{\circ}\text{C}$.
- Letra N: Circulación natural por termosifón a través del sistema de refrigeración y en los arrollamientos, para la refrigeración del medio interno.
- Letra A: indica que el medio externo de refrigeración es aire.
- Letra N: Para el caso de circulación natural en la refrigeración del medio externo.

Además, el transformador tiene un cambiador de tomas en carga que permite 21 relaciones de transformación diferentes. La alta tensión puede ser variada $\pm 10\%$ (máximo 72.6kV, mínimo 59.4kV).

1. Transformador

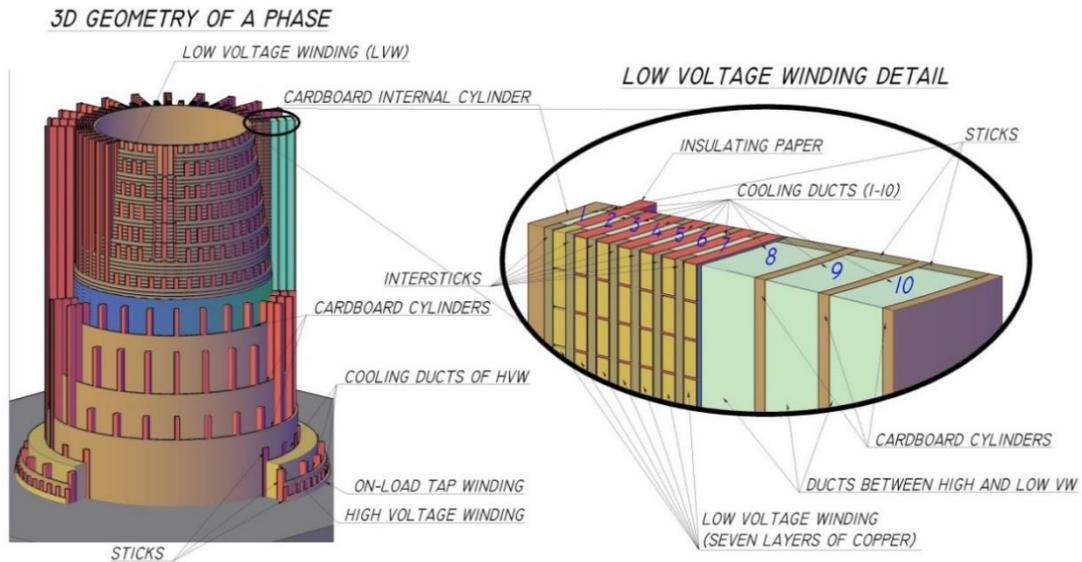


Ilustración 59. Transformador ABB 14 MVA, 66/6.3 kV. Geometría 3D y detalle LVW [Ramón Lecuna]

La parte izquierda de la Figura 59 y la esquina inferior derecha de la Figura 60 muestran la distribución concéntrica de los tres devanados de una fase del transformador: el LVW en la parte interior; el cambiador de tomas en carga en la parte externa; finalmente, el devanado de alta tensión (HVW, High Voltage Winding en inglés) en medio de ambos.

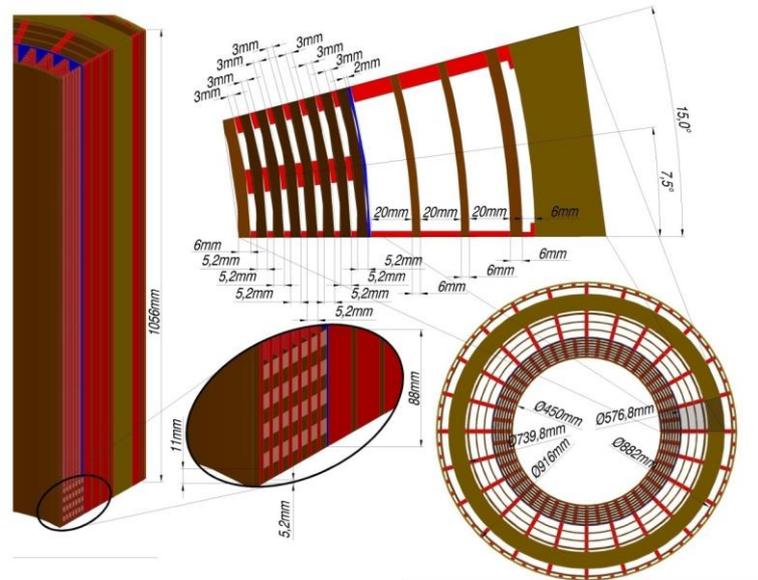


Ilustración 60. Dimensionamiento de la plata de una fase y detalles LVW [Ramón Lecuna]

El LVW, mostrado en 3D en la parte derecha de la Figura 59 y en 2D (planta) en el lado superior de la Figura 60, se construye sobre un cilindro de cartón (6 mm de espesor y diámetro interior de 450 mm). Ambos, LVW y cilindro, son separados por medio de 48 listones de madera e interlistones (24+24) de 3 mm de espesor formando 48 conductos refrigerantes de 7.5 grados de amplitud entre la primera capa del devanado y el cilindro de cartón. De hecho, este devanado está realizado con 77 espiras distribuidas en siete capas concéntricas (11 espiras/capa) (Ver detalle 3D en la Figura 60). La separación entre estas siete capas se realiza de la misma manera que la primera capa del cilindro de cartón, creándose así los conductos de refrigeración entre capas. Cada espira se construye por medio de ocho pletinas rectangulares (10.4x4.6 mm) de cobre conectadas en paralelo. Estos conductores son recubiertos con una fina capa de papel de 0.3 mm de ancho (Ver el detalle en la Figura 60). Finalmente, la altura total del devanado es de 1056 mm.

La separación entre devanados primario y secundario se realiza por medio de tres canales de aceite más anchos (Ver detalle en la parte derecha de la Figura 59 y planta en la parte superior de la Figura 60). Tres cilindros de cartón de 4 mm de espesor, separados por medio de listones de madera de 20 mm de ancho se usan para crear estos canales, cuya amplitud es de 15 grados.

2. Aceite mineral

Propiedades	Aceite Mineral
Densidad (kg/dm ³)	at 20°C 0.83 to 0.89
Punto fluidez (°C)	-30 to -63
Biodegradabilidad	no biodegradable
Punto inflamación (°C)	110 to 175
Punto ignición (°C)	110 to 185
Viscosidad cinemática (cSt)	a 0°C <66
	a 40°C 3.0 to 16.0
	a 100°C 2.0 to 3.0
Conductividad térmica (W/m ² K)	at 20°C 0.135
Calor específico (kJ/kgK)	a 20 °C 1.85
Acidez (mg KOH/g)	0.01
Tension de ruptura (kV)	>65
Factor disipación (%)	a 20°C 0.00002
	a 90°C 0.0001
Constante dieléctrica (a 20°C)	2.1 to 2.5

Tabla 9. Propiedades aceite mineral

3. Modelo geométrico original

Como ya se ha comentado, para la realización del estudio de mallados con el software de elementos finitos Comsol, vamos a tomar como punto de partida la geometría de un semisector de 7.5° del LVW de un transformador trifásico.

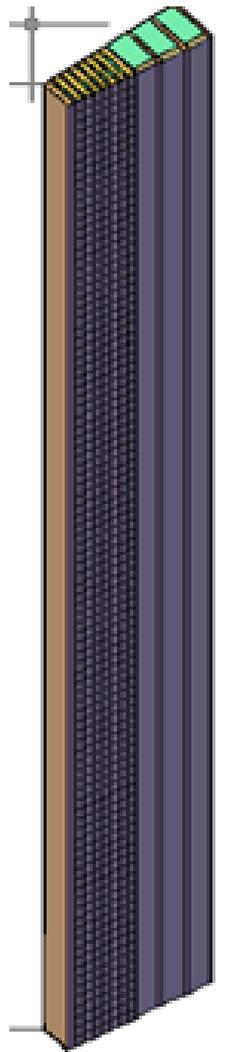


Ilustración 61. Semisector LVW 1056mm

Debido a que esta geometría es demasiado grande, tiene 1056mm de altura, y conllevaría un coste temporal elevado la ejecución de las simulaciones, se ha optado por modificar la geometría original, para lo que se ha seleccionado un cuarto de ésta, por lo que la longitud de la nueva geometría es de 264. La modificación se ha realizado

en AutoCad a partir del archivo de formato *.dwg de la geometría original. El resultado fue el siguiente:

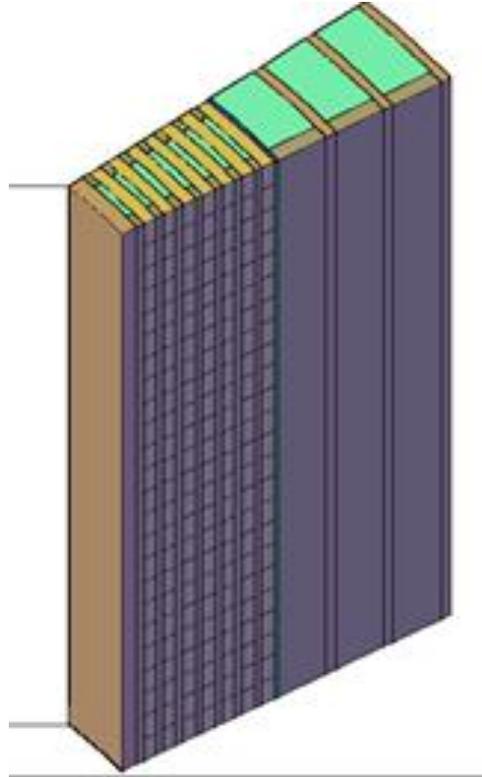


Ilustración 62. Semisector LVW 264mm

A fin de simplificar los cálculos al programa y hacer las simulaciones más livianas, se elimina el dominio papel, el cuál será representado mediante una condición de contorno en el programa de simulación, en nuestro caso comsol.

Una vez modificada la geometría para adecuarla a los requisitos del presente estudio, se guarda ésta en formato *.Sat, al ser éste un formato perfectamente reproducible por Comsol.

3.1. Global definitions

Desde el archivo original de Comsol se importó la geometría modificada, de manera que las definiciones globales del modelo ya están programadas y el trabajo se ve simplificado.

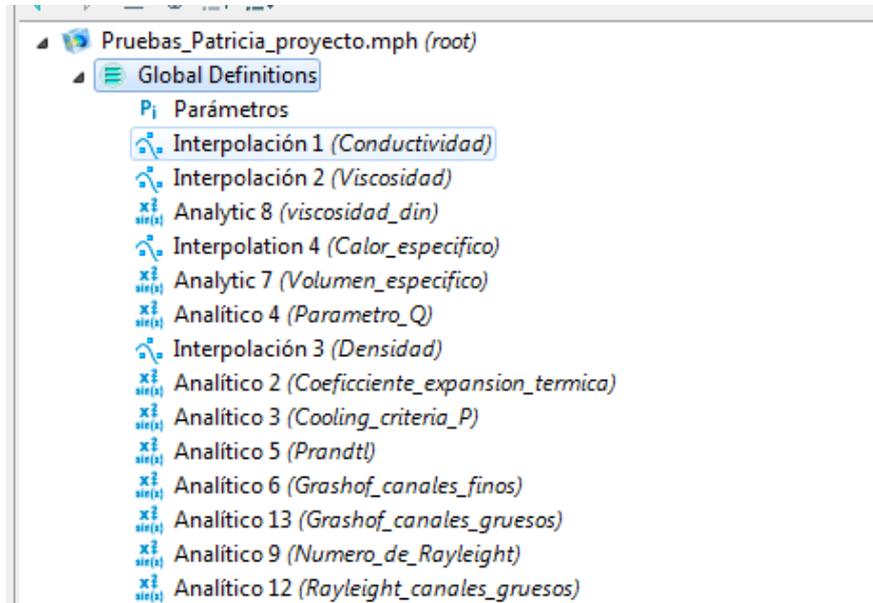


Ilustración 63. Global definitions Modelo Original

- Parámetros:

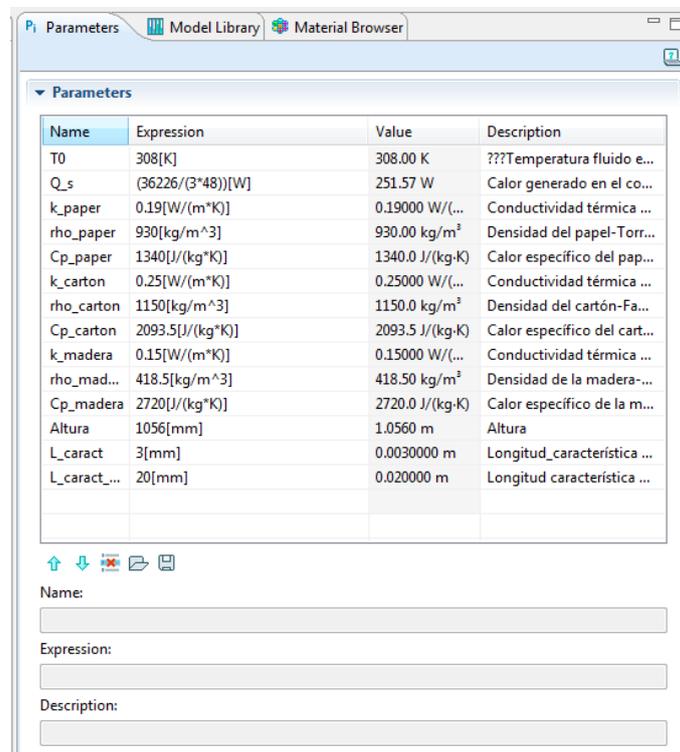


Ilustración 64. Parámetros Modelo Original

- Interpolación 1 (conductividad):

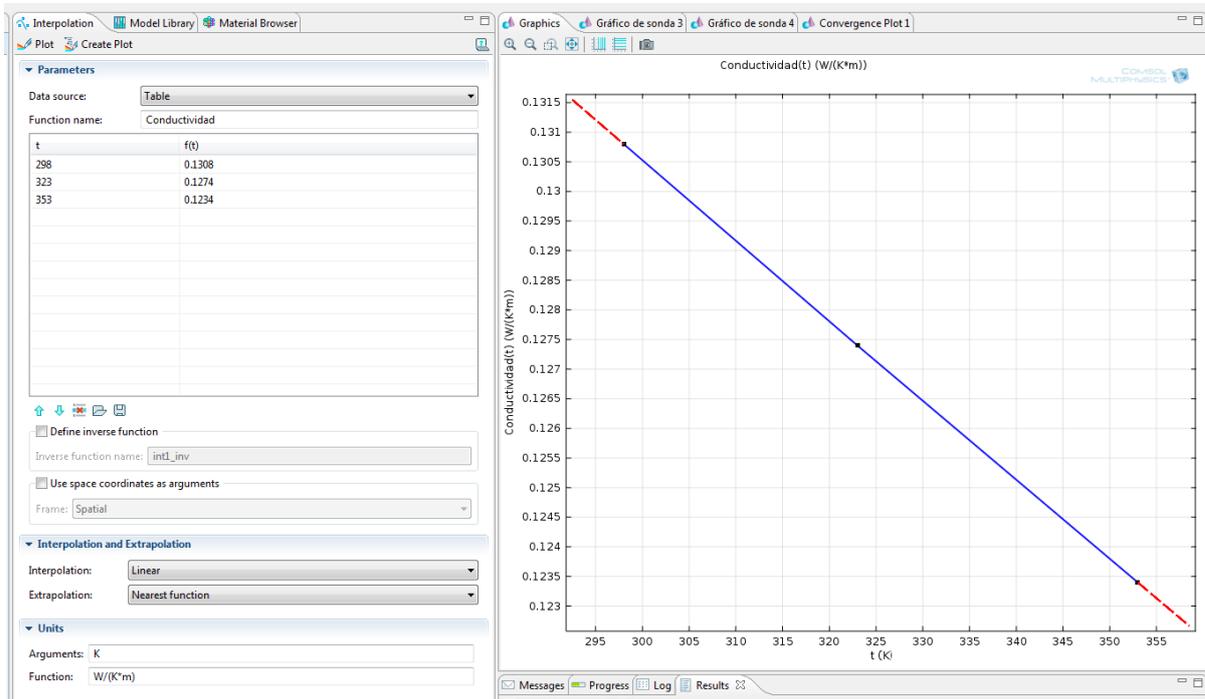


Ilustración 65. Conductividad Aceite Mineral

- Interpolación 2 (Viscosidad):

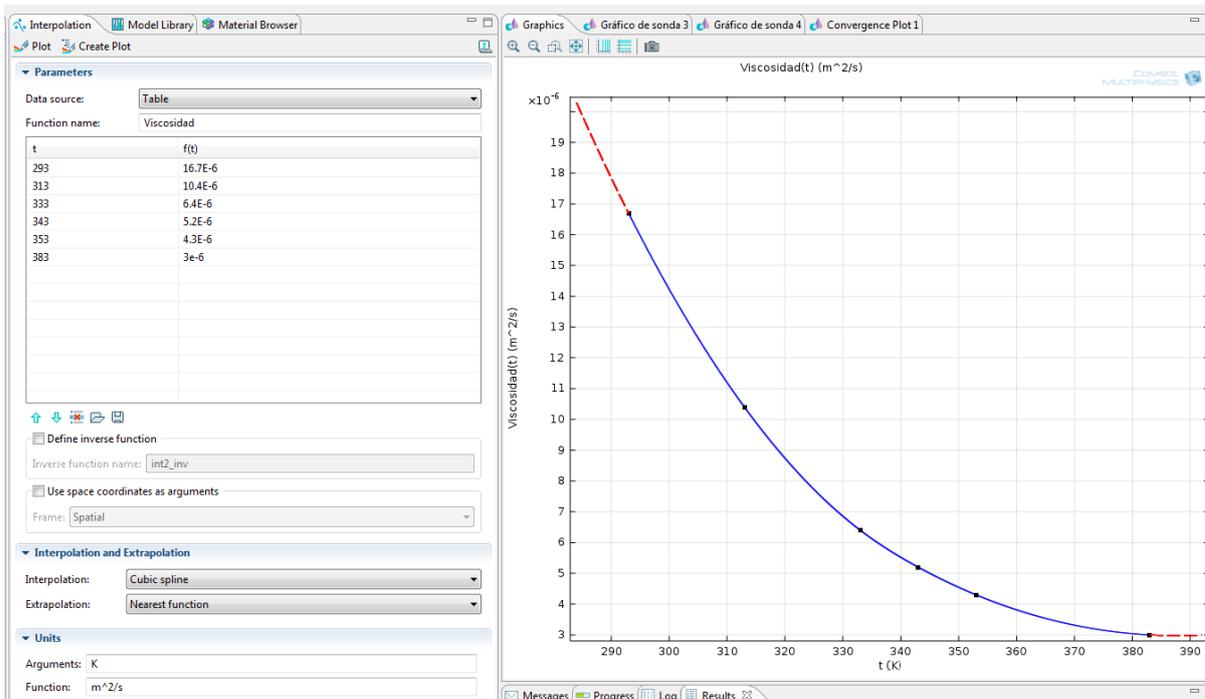


Ilustración 66. Viscosidad Aceite mineral

- Viscosidad dinámica: $\text{Viscosidad}(x) \cdot \text{Densidad}(x)$

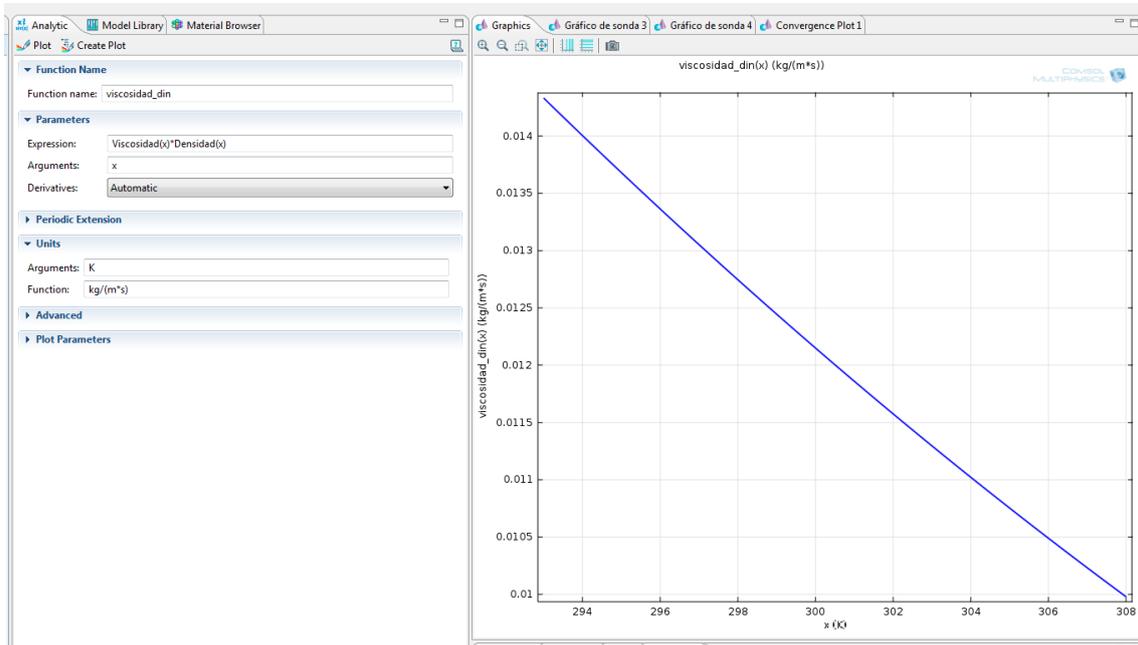


Ilustración 67. Viscosidad dinámica Aceite Mineral

- Interpolación 4 (Calor específico):

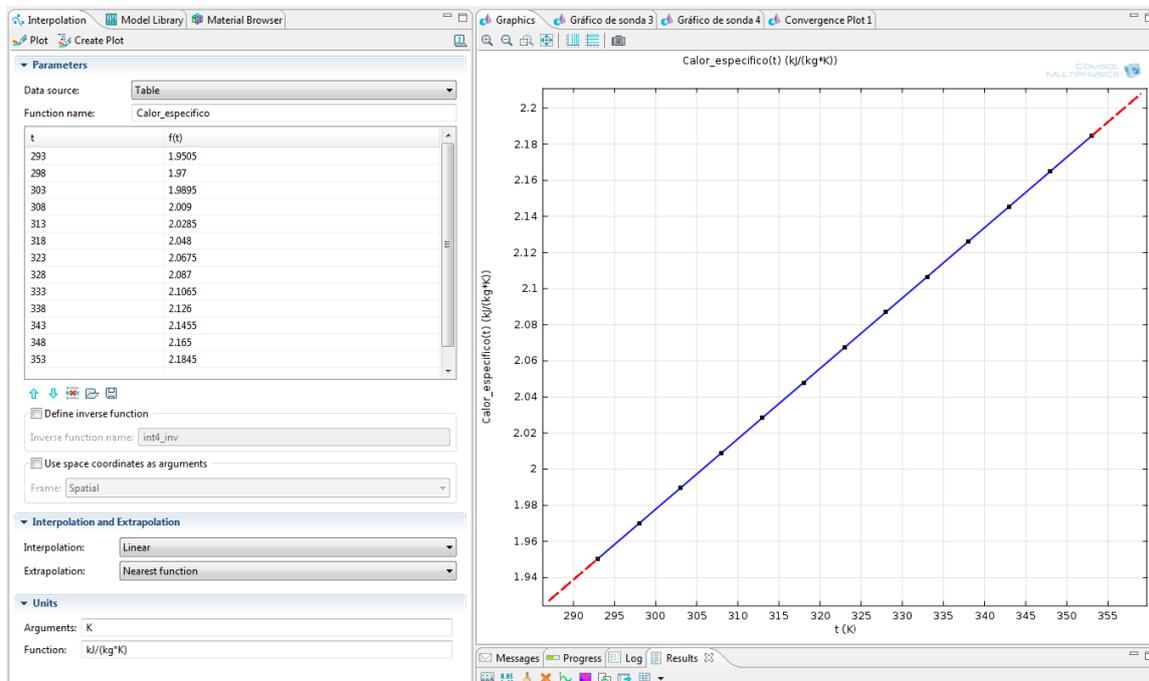


Ilustración 68. Calor específico Aceite mineral

- Volumen específico: $(1/(\text{Densidad}(x)))$

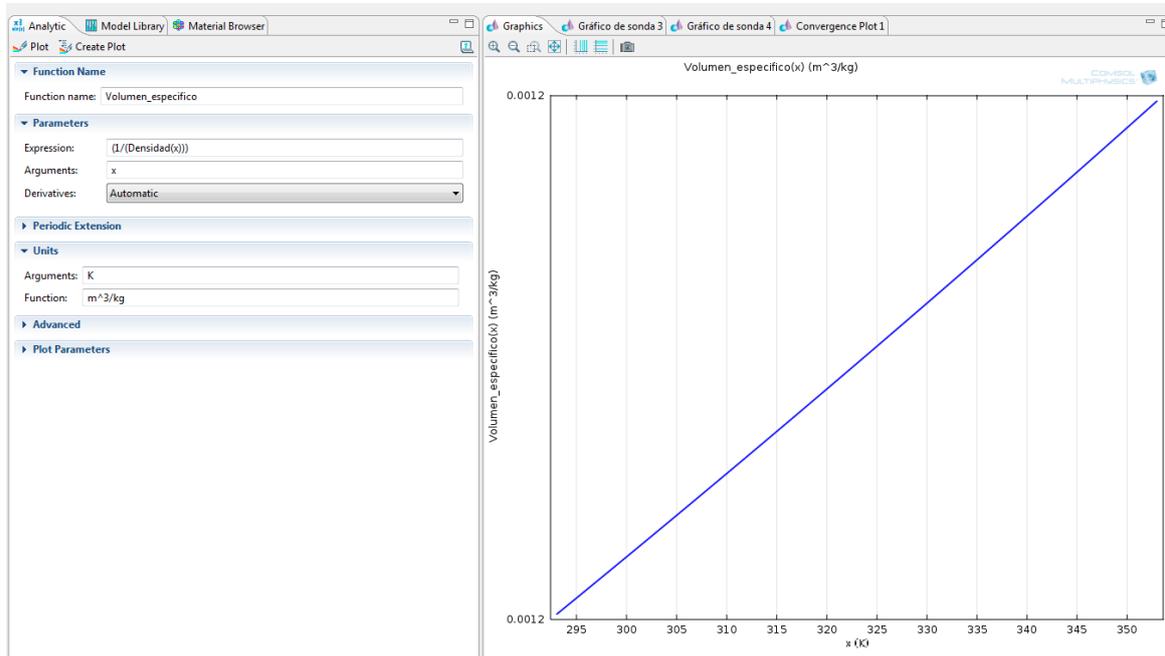


Ilustración 69. Volumen específico Aceite Mineral

- Parámetro Q: $\text{Viscosidad}(T_0)/\text{Viscosidad}(x)$

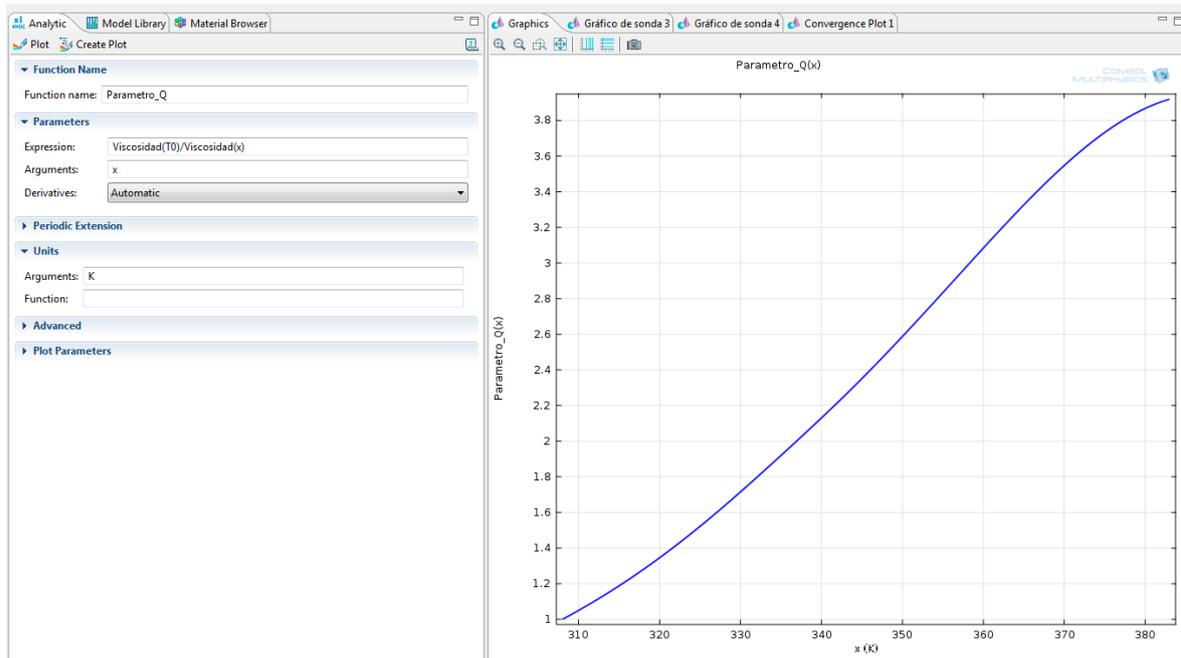


Ilustración 70. Parámetro Q Aceite Mineral

- Densidad:

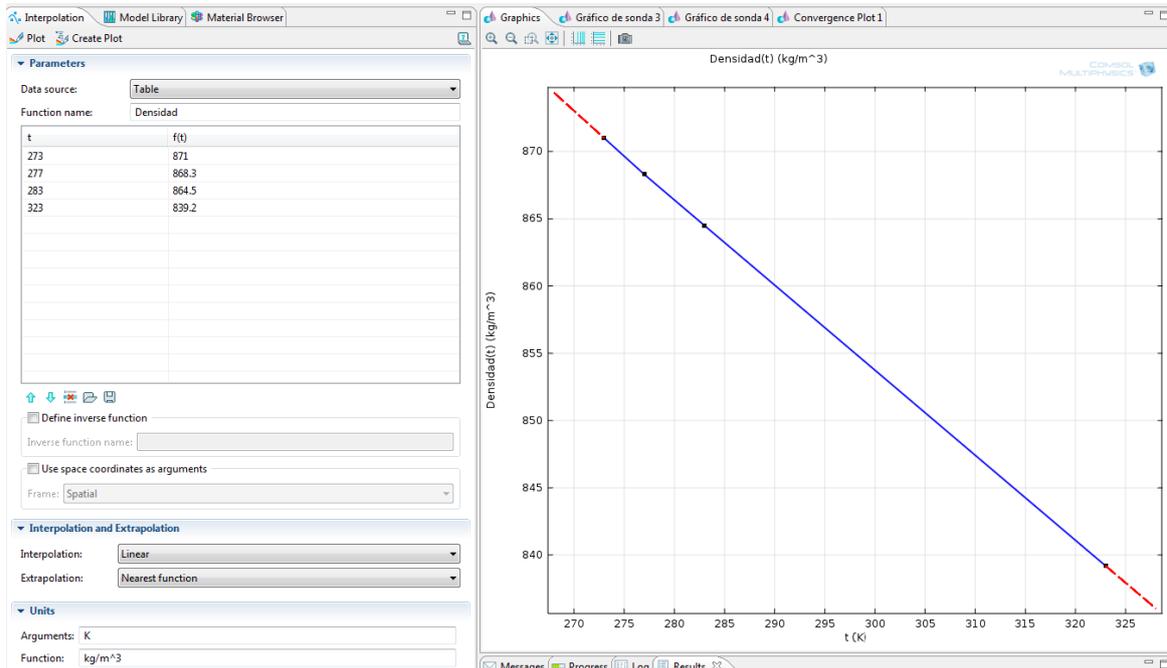


Ilustración 71. Densidad Aceite Mineral

- Coeficiente expansión térmica: $(\text{Densidad}(273[\text{K}]) - \text{Densidad}(x)) / (\text{Densidad}(x) * (x - 273[\text{K}]))$

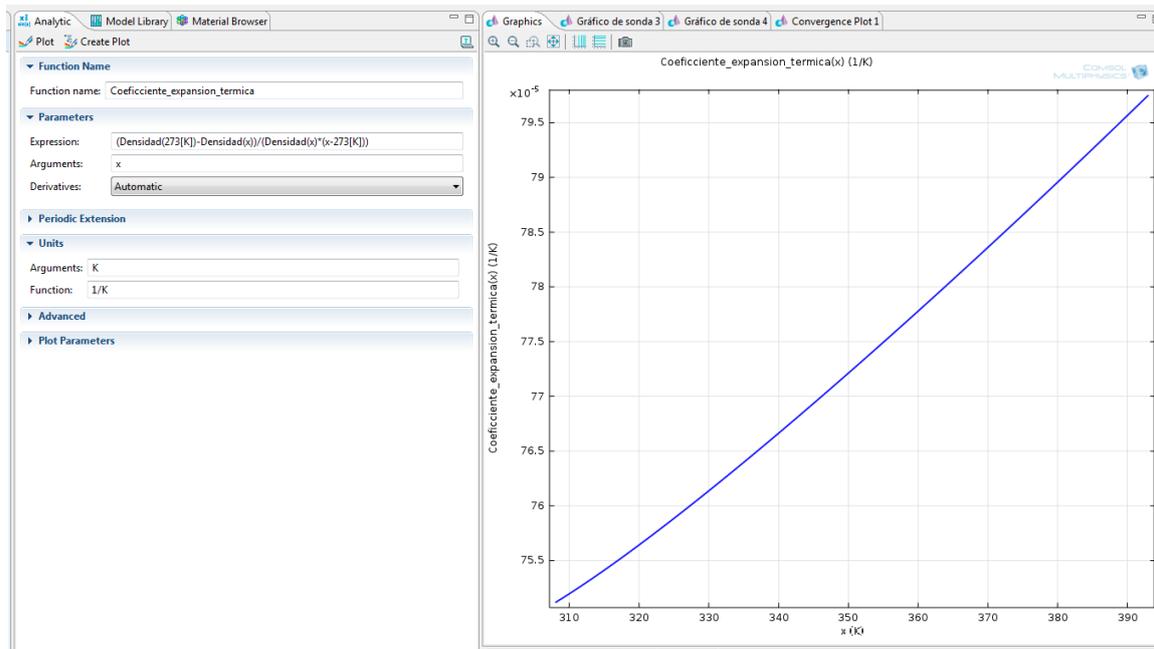


Ilustración 72. Coeficiente Expansión Térmica

- Cooling Criteria P: $((1000 * \text{Calor_especifico}(\text{Temp}) * \text{Conductividad}(\text{Temp}) * \text{Coeficiente_expansion_termica}(\text{Temp})) / (\text{Viscosidad}(\text{Temp})))$

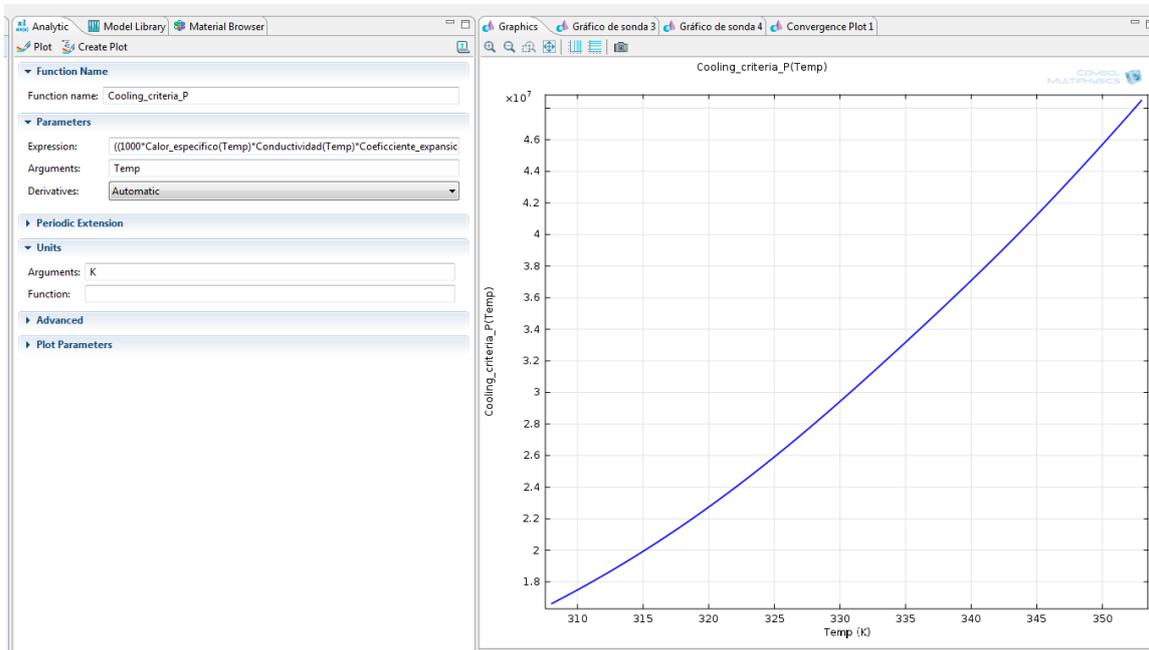


Ilustración 73. Cooling criteria P aceite mineral

- Prantl: $\text{Calor_específico}(x) * \text{Viscosidad}(x) * \text{Densidad}(x) / \text{Conductividad}(x)$

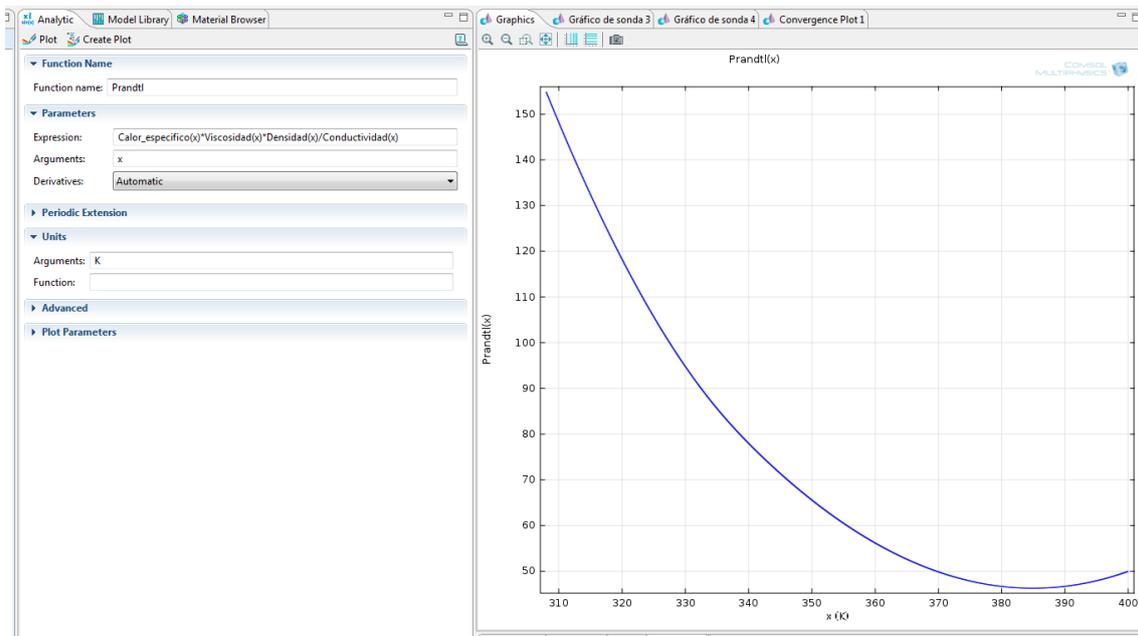


Ilustración 74. Coeficiente Prantl Aceite Mineral

- Grashof Canales Finos: $g_{const} * \text{Coeficiente_expansion_termica}(x) * (x - T_0) * L_{caract}^3 / (\text{Viscosidad}(x)^2)$

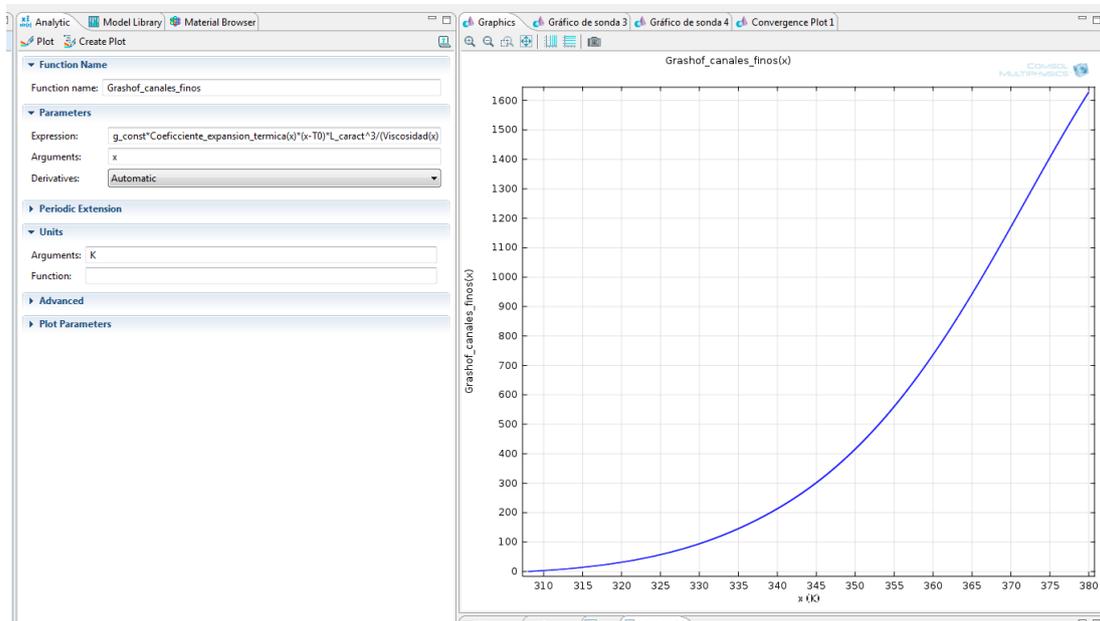


Ilustración 75. Coeficiente Grashof Canales Finos

- Grashof Canales Gruesos: $g_{const} * \text{Coeficiente_expansion_termica}(x) * (x - T_0) * L_{caract_canal_grueso}^3 / (\text{Viscosidad}(x)^2)$

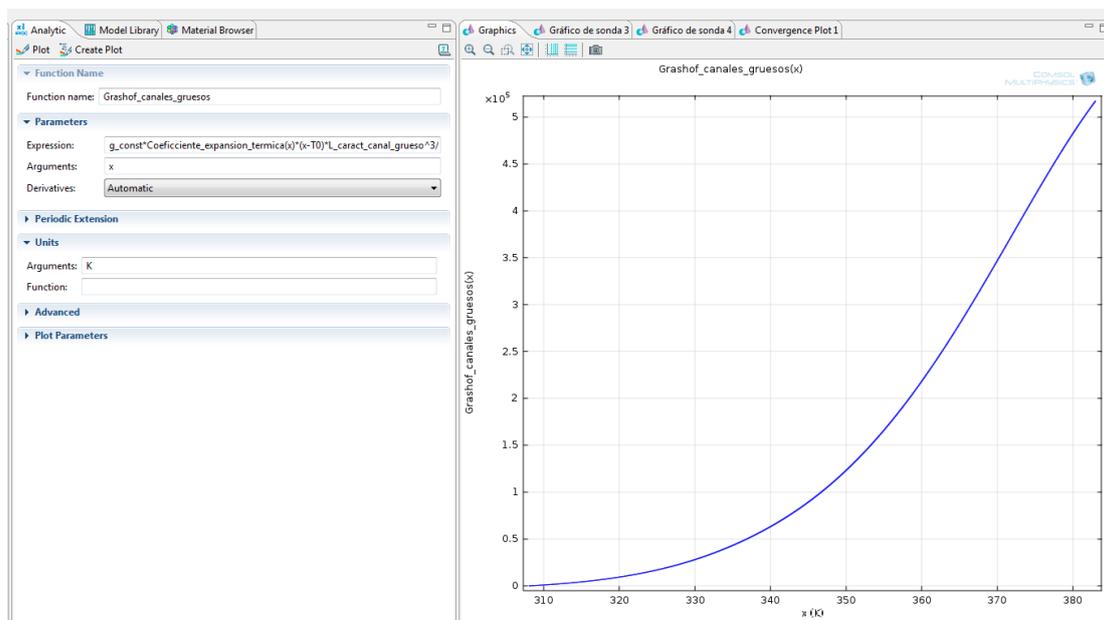


Ilustración 76. Coeficiente Grashof Canales Gruesos

- Número de Rayleigh: $\text{Prandtl}(x) * \text{Grashof_canales_finos}(x)$

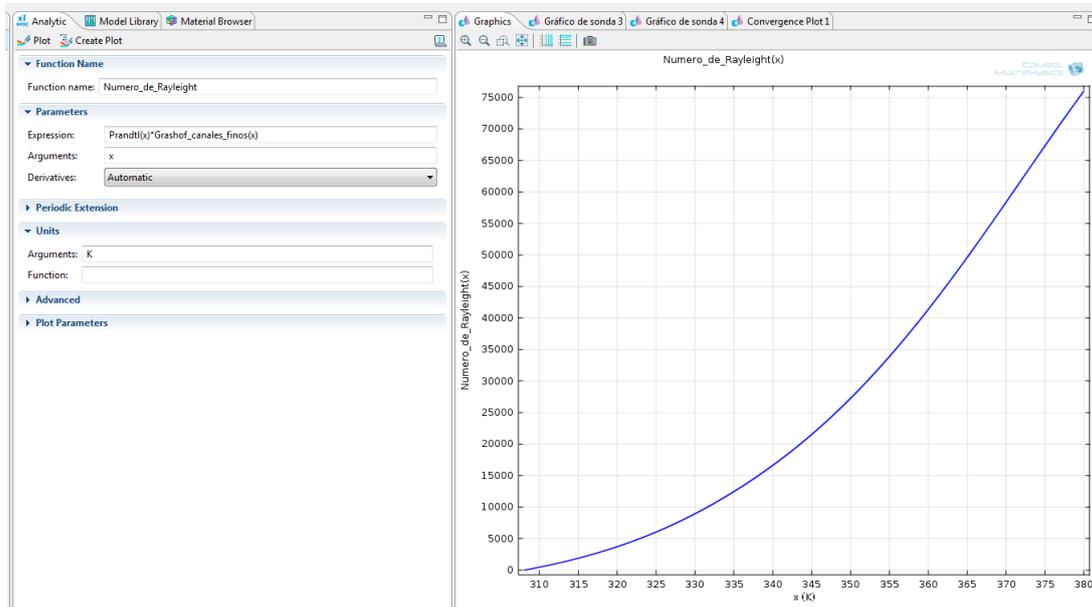


Ilustración 77. Reyleigh Canales Finos

- Reyleigh Canales Gruesos: $\text{Prandtl}(x) * \text{Grashof_canales_gruesos}(x)$

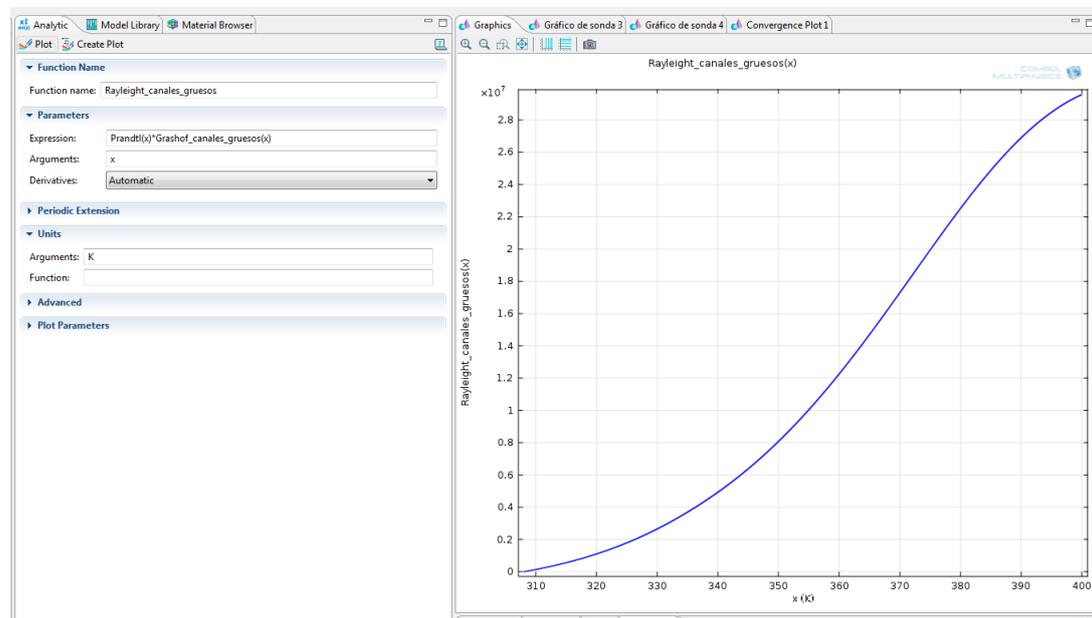


Ilustración 78. Reyleigh Canales Gruesos

Todas estas definiciones globales se implementan en el programa a partir de los parámetros característicos del aceite empleado. Concretamente son los siguientes:

Temperatura	Calor específico
293	1950,5
293,0606061	1950,736364
293,1212121	1950,972727
293,1818182	1951,209091
293,2424242	1951,445455
293,3030303	1951,681818
293,3636364	1951,918182
293,4242424	1952,154545
293,4848485	1952,390909
293,5454545	1952,627273
293,6060606	1952,863636
293,6666667	1953,1
293,7272727	1953,336364
293,7878788	1953,572727
293,8484848	1953,809091
293,9090909	1954,045455
293,969697	1954,281818
294,030303	1954,518182
294,0909091	1954,754545
294,1515152	1954,990909
294,2121212	1955,227273
294,2727273	1955,463636
294,3333333	1955,7
294,3939394	1955,936364
294,4545455	1956,172727
294,5151515	1956,409091
294,5757576	1956,645455
294,6363636	1956,881818
294,6969697	1957,118182
294,7575758	1957,354545
294,8181818	1957,590909
294,8787879	1957,827273
294,9393939	1958,063636
295	1958,3

Tabla 10. Datos calor específico

temperatura	conductividad
298	0,1308
298,0551102	0,130792505
298,1102204	0,13078501
298,1653307	0,130777515
298,2204409	0,13077002
298,2755511	0,130762525
298,3306613	0,13075503
298,3857715	0,130747535
298,4408818	0,13074004
298,495992	0,130732545
298,5511022	0,13072505
298,6062124	0,130717555
298,6613226	0,13071006
298,7164329	0,130702565
298,7715431	0,13069507
298,8266533	0,130687575
298,8817635	0,13068008
298,9368737	0,130672585
298,991984	0,13066509
299,0470942	0,130657595
299,1022044	0,1306501
299,1573146	0,130642605
299,2124248	0,13063511
299,2675351	0,130627615
299,3226453	0,13062012
299,3777555	0,130612625
299,4328657	0,13060513
299,487976	0,130597635
299,5430862	0,13059014
299,5981964	0,130582645
299,6533066	0,13057515
299,7084168	0,130567655
299,7635271	0,13056016
299,8186373	0,130552665

Tabla 11. Datos Conductividad térmica

Temperatura	Densidad
273	871
273,0501505	870,9661484
273,1003009	870,9322969
273,1504514	870,8984453
273,2006018	870,8645938
273,2507523	870,8307422
273,3009027	870,7968907
273,3510532	870,7630391
273,4012036	870,7291876
273,4513541	870,695336
273,5015045	870,6614845
273,551655	870,6276329
273,6018054	870,5937813
273,6519559	870,5599298
273,7021063	870,5260782
273,7522568	870,4922267
273,8024072	870,4583751
273,8525577	870,4245236
273,9027081	870,390672
273,9528586	870,3568205
274,003009	870,3229689
274,0531595	870,2891174
274,1033099	870,2552658
274,1534604	870,2214142
274,2036108	870,1875627
274,2537613	870,1537111
274,3039117	870,1198596
274,3540622	870,086008
274,4042126	870,0521565
274,4543631	870,0183049
274,5045135	869,9844534
274,554664	869,9506018
274,6048144	869,9167503
274,6549649	869,8828987

Tabla 12. Datos Densidad

TEMPERATURA	VISCOSIDAD
293	1,67E-05
293,0903614	1,67E-05
293,1807229	1,66E-05
293,2710843	1,66E-05
293,3614458	1,66E-05
293,4518072	1,65E-05
293,5421687	1,65E-05
293,6325301	1,65E-05
293,7228916	1,64E-05
293,813253	1,64E-05
293,9036145	1,64E-05
293,9939759	1,63E-05
294,0843373	1,63E-05
294,1746988	1,63E-05
294,2650602	1,62E-05
294,3554217	1,62E-05
294,4457831	1,62E-05
294,5361446	1,61E-05
294,626506	1,61E-05
294,7168675	1,61E-05
294,8072289	1,60E-05
294,8975904	1,60E-05
294,9879518	1,60E-05
295,0783133	1,59E-05
295,1686747	1,59E-05
295,2590361	1,59E-05
295,3493976	1,58E-05
295,439759	1,58E-05
295,5301205	1,58E-05
295,6204819	1,57E-05
295,7108434	1,57E-05
295,8012048	1,57E-05
295,8915663	1,56E-05
295,9819277	1,56E-05

Tabla 13. Datos Viscosida

3.2. Definición del modelo

Una vez caracterizadas las definiciones globales, se definen cada uno de los componentes de la geometría, la cual dividimos en:

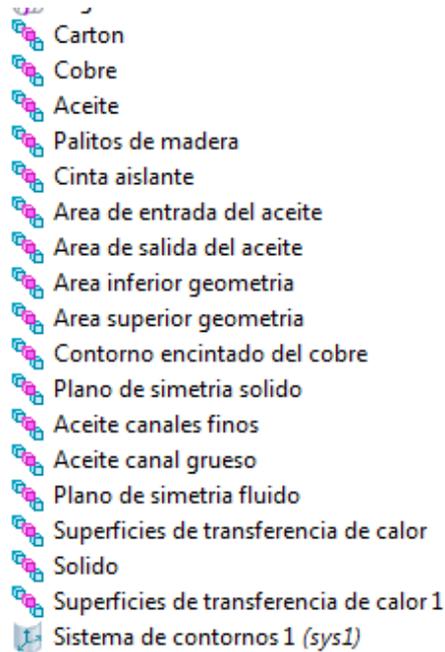


Ilustración 79. Definición de cada componente de la geometría

- Cartón:

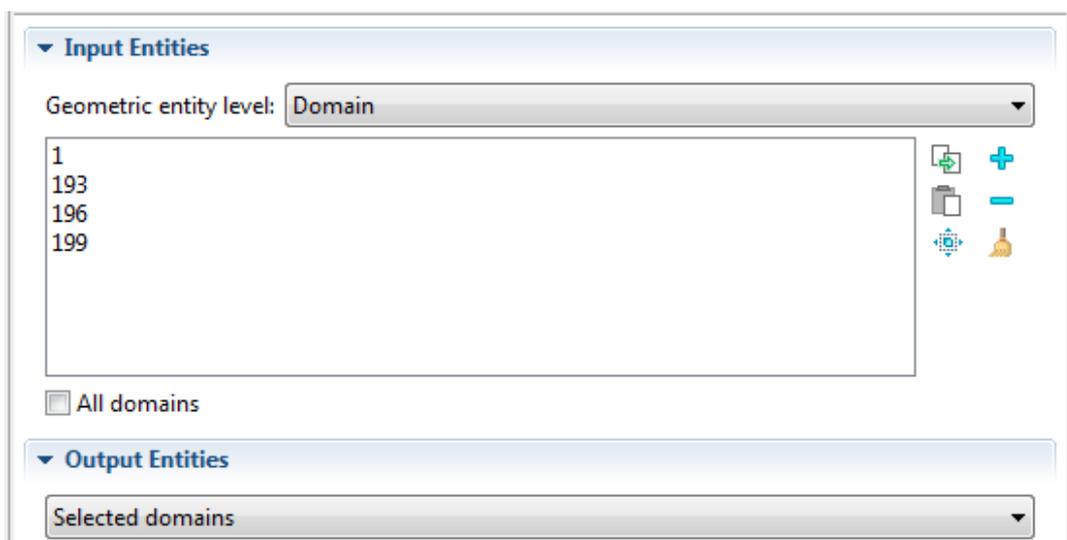


Ilustración 80. Dominio Cartón 1

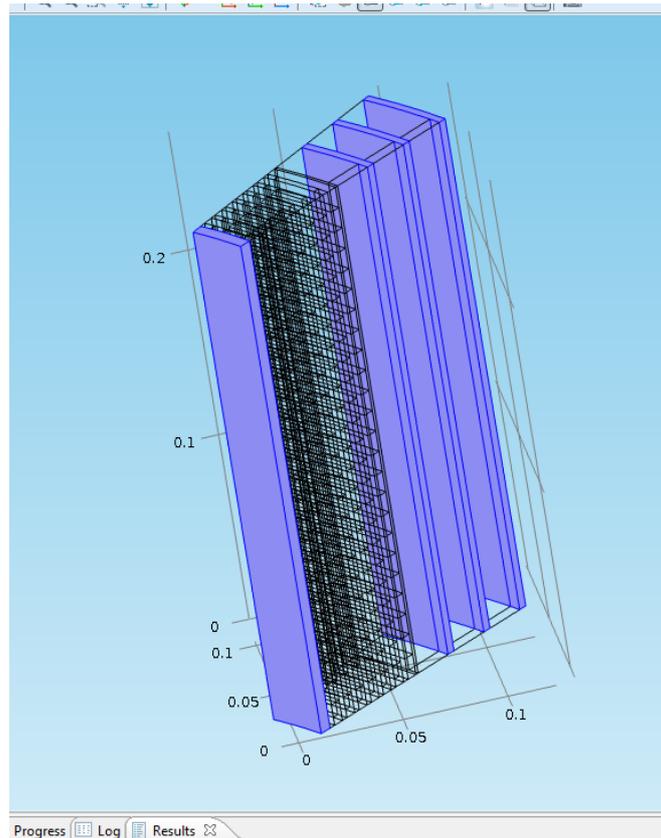


Ilustración 81. Dominio cartón 2

- Cobre:

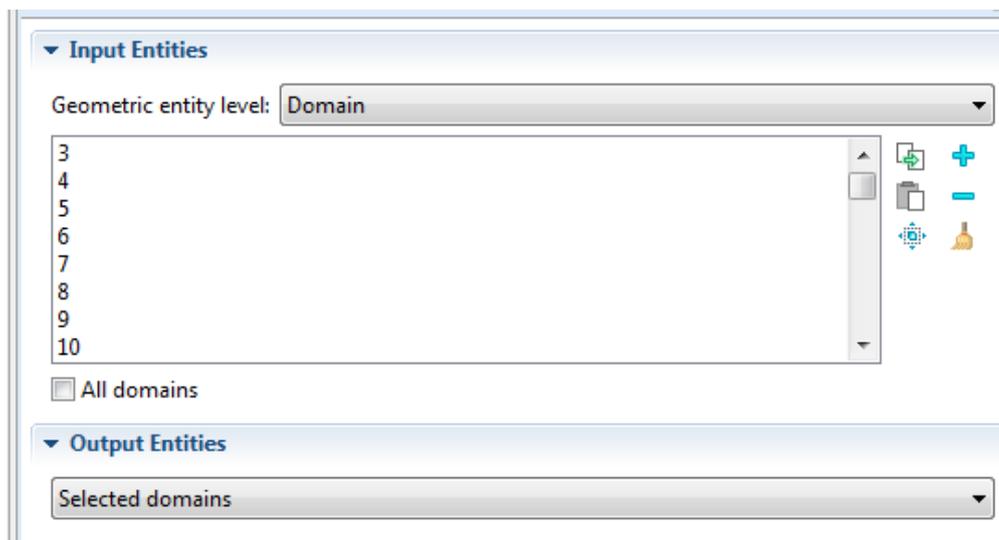


Ilustración 82. Dominio cobre 1

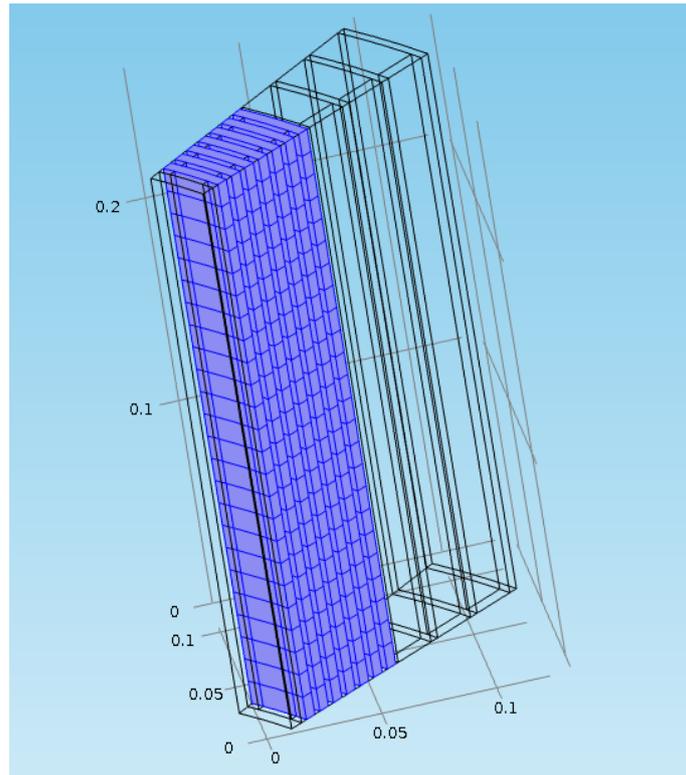


Ilustración 83. Dominio cobre 2

- Aceite:

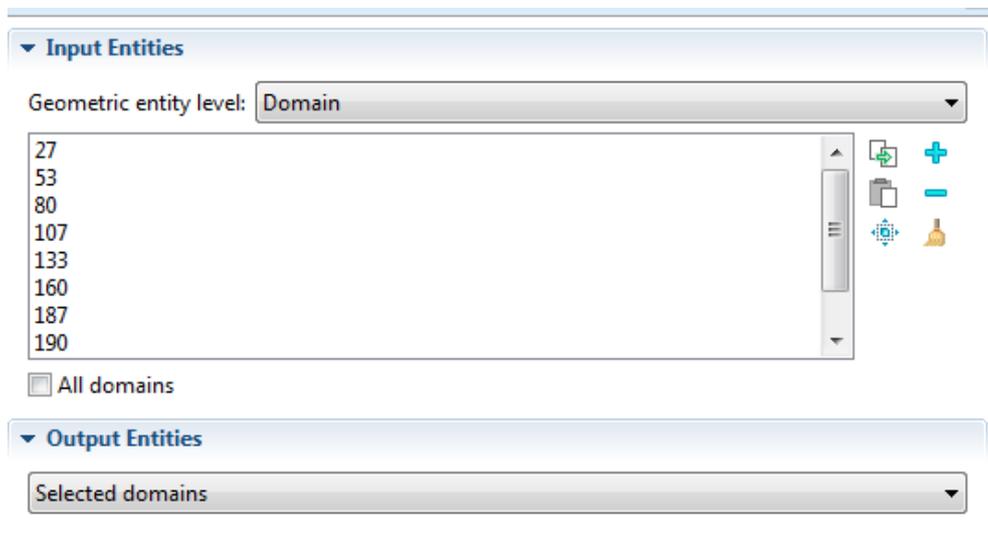


Ilustración 84. Dominio aceite 1

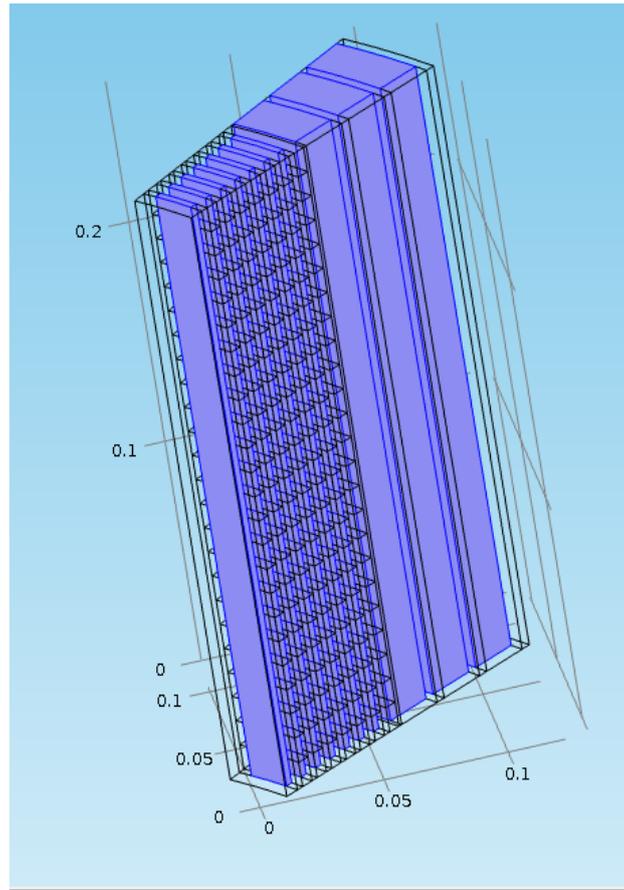


Ilustración 85. Dominio aceite 2

- Palitos de madera:

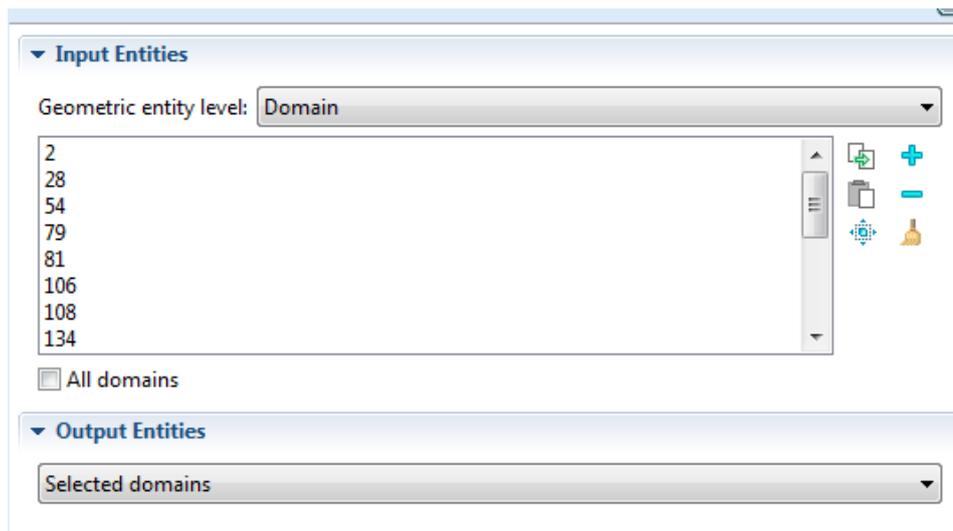


Ilustración 86. Dominio madera 1

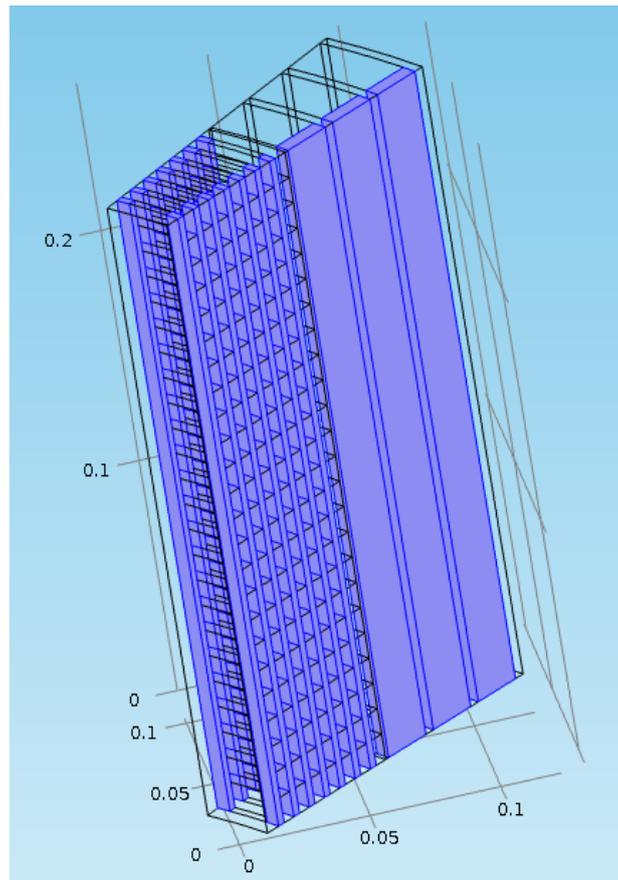


Ilustración 87. Dominio madera 2

- Cinta aislante:

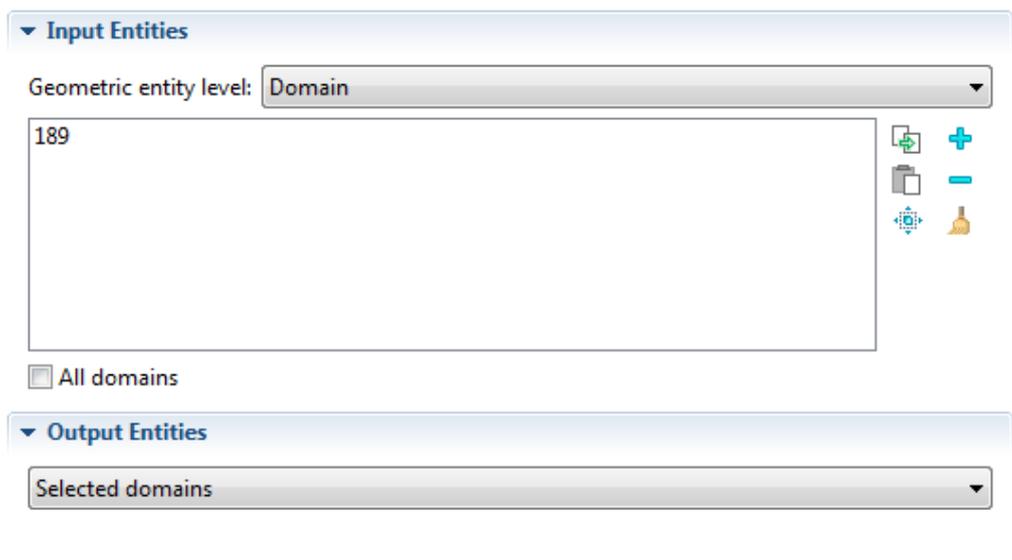


Ilustración 88. Dominio cinta aislante 1

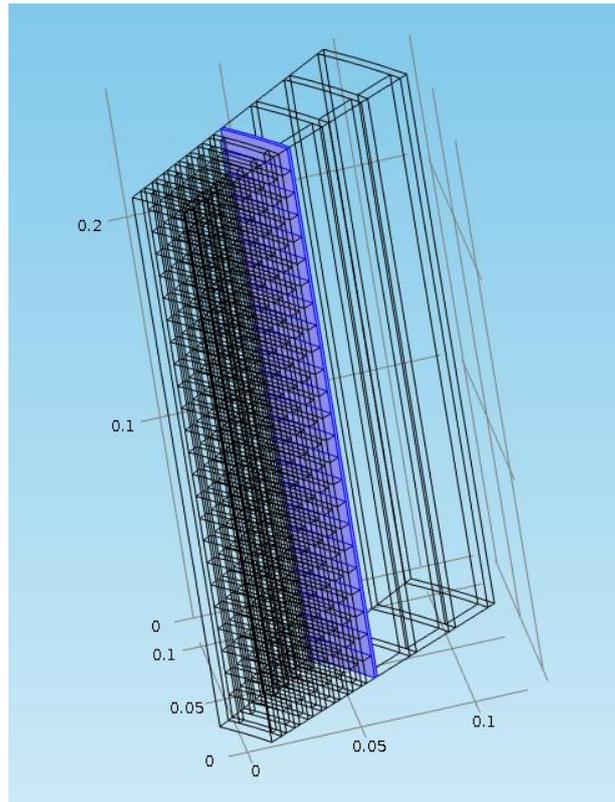


Ilustración 89. Dominio cinta aislante 2

- Área entrada aceite:

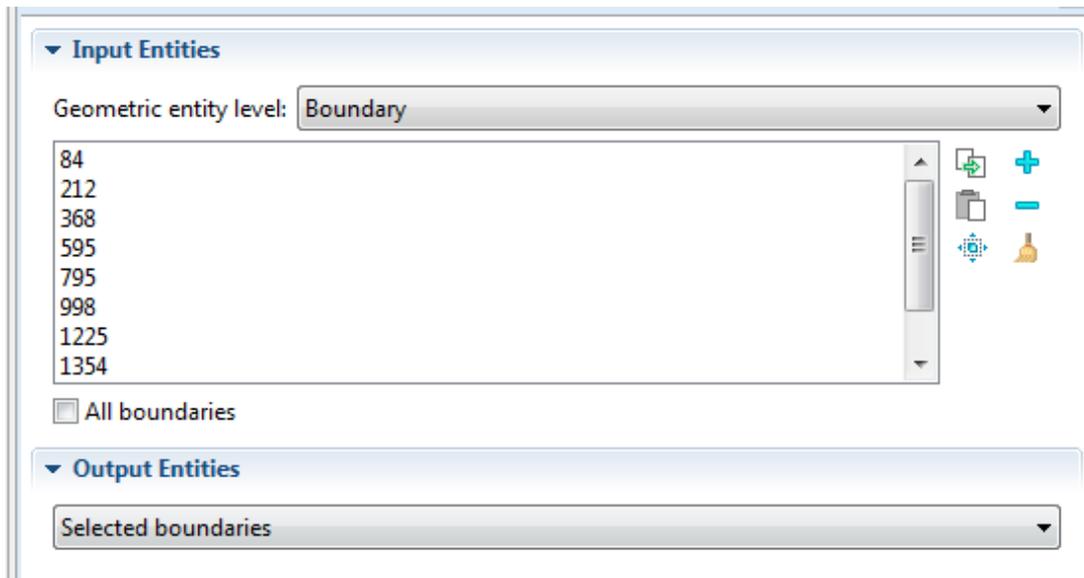


Ilustración 90. Superficie entrada aceite 1

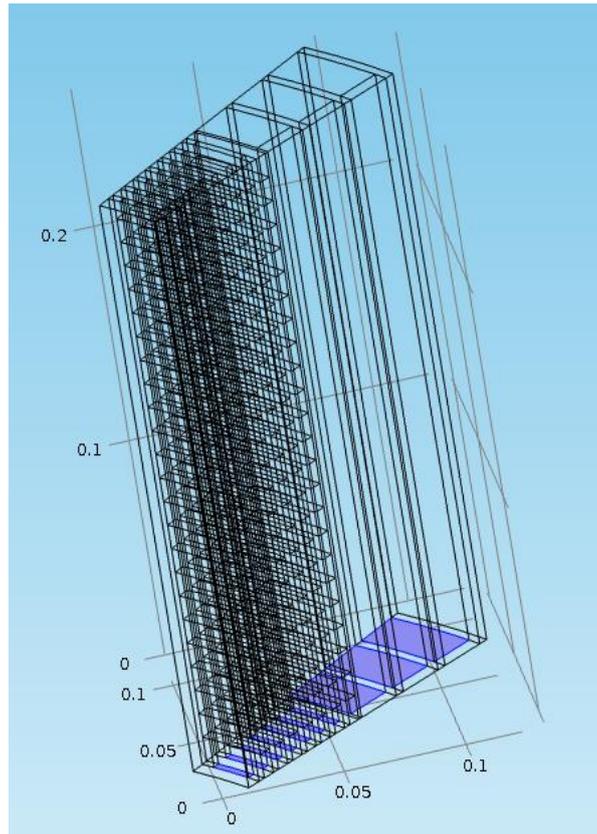


Ilustración 91. Superficie entrada aceite 2

- Área salida aceite:

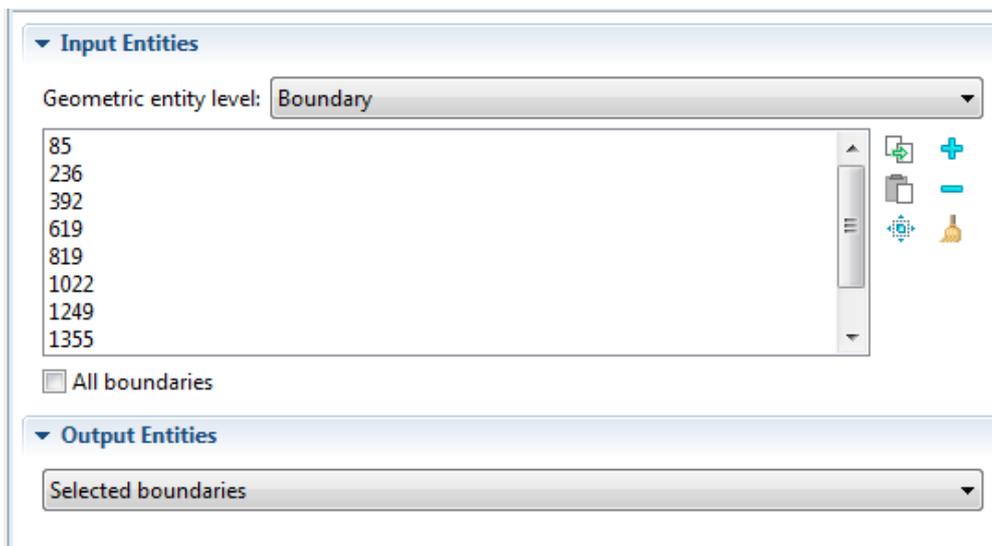


Ilustración 92. Superficie salida aceite 1

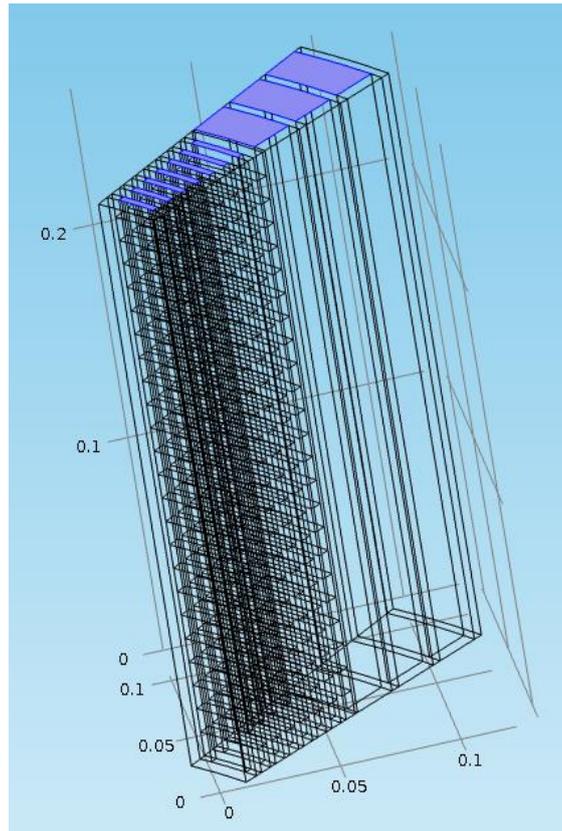


Ilustración 93. Superficie salida aceite 2

- Área inferior geometría:

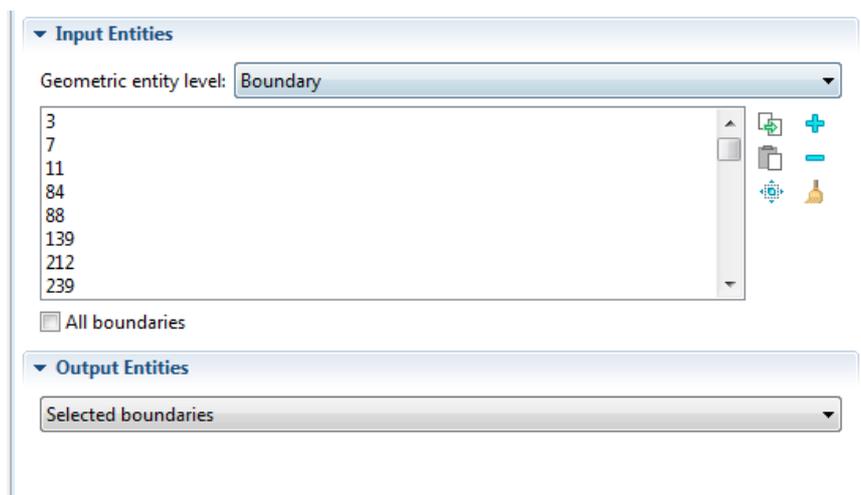


Ilustración 94. Área inferior 1

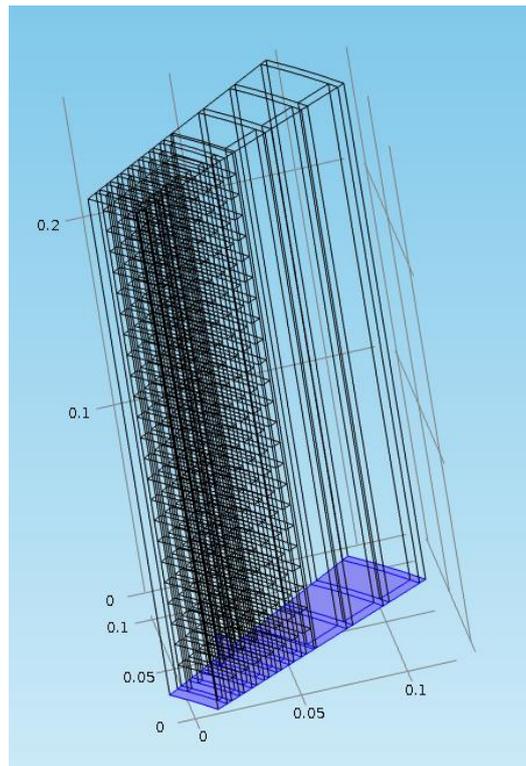


Ilustración 95. Área inferior 2

- Área superior geometría:

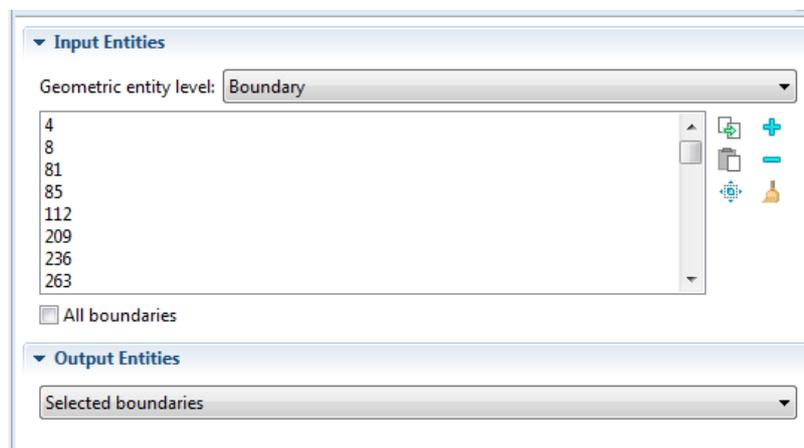


Ilustración 96. Área superior 1

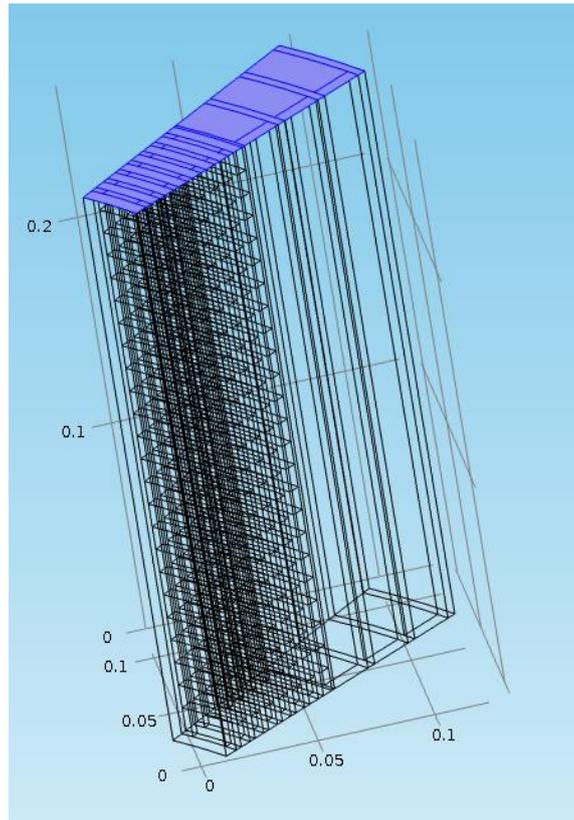


Ilustración 97. Área superior 2

- Contorno encintado de cobre:

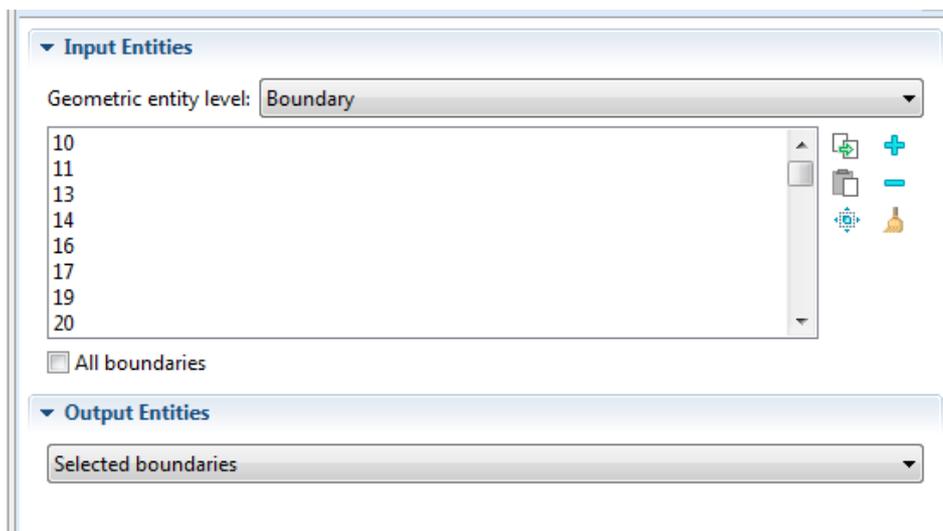


Ilustración 98. Dominio cobre 1

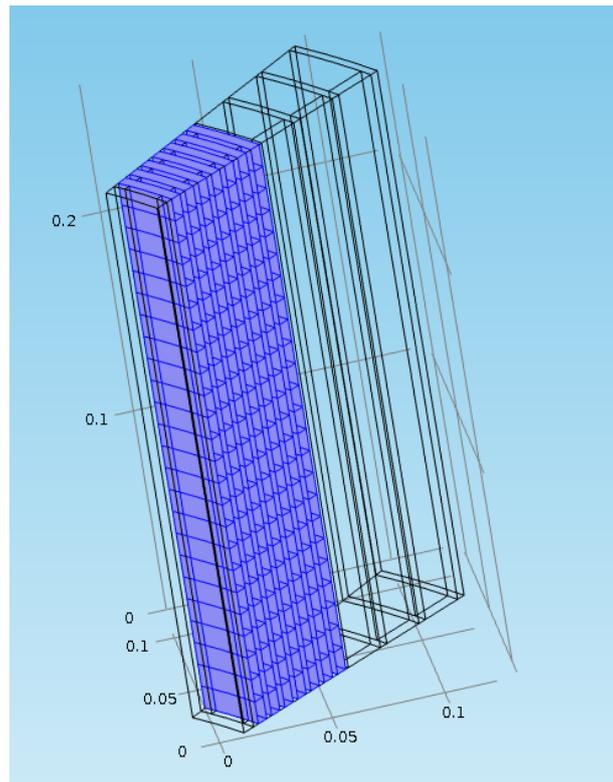


Ilustración 99. Dominio cobre 2

- Plano simetría sólido:

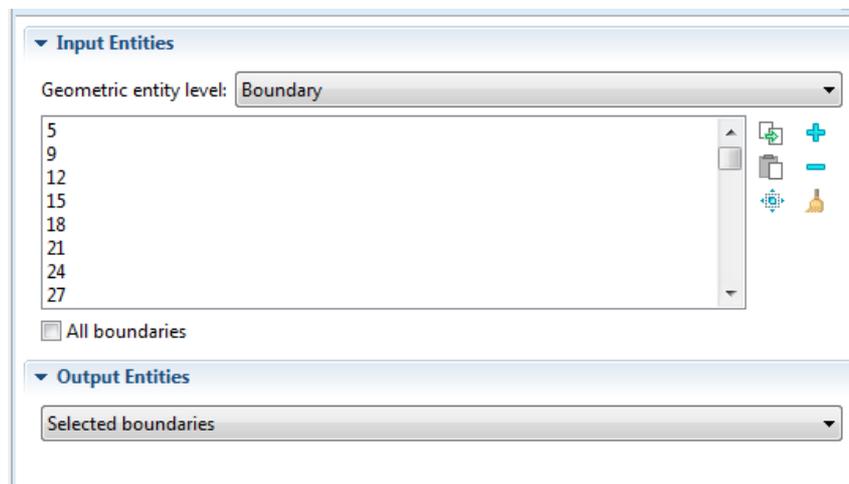


Ilustración 100. Plano simetría 1

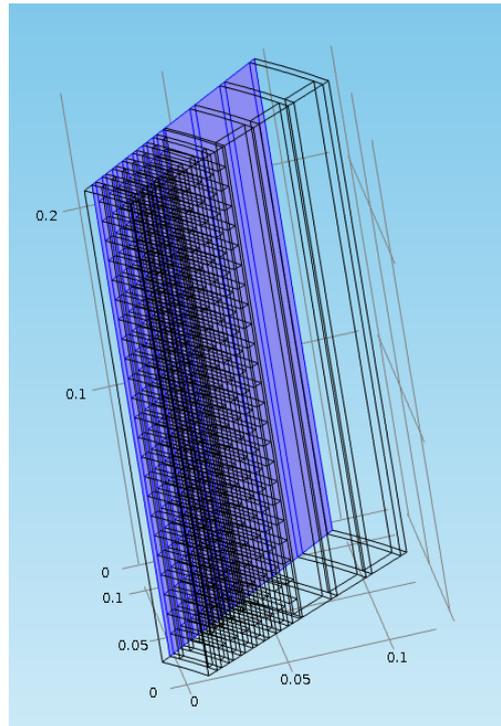


Ilustración 101. Plano simetría 2

- Aceite canales finos:

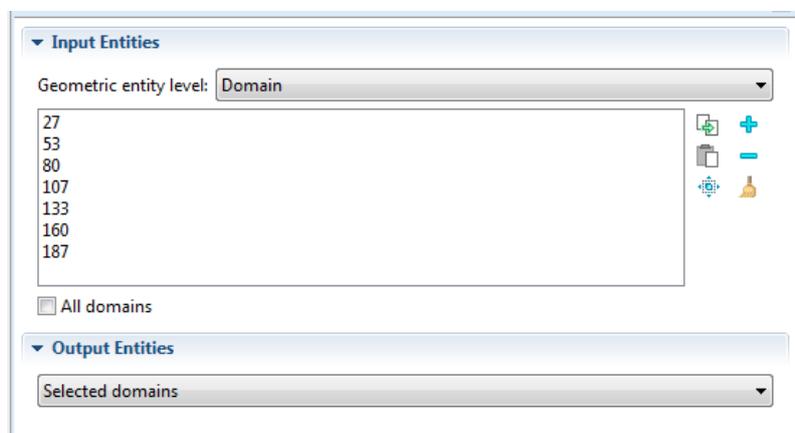


Ilustración 102. Dominio canales finos 1

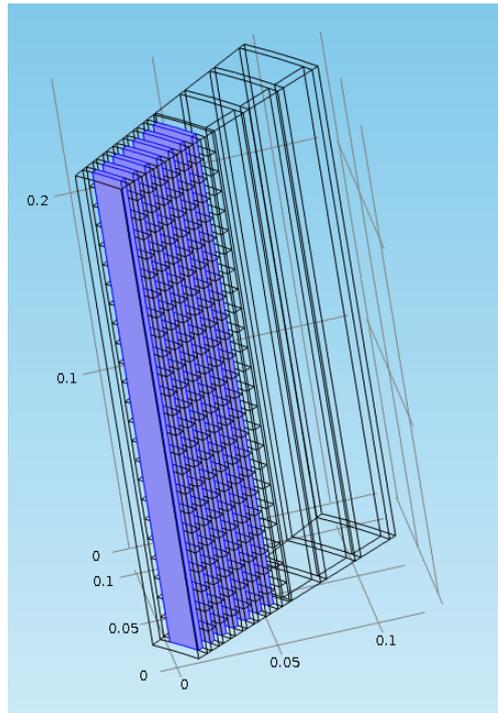


Ilustración 103. Dominio Canales finos 2

- Aceite canales gruesos:

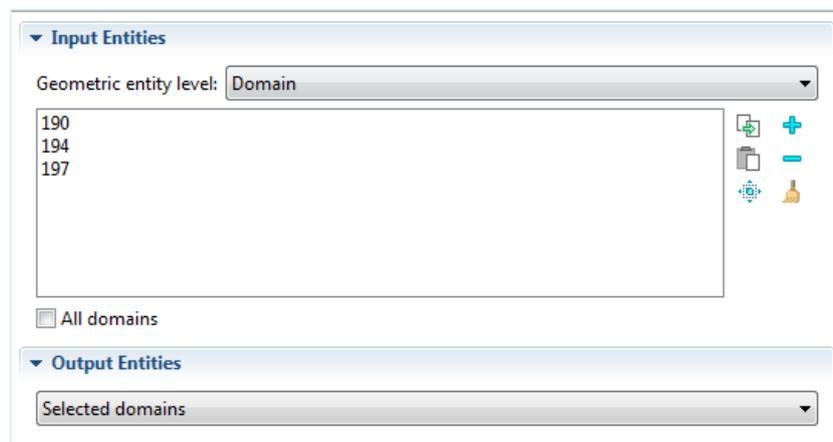


Ilustración 104. Dominio canales gruesos 1

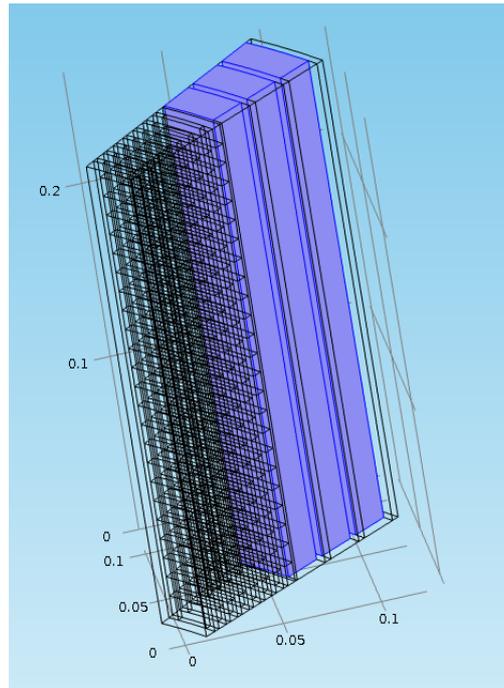


Ilustración 105. Dominio canales gruesos 2

- Plano simetría fluido:

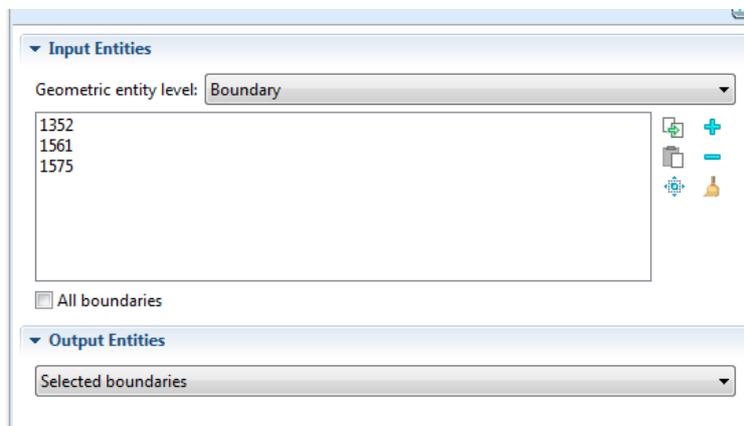


Ilustración 106. Simetría fluido 1

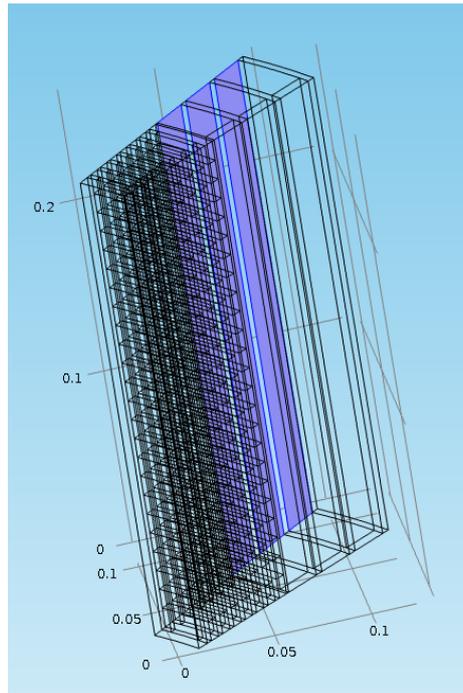


Ilustración 107. Simetría fluido 2

- Superficies de transferencia de calor:

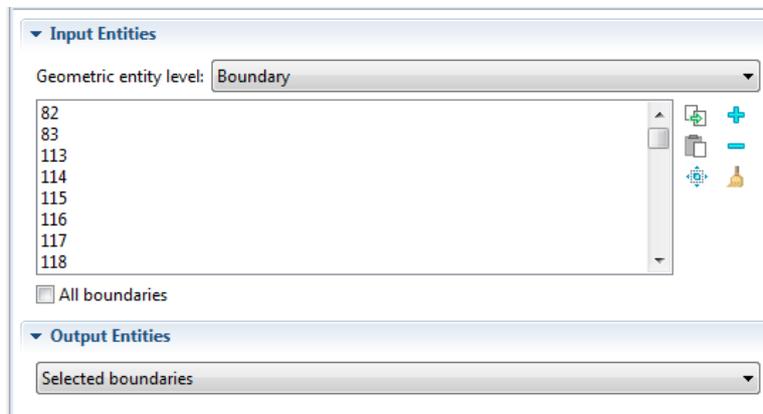


Ilustración 108. Superficies transferencia calor 1

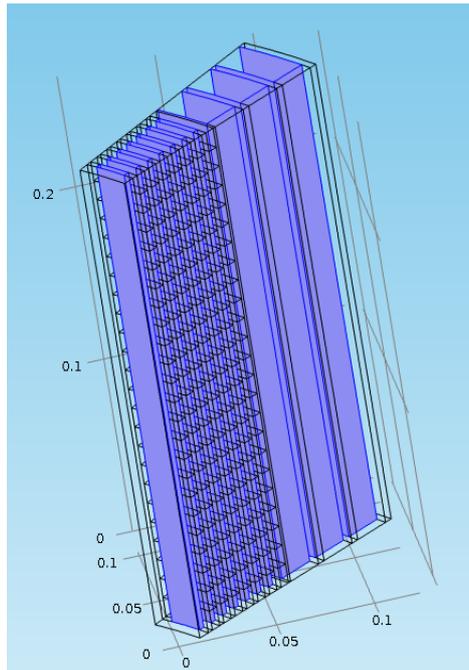


Ilustración 109. Superficies transferencia calor 2

- Sólido:

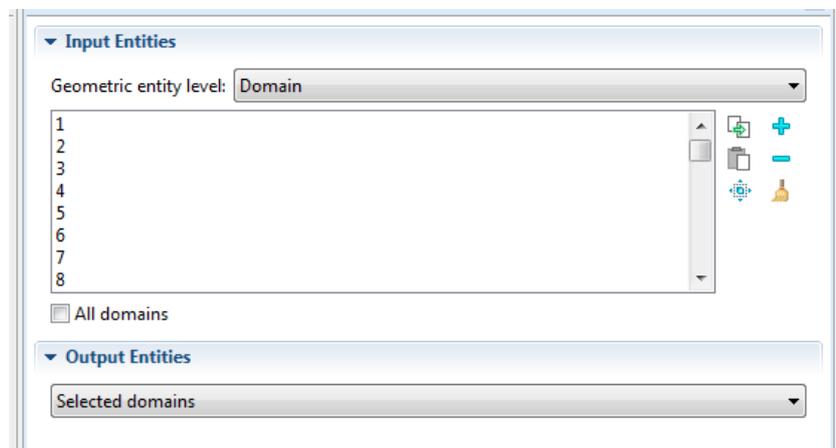


Ilustración 110. Dominio sólido 1

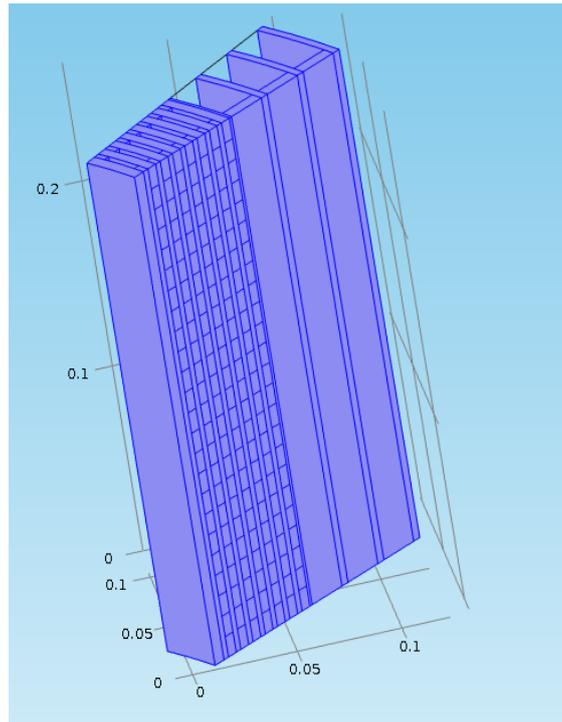


Ilustración 111. Dominio sólido 2

- Superficies de transferencia de calor canales finos:

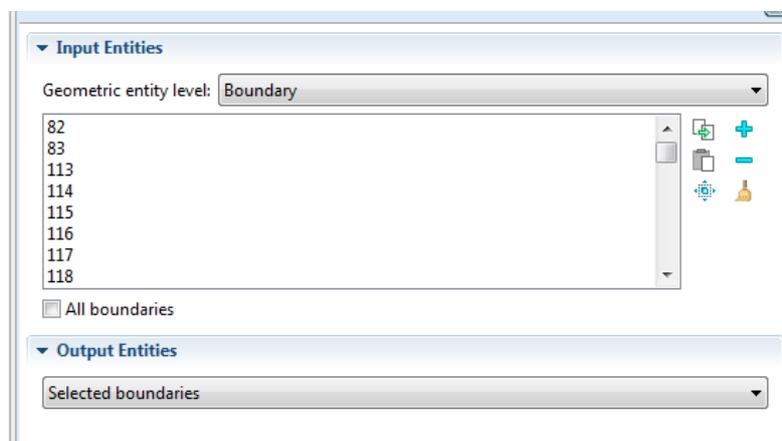


Ilustración 112. Transferencia calor canales finos 1

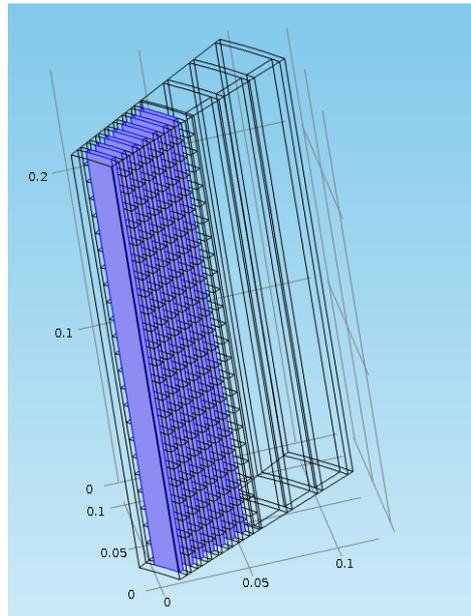


Ilustración 113. Transferencia calor canales finos 2

Una vez segregadas y definidas las diferentes partes de la geometría, lo cual simplificará el trabajo a la hora de construir mallados, el desglose de materiales queda corregido.

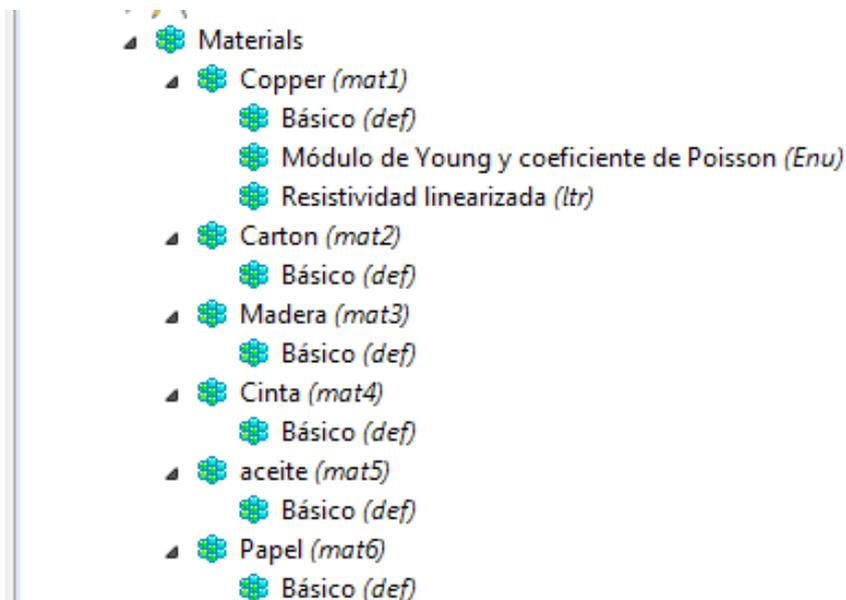


Ilustración 114. Definición de materiales

3.3. Condiciones de contorno

El siguiente paso es definir las condiciones de contorno, como son los valores iniciales, transferencia de calor en sólidos, aislamientos... en el apartado de transferencia de calor conjugada:

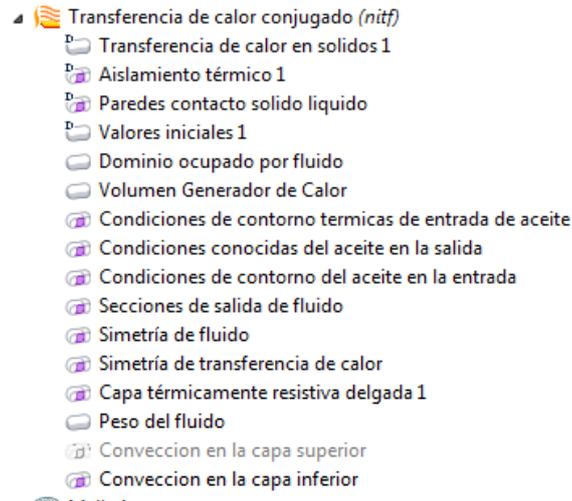


Ilustración 115. Condiciones de contorno Conjugate Heat Transfer

3.4. Mallado

A continuación se realiza el mallado de los diversos volúmenes y superficies. En el modelo de origen, la elección tomada es la mostrada en el siguiente árbol:

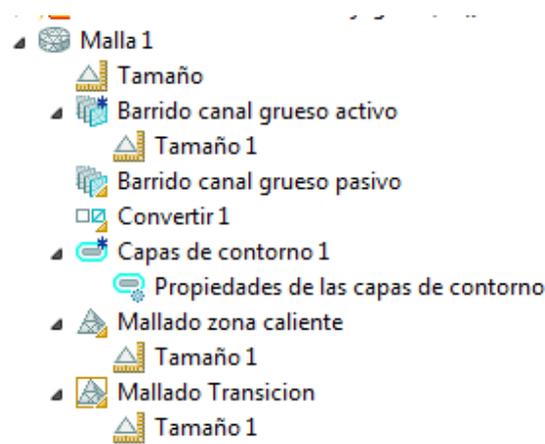


Ilustración 116. Distribución de mallas en el modelo original

- Canal grueso activo

Este mallado comprende los dominios de canal 8, palito de madera y cartón separador de los canales 8 y 9. El mallado seleccionado para estos dominios es de barrido con hexaedros de tamaño 'Extra fino'.

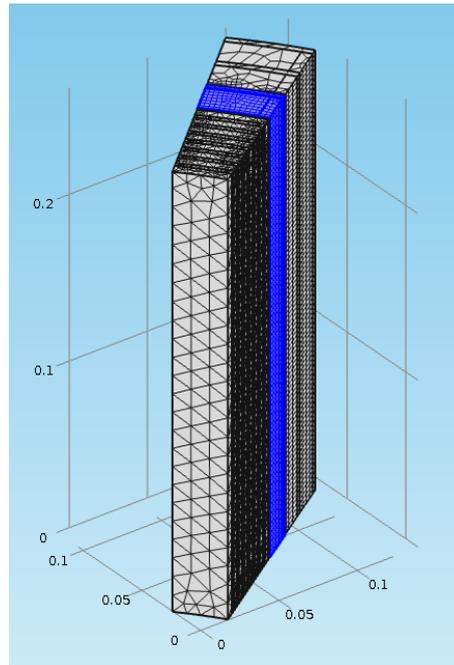


Ilustración 117. Barrido Canal grueso activo modelo original

- Canal grueso pasivo

Esta malla recoge los dominios de los canales 9 y 10, cartones espaciadores y palitos de madera. Al igual que el mallado anterior, se emplea la técnica de mallado por barrido con hexaedros, en este caso el tamaño elegido es normal, ya que el análisis de los sucesos que acontecen en estos dominios no presenta tanto interés como el que suscitan los dominios más próximos a la zona caliente.

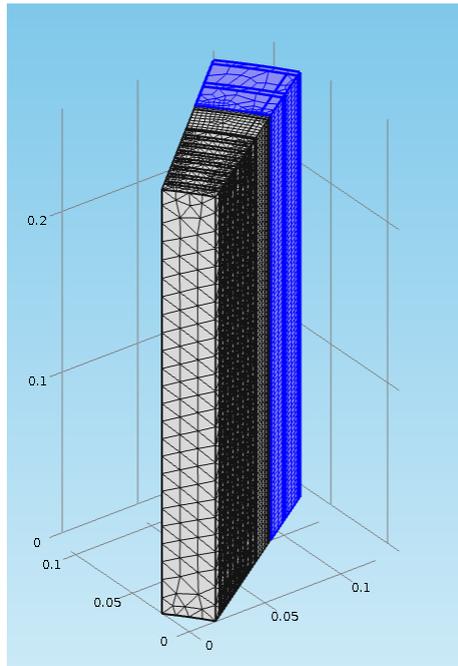


Ilustración 118. Barrido canal grueso pasivo modelo original

- Convert

Algunas geometrías tienen dominios en los que resulta muy adecuado la utilización de mallas barridas, como ocurre en el presente modelo, en el que se ha empleado esta técnica como se acaba de describir en los párrafos anteriores. Si hay dominios en los alrededores que no pueden ser barridos, se pueden convertir las caras entre estos dominios en malla de forma cuadrangular. De esta manera conseguimos enlazar perfectamente la zona mallada con hexaedros, con la malla contigua, en este caso tetraedros libres.

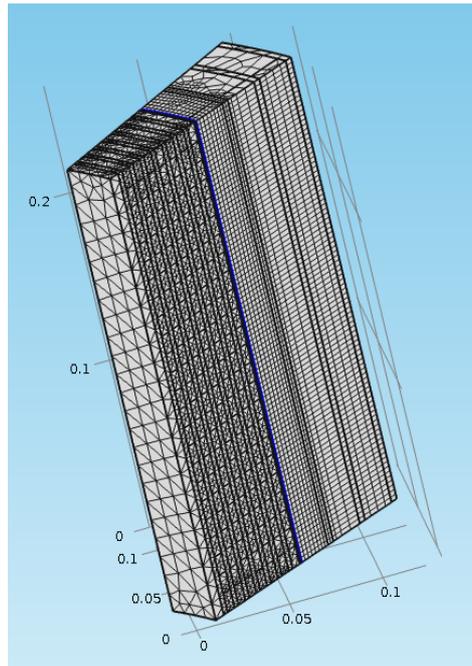


Ilustración 119. Conversión modelo original

- Canales finos

Estos dominios son lo que más interés presentan en el estudio, ya que en ellos se produce la mayor cantidad de transferencia de calor, por localizarse en la zona caliente del transformador, donde se encuentra el bobinado. El aceite que circula por estos canales es el responsable de la evacuación del calor generado durante el proceso de transformación. Consecuencia del interés de analizar en mayor detalle estos dominios, se realiza un mallado concéntrico de tetraedros distribuidos en 8 niveles con espesor 0.00019m y un factor de reducción de espesor de 1.

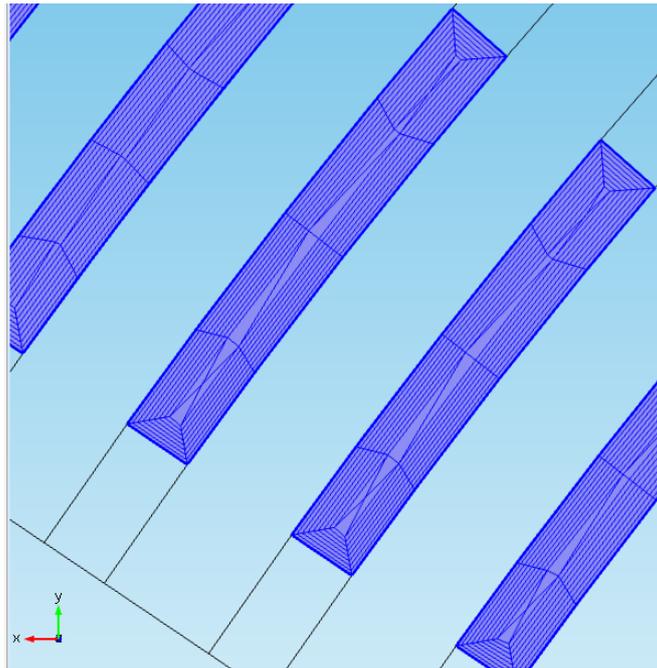


Ilustración 120. Capas concéntricas canales finos modelo original

- Zona caliente

En estos dominios el mallado seleccionado ha sido de tetraedros libres de un tamaño 'Fine' o Fino.

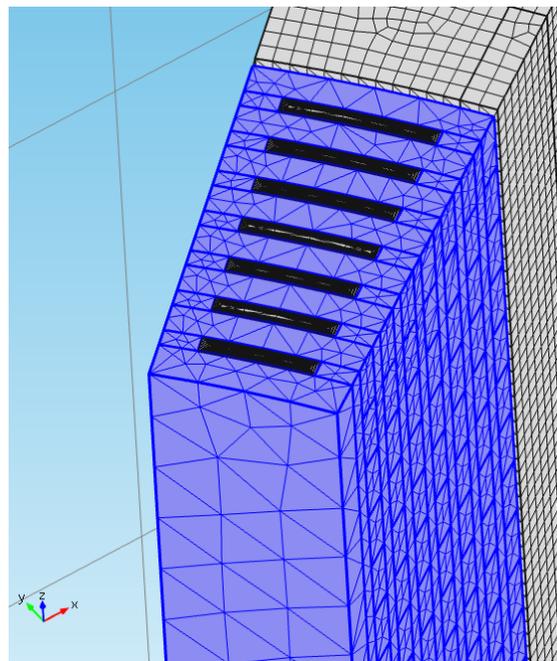


Ilustración 121. Mallado zona caliente modelo original

- Mallado zona de transición

Este mallado está compuesto por el dominio de cinta aislante, que es el elemento constructivo del transformador que separa la zona caliente de los canales gruesos. Se ha elegido una malla de tetraedros 'Extremely Fine'.

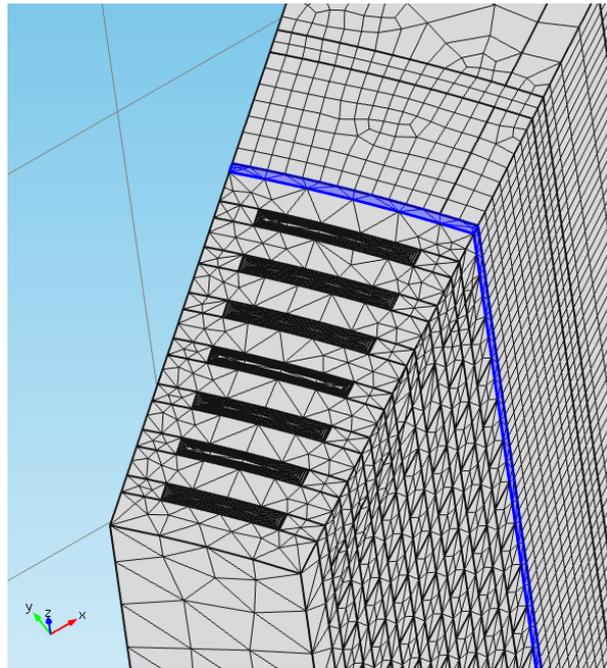


Ilustración 122. Mallado zona de transición modelo original

EL mallado de toda la geometría en conjunto sería el siguiente:

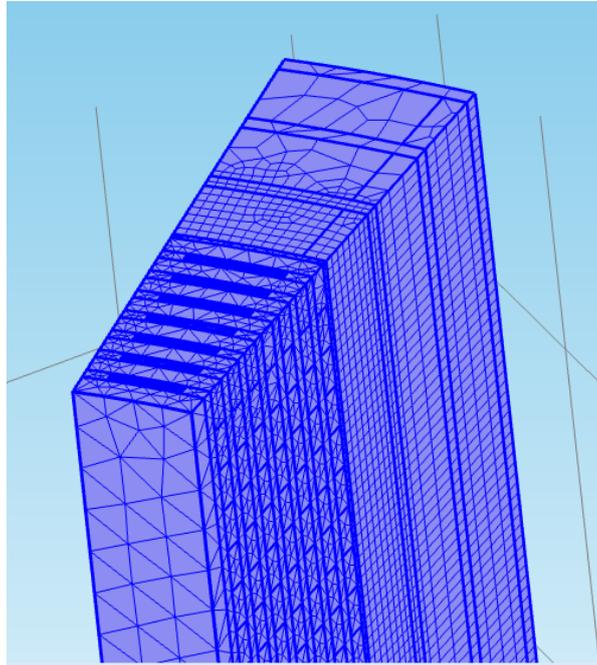


Ilustración 123. Conjunto de mallas, modelo original 1

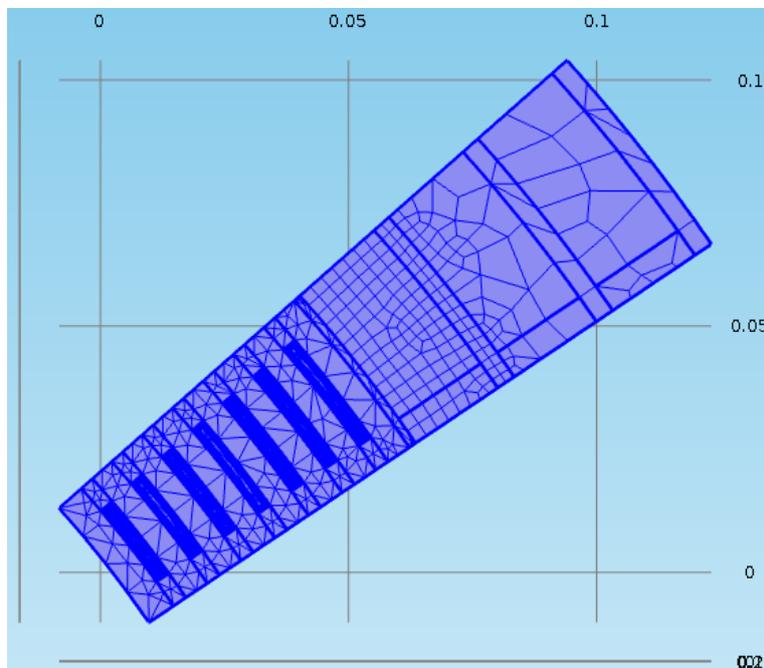


Ilustración 124. Conjunto de mallas, modelo original 2

4. Resultados simulación

La simulación del modelo original consiste en 31 iteraciones hasta alcanzar el error esperado. Consecuencia de la simulación se obtienen los siguientes gráficos de termografía y de distribución de velocidades.

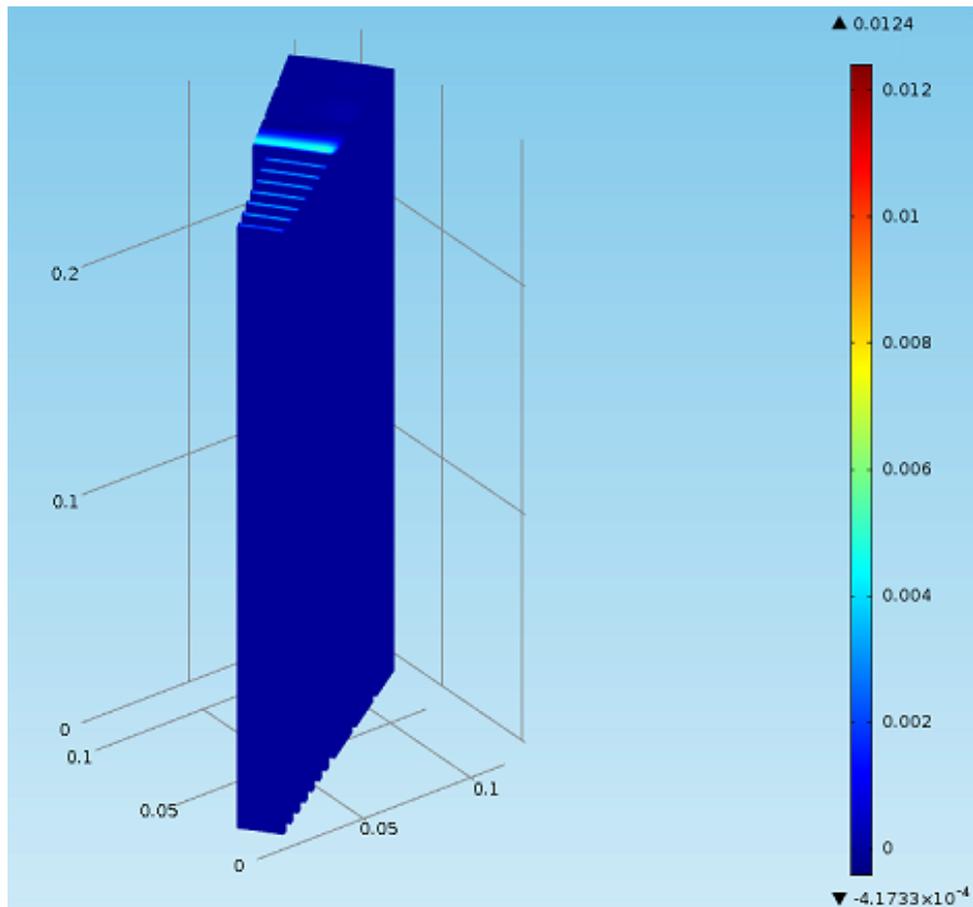


Ilustración 125. Distribución de velocidades, modelo original

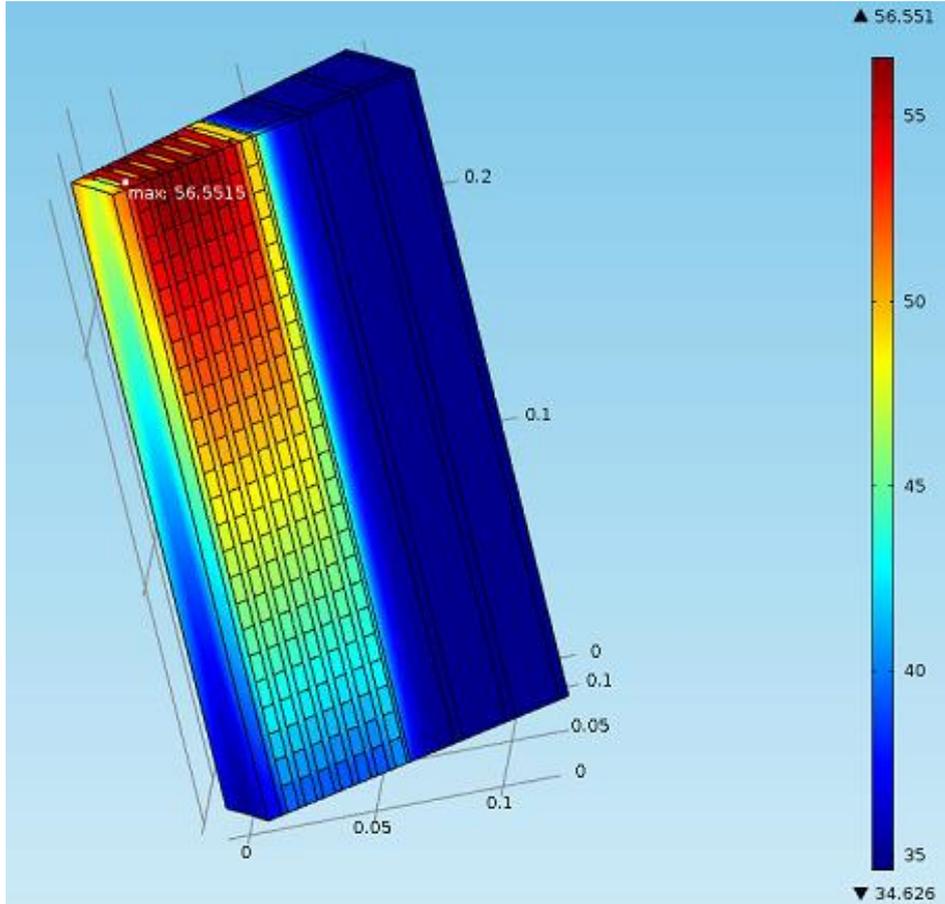


Ilustración 126. Distribución de temperaturas, modelo original

- Curva de convergencia del mallado original

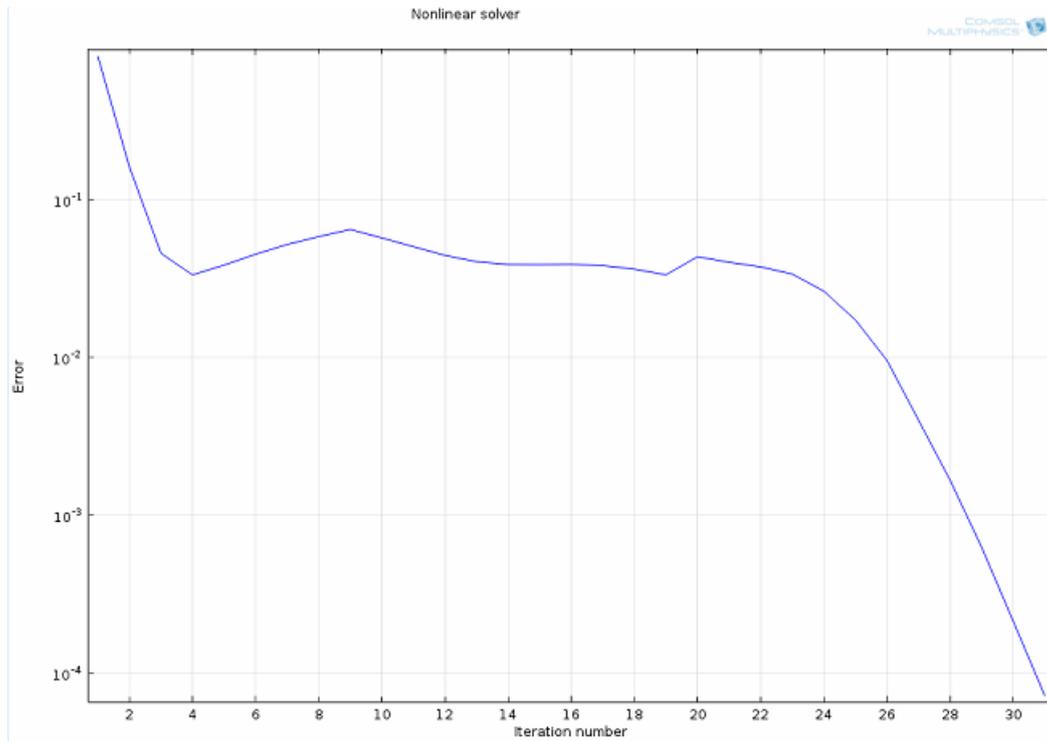


Ilustración 127. Curva de convergencia modelo original

La presente simulación ha requerido de 31 iteraciones para alcanzar el rango de error de valor 10^{-4} .

	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8	Canal 9	Canal 10
Temperatura entrada (K) (Condición contorno)	308,00									
Temperatura media de salida ponderada (K)	322,74	325,94	326,24	326,10	325,91	325,52	323,36	309,40	308,53	308,51
Temperatura máxima de salida (K)	327,85	328,93	329,13	329,06	328,85	328,53	327,44	315,49	308,26	308,03
Temperatura media canal (K)	315,17	317,38	317,44	317,33	317,33	317,13	316,57	308,53	308,01	308,00
Temperatura máxima canal (K)	327,85	328,99	329,13	329,06	328,85	328,53	327,44	315,60	308,26	308,03
Calor específico entrada (J/kgK)	2.009,00									
Calor específico salida (J/kgK)	2.064,57	2.077,04	2.078,21	2.077,65	2.076,93	2.075,39	2.075,98	2.012,52	2.009,12	2.009,04
Calor específico promedio por canal (J/kgK)	2.036,79	2.043,02	2.043,61	2.043,33	2.042,97	2.042,20	2.042,49	2.010,76	2.009,06	2.009,02
Incremento de entalpía por canal (j/kg)	30.022,21	36.651,78	37.275,36	36.984,18	36.589,50	35.779,26	31.372,65	2.815,06	1.064,80	1.024,60
Velocidad de entrada (m/s)	0,00320	0,00447	0,00453	0,00457	0,00446	0,00443	0,00415	0,00403	0,00012	0,00004
Velocidad de entrada (mm/s)	3,20	4,47	4,53	4,57	4,46	4,43	4,15	4,03	0,12	0,04
Velocidad promedio canal (m/s)	0,00328	0,00457	0,00463	0,00461	0,00457	0,00454	0,00425	0,00404	0,00012	0,00004
Velocidad promedio canal (mm/s)	3,28	4,57	4,63	4,61	4,57	4,54	4,25	4,04	0,12	0,04
Superficie de entrada canal (m2)	0,0000552700	0,0000584600	0,0000617100	0,0000649200	0,0000681400	0,0000713600	0,0000745000	0,0006649000	0,0007277000	0,0007904000
superficie entrada canal (mm2)	55,27	58,46	61,71	64,92	68,14	71,36	74,50	664,90	727,70	790,40

Caudal (m3/s)	0,0000001769	0,0000002613	0,0000002795	0,0000002967	0,0000003039	0,0000003161	0,0000003092	0,0000026795	0,0000000873	0,0000000316
Caudal (mm3/s)	176,86	261,32	279,55	296,68	303,90	316,12	309,18	2.679,55	87,32	31,62
Densidad aceite en la entrada (kg/m3)	848,69									
Caudal másico aceite (kg/s)	0,000150	0,000222	0,000237	0,000252	0,000258	0,000268	0,000262	0,002274	0,000074	0,000027
Caudal másico aceite (g/s)	0,150	0,222	0,237	0,252	0,258	0,268	0,262	2,274	0,074	0,027
Calor transferido por canal (w)	4,51	8,13	8,84	9,31	9,44	9,60	8,23	6,40	0,08	0,03
Conductividad térmica(k)	0,127570	0,127190	0,127160	0,127000						
Superficie intercambio canal (m2)	0,0113175000	0,0118825000	0,0124500000	0,0130175000	0,0135825000	0,0141500000	0,0147175000	0,0228400000	0,0244975000	0,0261500000
Hc por canal W/(°Km2)	55,07	47,24	48,03	48,47	47,46	47,05	43,49	186,86	161,06	-
Calor transferido total (w)	64,57									
Temperatura salida media K	320,23									
Temperatura entrada media K	308,00									
Superficie intercambio total (m2)	0,16									
Hc total W/(°Km2)	54,25									
Temperaturas salida canal (K)	322,24	325,44	325,74	325,60	325,41	325,02	322,86	308,90	308,03	308,01

Temperatura pared intercambio canal (K)	315,23	322,48	322,79	322,76	322,64	322,42	320,86	309,50	308,02	308,00
Calor efecto Joule bobinado (W)	251,57									
Entalpia entrada comsol (J/kg)	607.248,00									
Entalpia salida comsol (J/kg)	636.283,00	642.897,00	643.521,00	643.225,00	642.841,00	642.022,00	637.555,00	609.068,00	607.312,00	607.271,00
Incremento de entalpia (j/kg)	29.035,00	35.649,00	36.273,00	35.977,00	35.593,00	34.774,00	30.307,00	1.820,00	64,00	23,00
Calor absorbido por el fluido (W)	4,36	7,91	8,61	9,06	9,18	9,33	7,95	4,14	0,00	0,00
Suma de calor en todos los canales. (W)	60,53									
Calor evacuado por convección en la base (W)	191,04									
Superficie intercambio	0,002619	m2								
	72.941,97	W/m2								

Capítulo VI. Planteamiento de los modelos de simulación

VI. PLANTEAMIENTO DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN

En el presente capítulo se definirán y describirán los diferentes modelos de simulación llevados a cabo, y se justificará su elección como modelo a emplear en la comparativa de mallados.

1. Mallado 1 del modelo original

El mallado que se muestra a continuación se ha obtenido como resultado de diferentes pruebas de variación del tamaño de malla. Este modelo de simulación no se va a emplear en la comparativa de mallados por tratarse de un mallado grotesco y poco fino, con resultados que difieren del modelo original en mayor medida que los otros modelos estudiados. Esta disparidad se debe principalmente al tamaño de malla, que es mucho mayor que el original, ya que el proceso de mallado seguido es el mismo que en el modelo de partida: Barrido-conversión-tetraedros libres-capas concéntricas.

El conjunto de la malla se compone de 139796 elementos, lo que conlleva un tiempo de ejecución/simulación de 12 minutos y 44 segundos. La simulación se detiene al alcanzar un error del rango de 10^{-4} en la iteración 30.

- Barrido canal Grueso activo

En el presente mallado, el tamaño empleado para el barrido del canal grueso activo es 'Finer', y en él se han personalizado el tamaño máximo de elemento (0.004 m) y el Ratio de crecimiento máximo de elementos que se ha programado es 1.1.

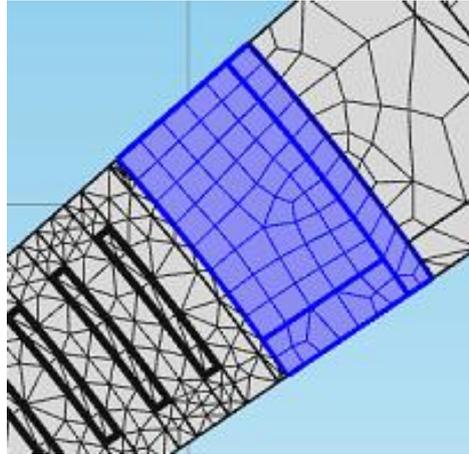


Ilustración 128. Barrido canal grueso activo - Mallado 1

- Barrido canal grueso pasivo

Para estos dominios, debido a la poca representatividad de los resultados de estos canales como se ha dicho anteriormente, se ha mallado en tamaño 'Normal', obteniéndose la siguiente malla.

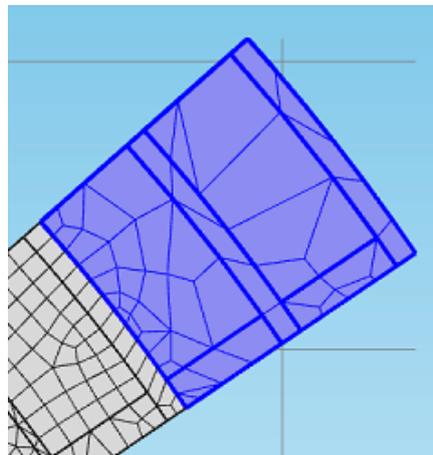


Ilustración 129. Barrido Canal grueso pasivo - Mallado 1

- Canales finos

Los dominios constituyentes de los c7 canales finos han sido mallados mediante 8 capas concéntricas de 0.0007m de espesor, con un factor de estrechamiento de 1.1. Con estos valores lo que conseguimos es obtener más puntos de estudio de mallado

en las zonas próximas a las paredes de contacto sólido-líquido, en las que se produce la transferencia de calor. El resultado fue el siguiente:

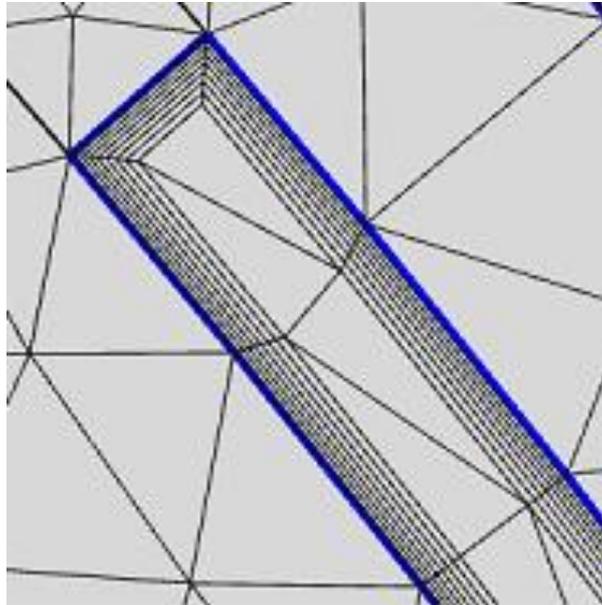


Ilustración 130. Canales finos - Mallado 1

- Mallado zona caliente

Estos dominios son mallados con tetraedros libres de tamaño 'Fine', en los que se ha personalizado el tamaño máximo de elemento en 0.01m, mínimo tamaño de elemento 9.5mm y ratio de crecimiento 1.4.

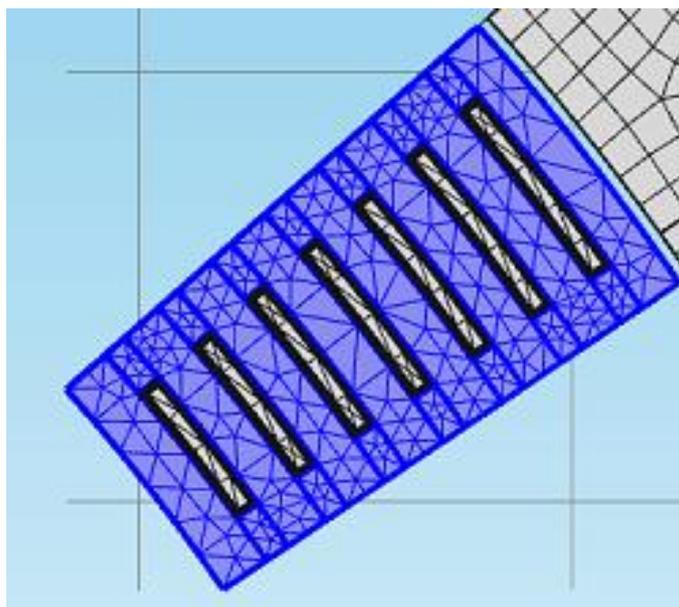


Ilustración 131. Zona caliente - Mallado 1

- Mallado zona de transición

Es necesario usar tetraedros libres 'Extremely Fine' personalizado con un tamaño máximo de elemento de 0.001m, mínimo 2.11E-6m y un ratio de crecimiento de 1.8. Se dice que es necesario tetraedros tan pequeños debido al espesor del elemento a mallar, que limita el tamaño del elemento de malla.

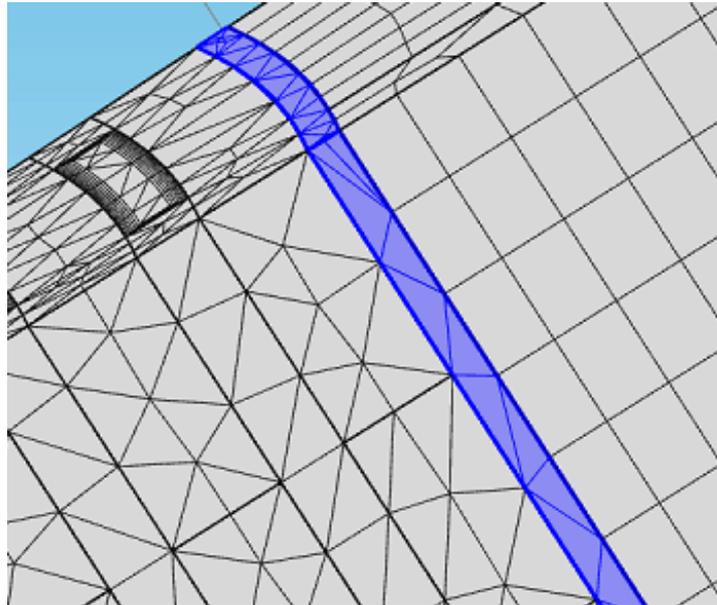


Ilustración 132. Zona de transición - Mallado 1

- Conjunto mallas modelo 1

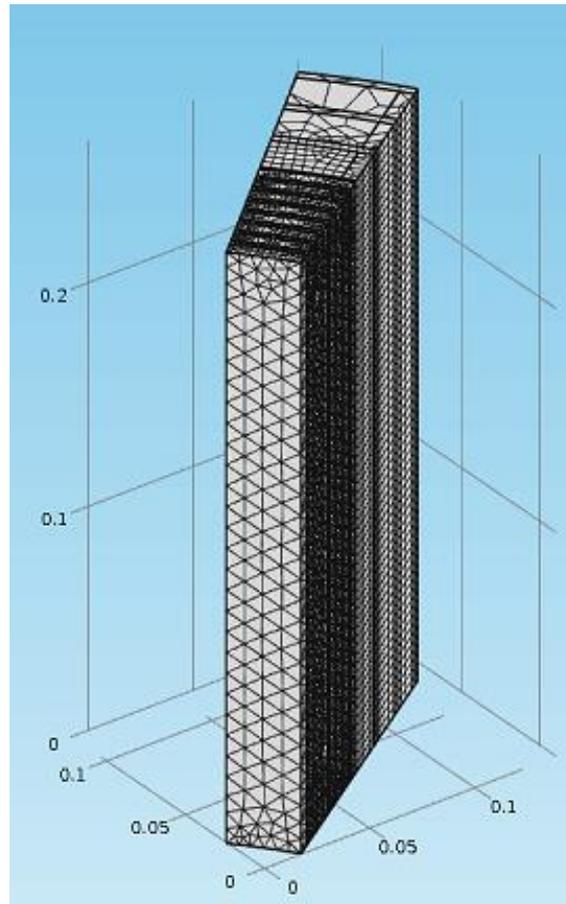


Ilustración 133. Conjunto mallado 1 a

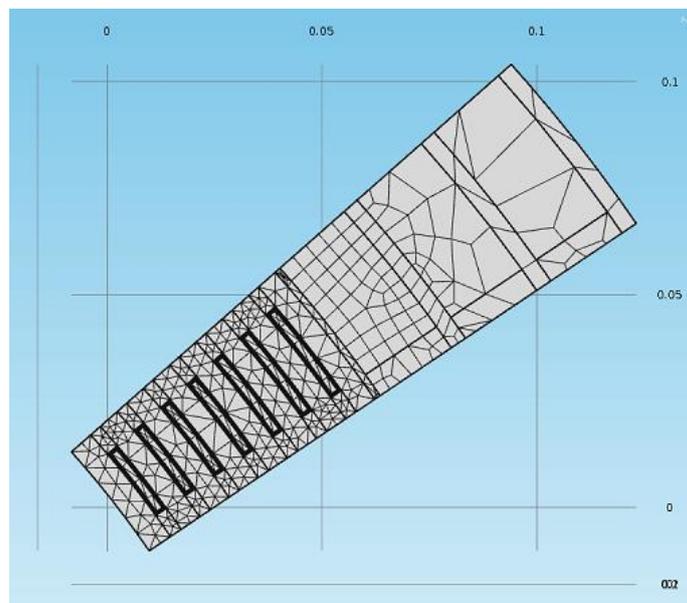


Ilustración 134. Conjunto mallado 1 b

- Distribución de temperaturas (°C)

Se obtiene una temperatura máxima de 56.4490.

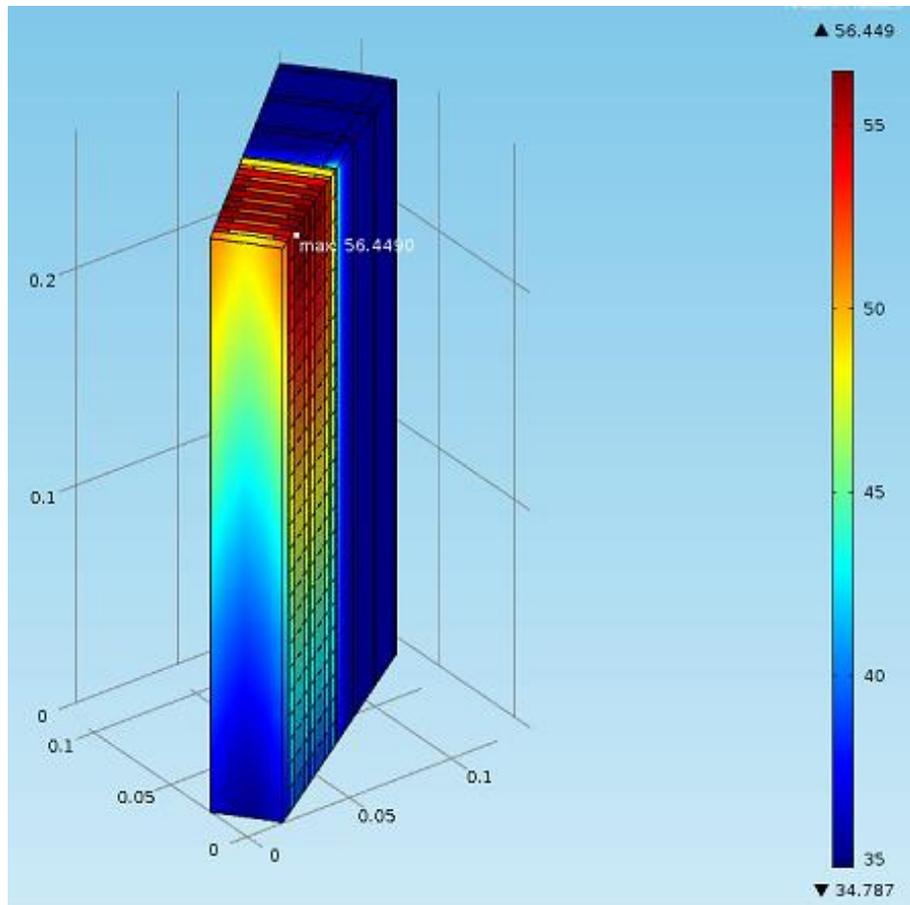


Ilustración 135. Distribución de temperaturas - Mallado 1

- Distribución de velocidades (m/s)

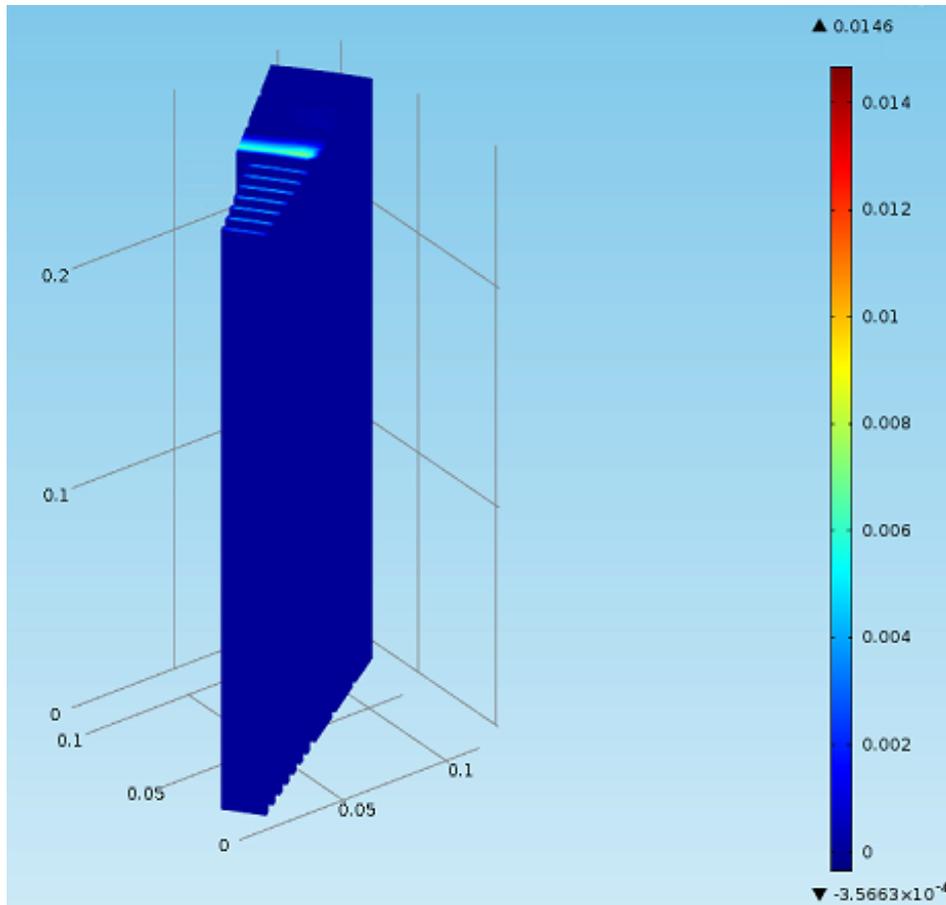


Ilustración 136. Distribución velocidades - Mallado 1

2. Mallado 2 del modelo original

El presente mallado formará parte del estudio comparativo de mallados, por presentar interesantes resultados.

Para su constitución se ha seguido el mismo procedimiento de mallado que en el modelo original, con la única variación del tamaño.

El presente mallado consta de un total de 146795 elementos y alcanza en rango de error de $10E-4$ en la iteración 31.

- Barrido canal grueso activo

Se emplea la técnica de barrido con hexaedros, del mismo tamaño de malla que en el mallado 1, 'Finer', pero con distintos parámetros de personalización. Tamaño máximo de elemento 0.004m, 4.9E-4m de tamaño mínimo y un ratio de crecimiento de 1.

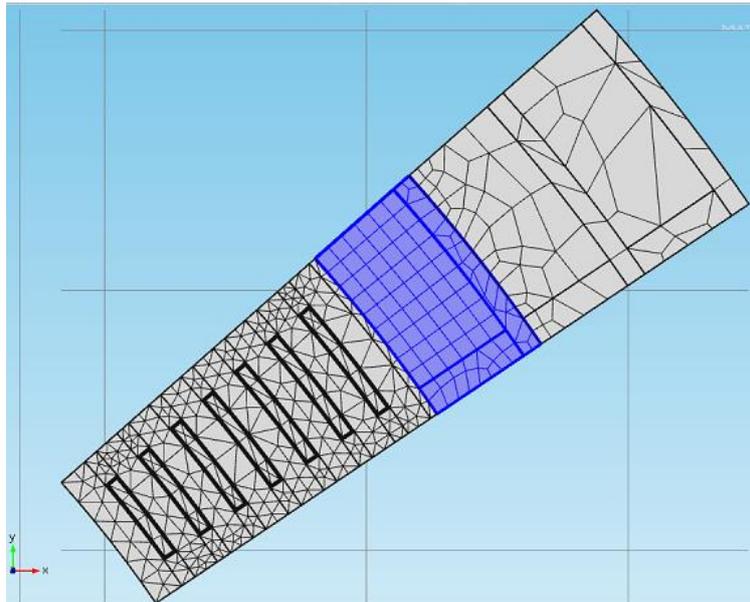


Ilustración 137. Canal grueso activo - Mallado 2

- Barrido canal grueso pasivo

Tetraedros libres de tamaño normal.

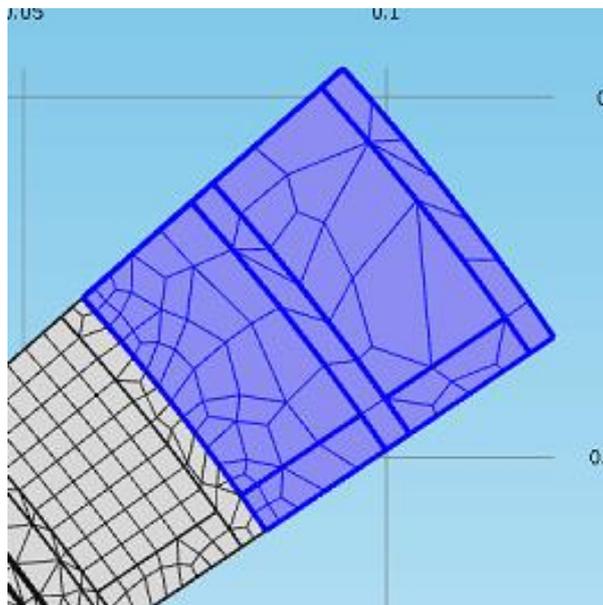
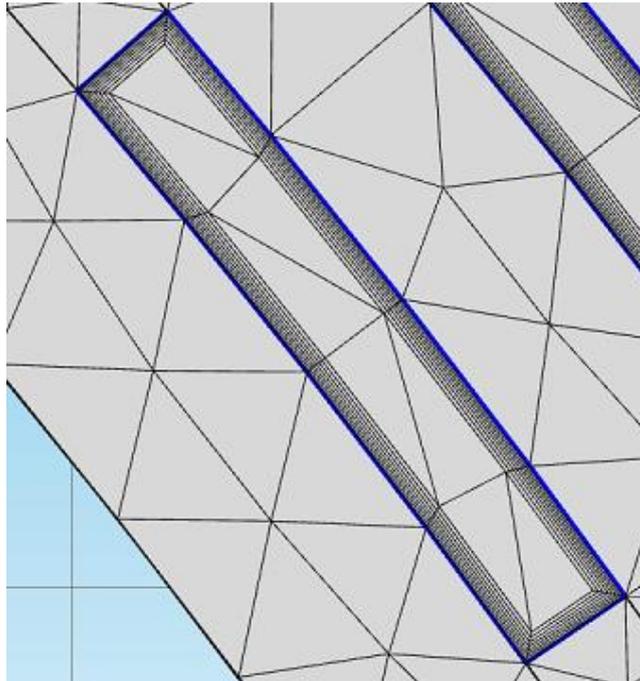


Ilustración 138. Canal grueso pasivo - Mallado 2

- Canales finos

El mallado de los dominios de canales finos de este segundo modelo de simulación se ha realizado con 8 capas de tetraedros concéntricos con un espesor de 0.00005m, distribuidas con un factor de estrechamiento de 1.1. El resultado es el siguiente:



- Mallado zona caliente

Llevado a cabo con tetraedros libre 'Fine' de características predefinidas, tales son: Tamaño máximo elemento 0.0211m, tamaño mínimo 0.00264m y un ratio de crecimiento de 1.45.

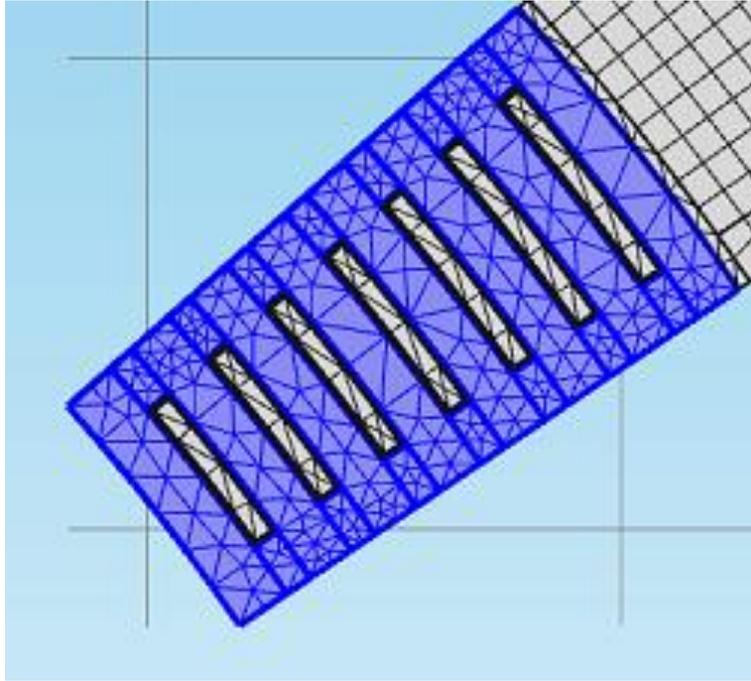


Ilustración 140. Zona caliente - Mallado 2

- Mallado zona de transición

En este caso, a diferencia del mallado 1, se emplean tetraedros libres de tamaño 'Extra Fine' predefinidos.

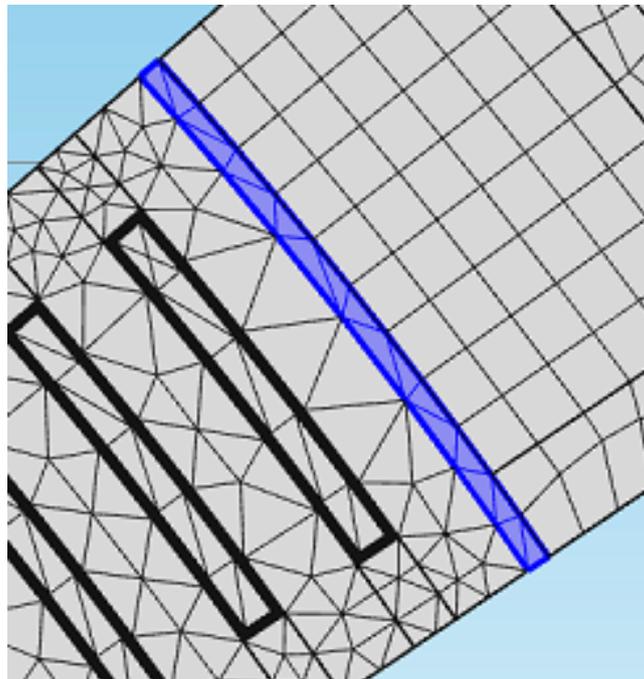


Ilustración 141. Zona transición - Mallado 2

- Conjunto mallado 2

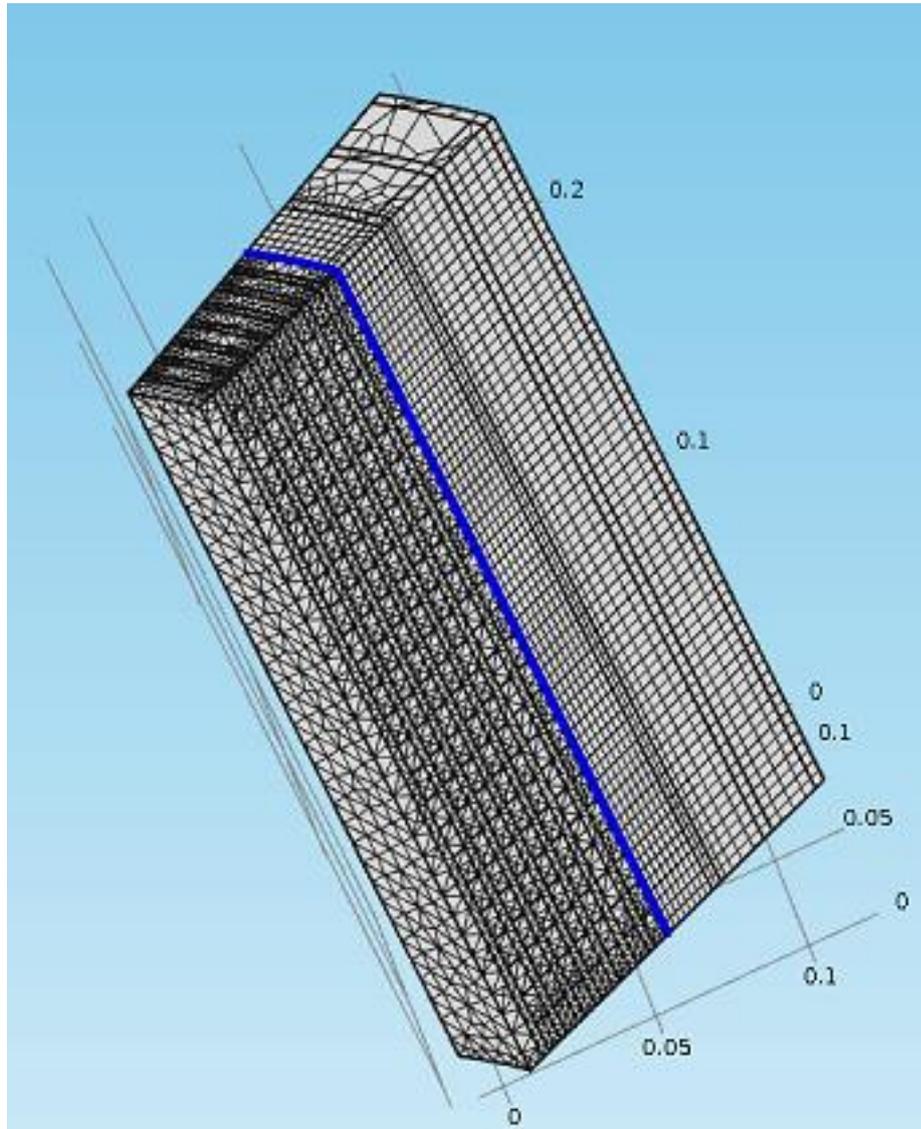


Ilustración 142. Conjunto mallado 2

- Distribución de temperaturas (°C)

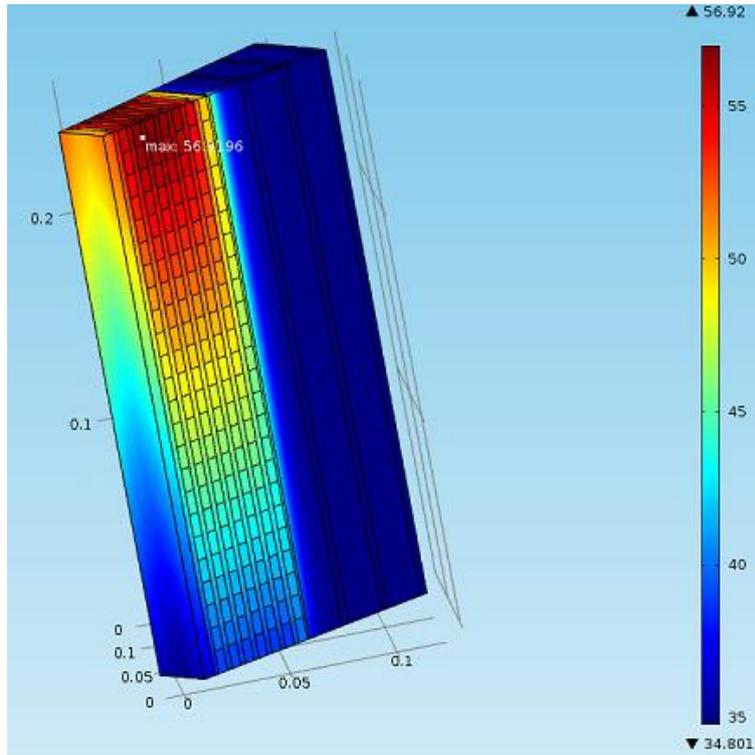


Ilustración 143. Distribución temperaturas mallado 2

- Distribución de velocidades (m/s)

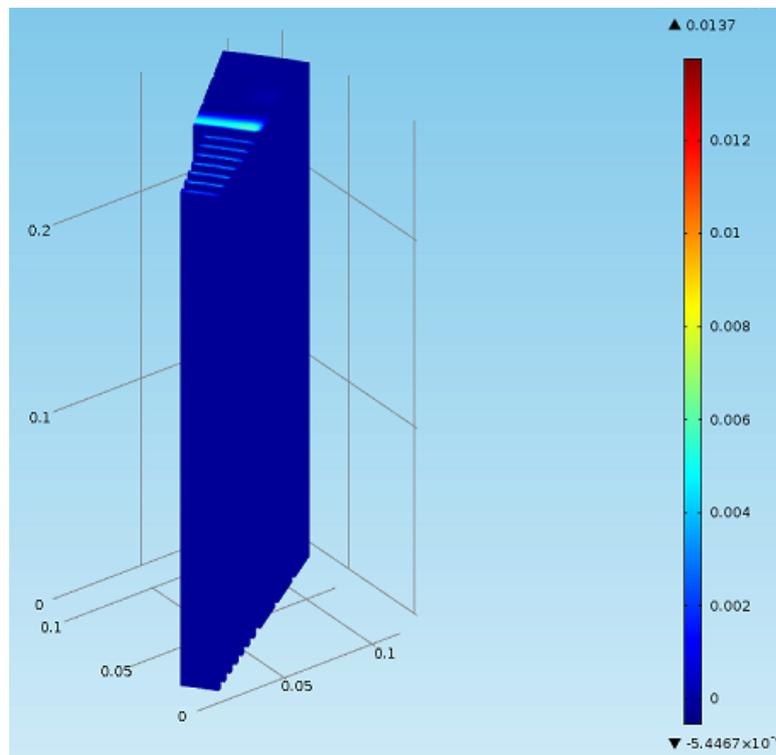


Ilustración 144. Distribución de velocidades mallado 2

- Curva convergencia mallado 2

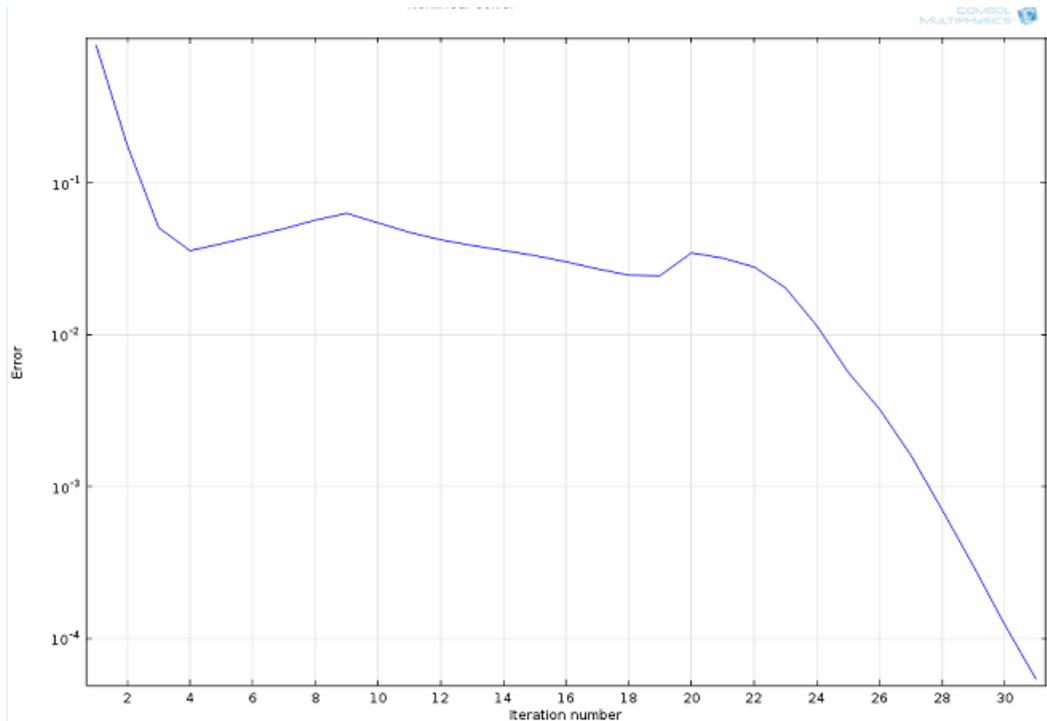


Ilustración 145. Curva convergencia mallado 2

Han sido necesarias 31 iteraciones para alcanzar el rango de error solicitado, 10-4.

- Temperatura máxima de los canales por iteración

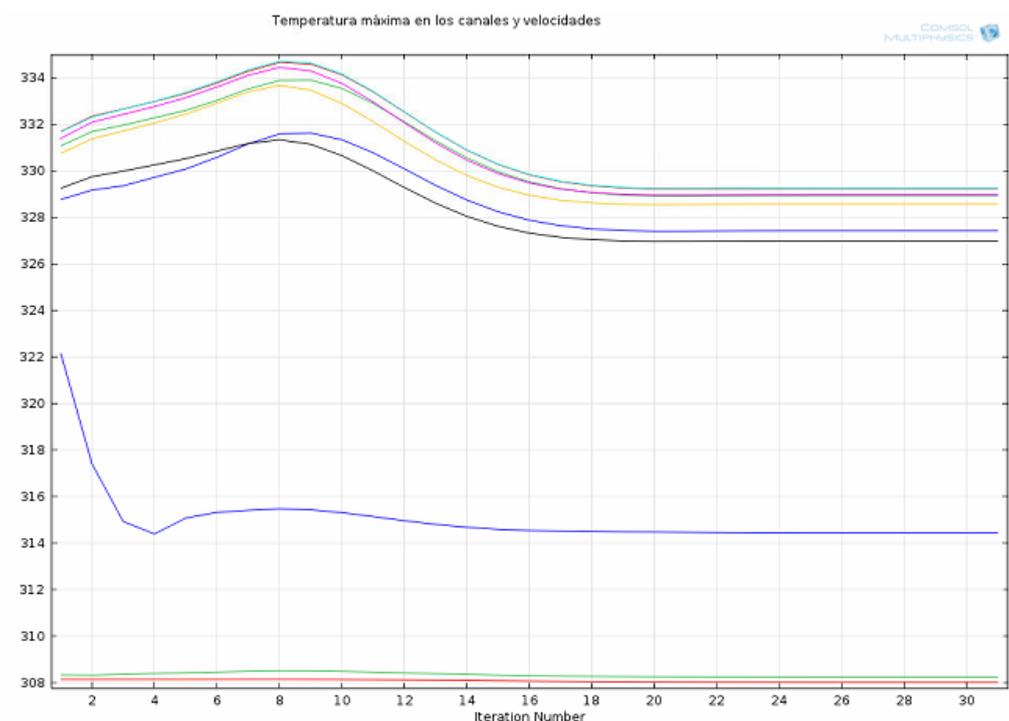


Ilustración 146. Temperatura máxima de los canales por iteración

3. Mallado 3 del modelo original

El tercer modelo de simulación planteado, malla de una forma diferente el modelo original del sector de 7'5º de LVW del transformador en estudio, con respecto a los dos anteriores. El presente emplea tetraedros libres en todos los dominios, lo que nos permite prescindir de la malla de conversión hexaedros-tetraedros.

Este mallado, a pesar de estar compuesto de un conjunto mayor de elementos de malla, (cosa lógica puesto que dos tetraedros conforman un hexaedro), es menos preciso al ser un mallado basto y no seguir un orden al construir la malla.

El conjunto de malla está compuesto por 168614 elementos, con ellos la simulación converge hasta alcanzar un resultado con precisión de 10E-4 en la iteración 27, durante 10 minutos y 17 segundos.

- Mallado canal grueso activo y zona de transición

Tetraedros libres de tamaño 'Extra Fina' de características predefinidas.

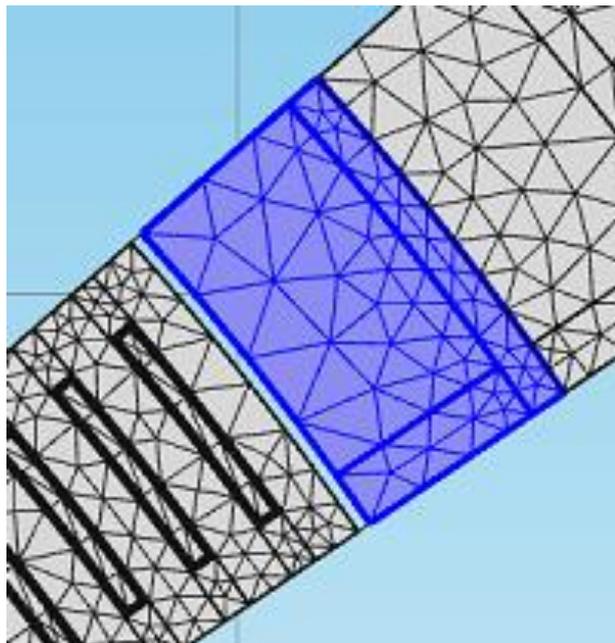


Ilustración 147. Canal grueso activo - Mallado 3

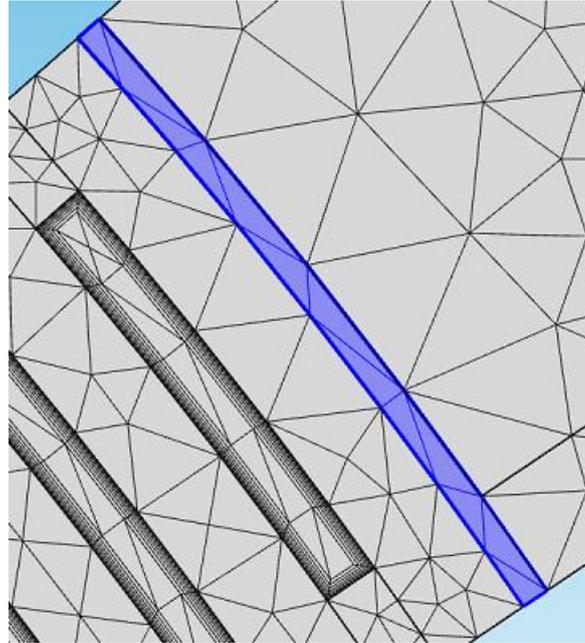


Ilustración 148. Zona de transición - Mallado 3

- Mallado canal grueso pasivo

Tetraedros libres de tamaño 'Fine' de características predefinidas.

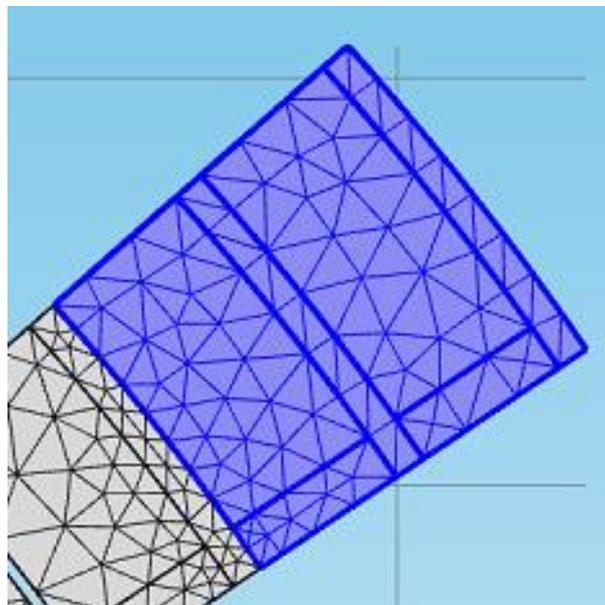


Ilustración 149. Canales gruesos pasivos - Mallado 3

- Mallado zona caliente

Tetraedros libres de tamaño 'Finer' de características predefinidas.

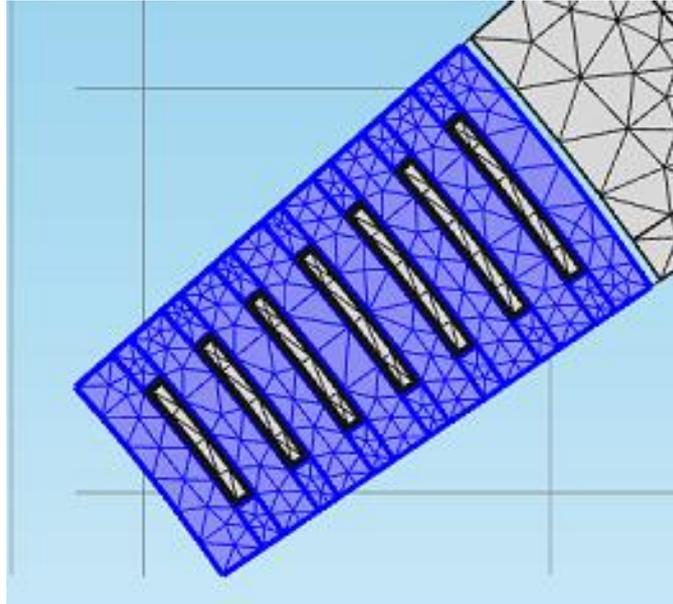


Ilustración 150. Zona caliente - Mallado 3

- Canales finos

En estos dominios se emplea la misma técnica de mallado que en los modelos de simulación anteriores, por ser el más adecuado. Mallados de tetraedros concéntricos distribuidos en 7 capas de espesor 0.00006m y factor de estrechamiento 1.2.

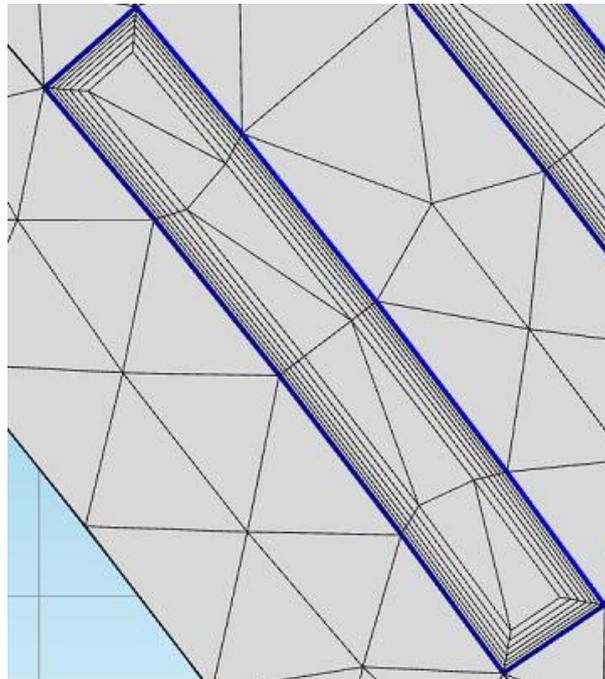


Ilustración 151. Canales finos - Mallado 3

- Conjunto mallado

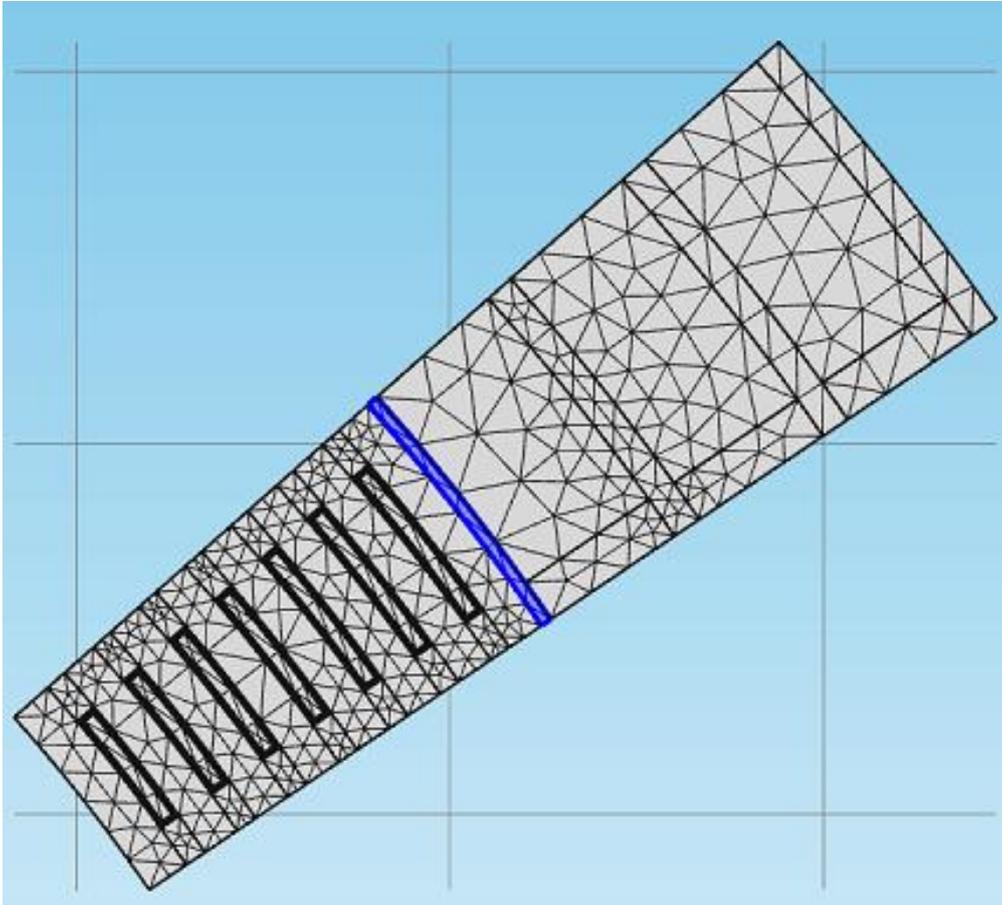


Ilustración 152. Conjunto mallado 3

- Distribución de temperaturas

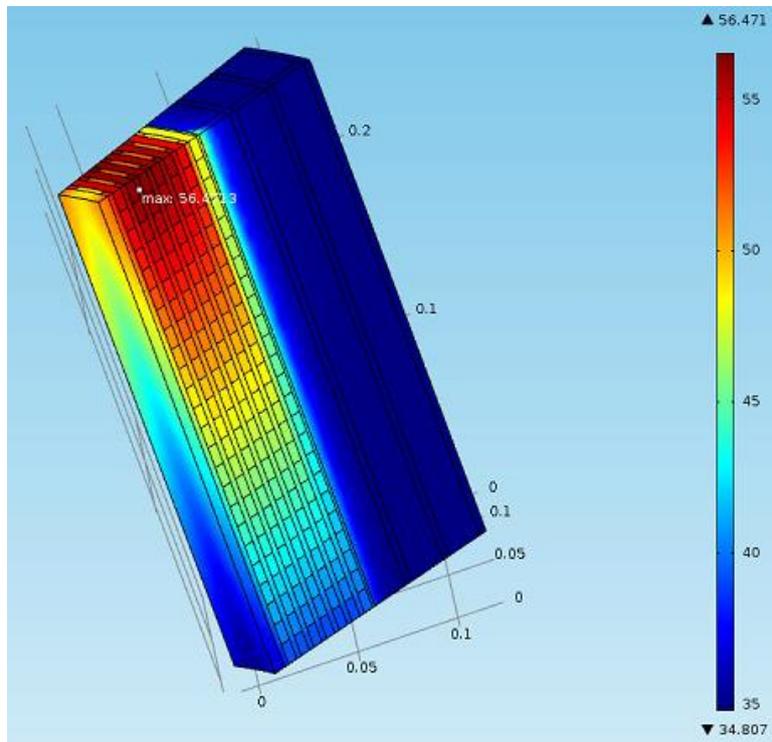


Ilustración 153. Distribución temperaturas mallado 3

- Distribución velocidades

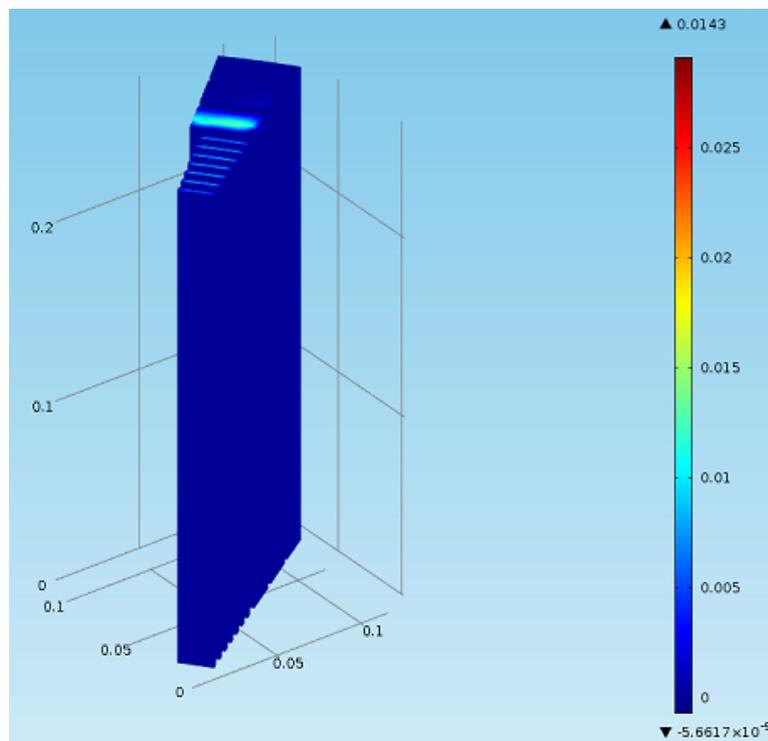


Ilustración 154. Distribución velocidades mallado 3

- Curva convergencia

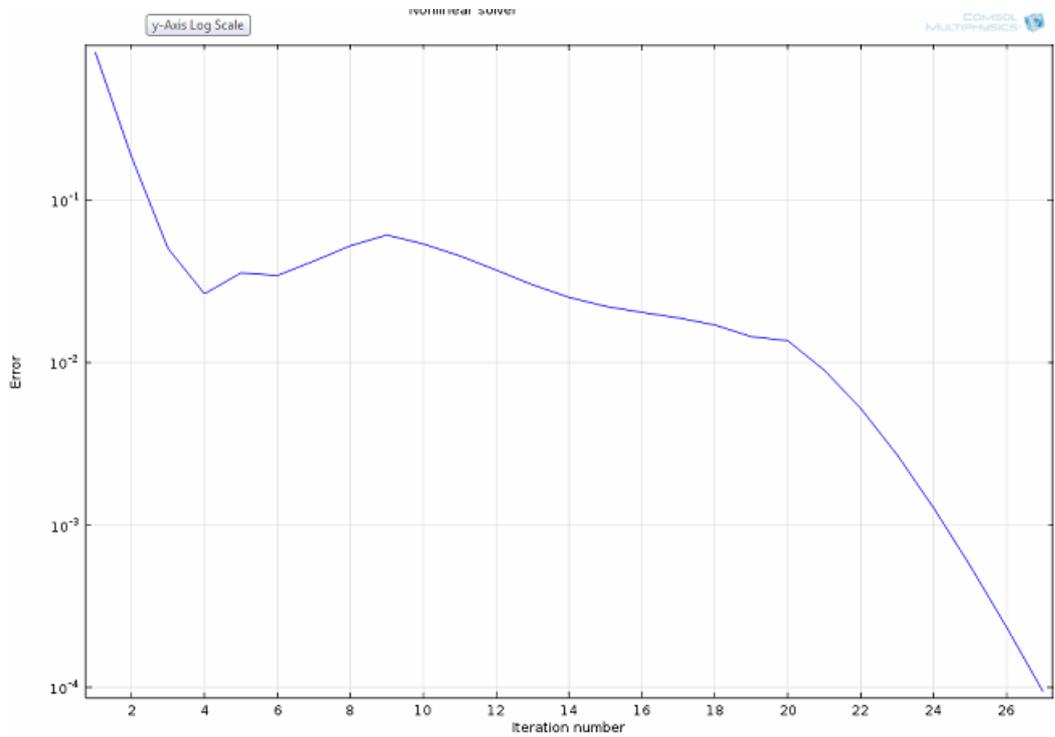


Ilustración 155. Convergencia del Mallado 3

En el presente modelo de simulación han sido necesarias 27 iteraciones para alcanzar el error deseado de rango 10^{-4} .

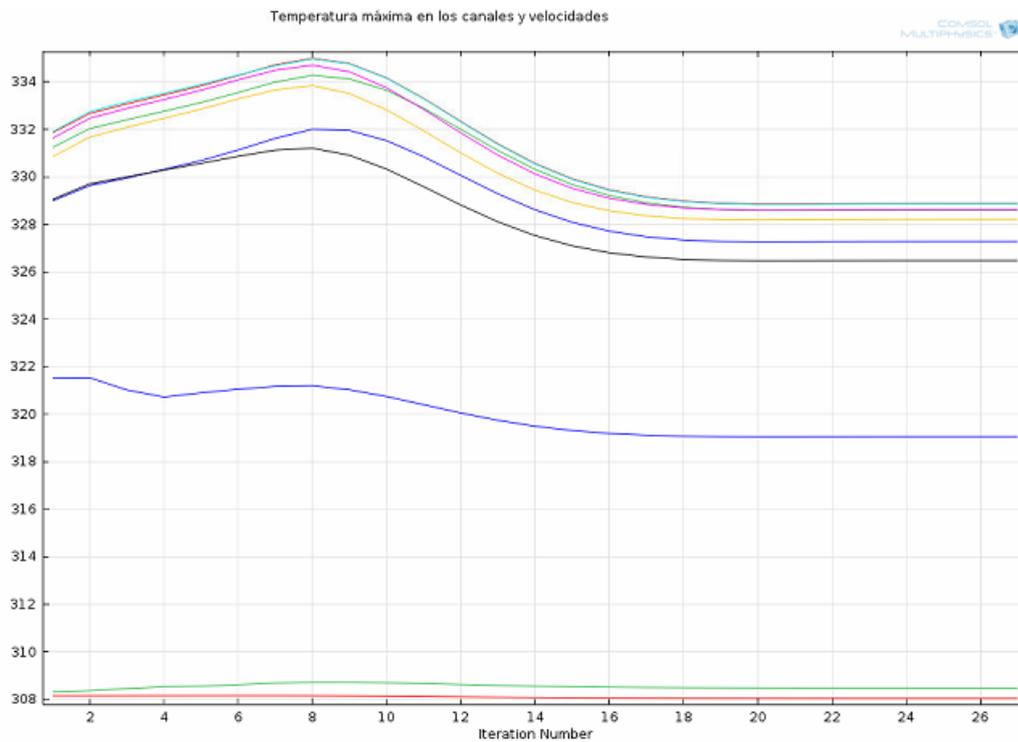


Ilustración 156. Curva representación de la temperatura máxima de los canales por iteración

4. Resistencia interna de cobre despreciable

El cuarto mallado se ha llevado a cabo sobre un modelo de simulación de diferentes características. En este caso, en lugar de incluir el dominio de cobre y definir el dominio papel como una condición de contorno de capa térmicamente resistiva delgada, se ha eliminado el dominio cobre y se ha mantenido el dominio papel del modelo real. Para ello se ha establecido la condición de contorno de generación de calor en la cara interna del papel.

Estas modificaciones geométricas del modelo, se han llevado a cabo con el software de AutoCad y se han exportado al formato *.Sat, anteriormente mencionado como idóneo para la reproducción con Comsol.

Las temperaturas obtenidas en esta simulación son superiores a las del modelo original, los motivos se explicarán cuando se analicen los resultados.

Con este cambio lo que se pretende es liberar carga computacional en cuanto a dominios, ya que suponer que el calor se genera en una superficie en lugar de un volumen quita carga a la simulación, puesto que donde se localizaba el dominio cobre no hay puntos para estudiar. Pero la realidad es que la cantidad de elementos de malla aumenta considerablemente, puesto que el espesor del dominio papel limita el tamaño de elemento máximo.

La técnica seguida para mallar el modelo ha sido la misma que en el modelo original: Barrido-Conversión-Tetraedros libres-Capas concéntricas, consiguiéndose un total de 750668 elementos de malla.

- Barrido canal grueso activo

Malla de hexaedros 'Finer'.

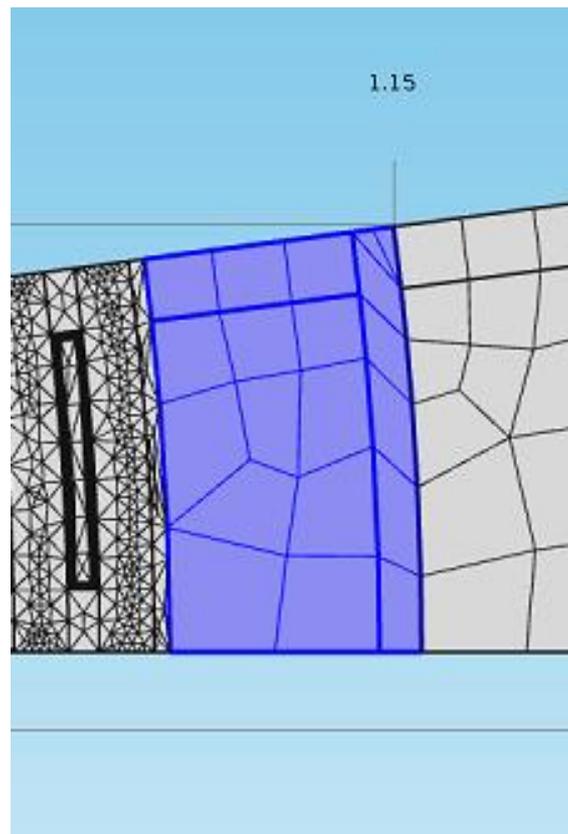


Ilustración 157. Canal grueso activo, Resistencia cobre despreciable

- Barrido canal grueso pasivo

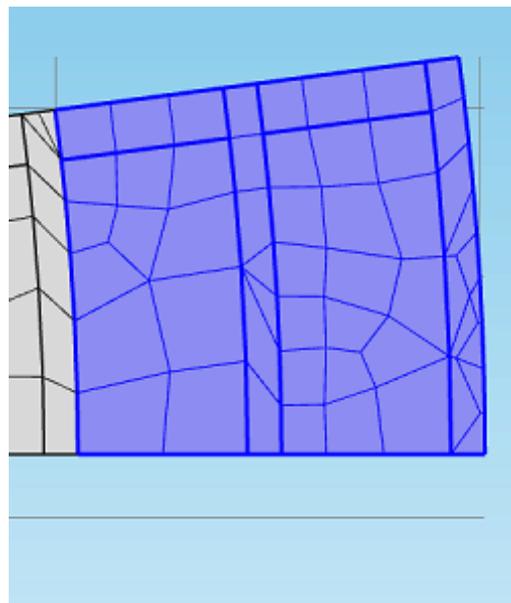


Ilustración 158. Canales gruesos pasivos, resistencia cobre despreciable

- Mallado zona caliente.

En este modelo hemos incluido en el mallado de la zona caliente, el que antes llamábamos zona de transición. Se han empleado tetraedros libres y tamaño de malla elegido ha sido 'Finer' con parámetros personalizados, tales como tamaño máximo de elemento 0.0211m, tamaño mínimo 0.00264m y un ratio de crecimiento de elemento de 1.3. El resultado es el siguiente:

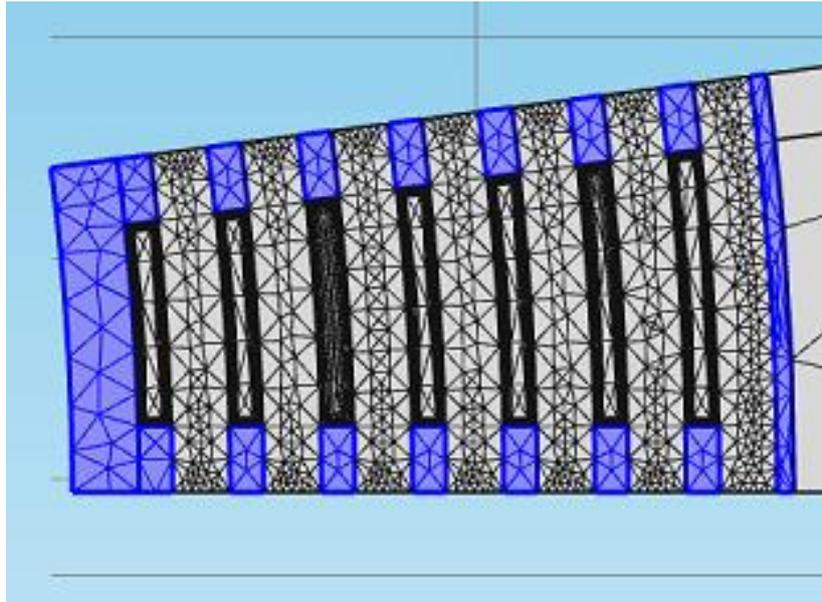


Ilustración 159. Zona caliente, resistencia cobre despreciable

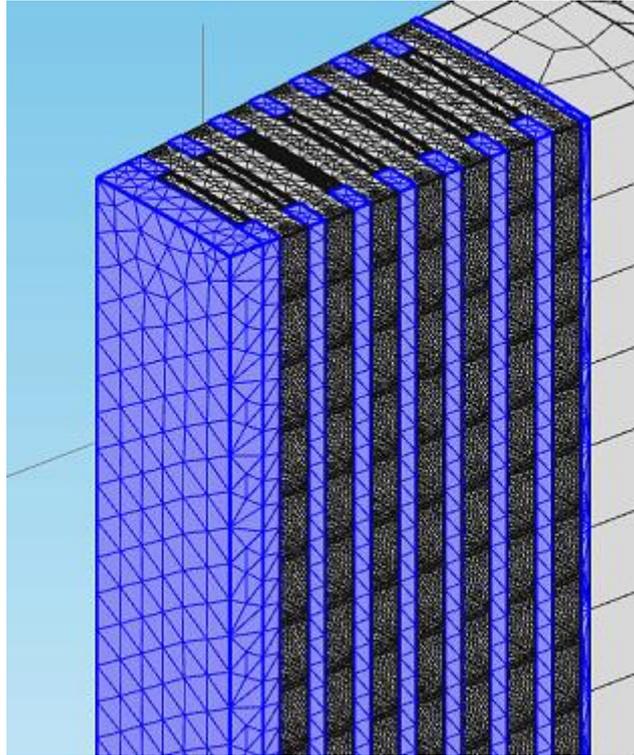


Ilustración 160. Zona caliente, Resistencia cobre despreciable

- Mallado dominio papel

Técnica de tetraedro libre de tamaño 'Fine' de parámetros personalizados como son tamaño máximo de elemento 0.017 y un ratio de 1.1. Durante el mallado de este dominio el programa presentó problemas a la hora de mallar ciertos componentes de papel debido a que el espesor del papel era más pequeño que el elemento de malla. Debido a esto, y tras intentar variar el tamaño de malla, la solución fue modificar el ratio de crecimiento de elemento, disminuyendo su valor los componentes de malla aumentan de manera más suave.

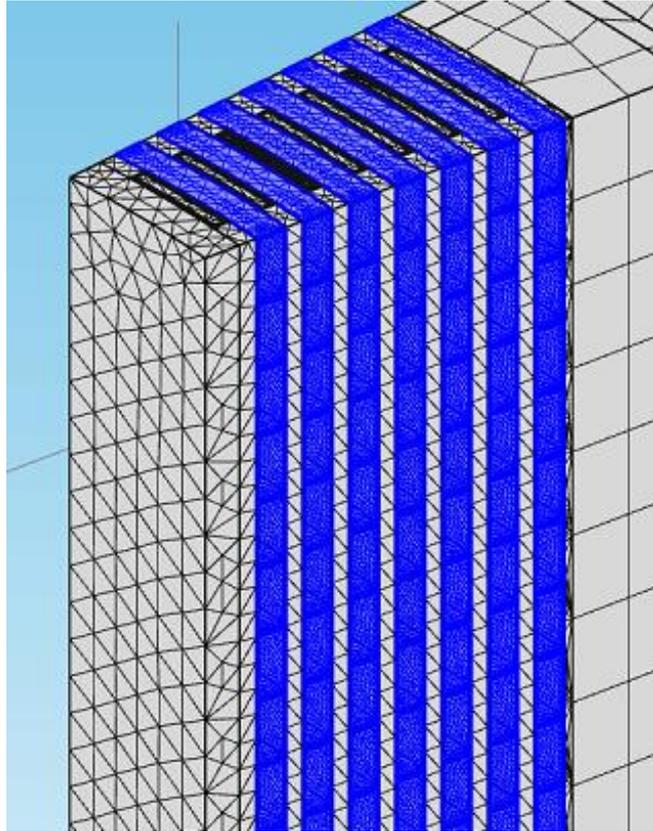


Ilustración 161. Mallado papel, resistencia cobre despreciable

- Mallado canales finos

La técnica de mallado de este dominio es la misma que en todos los modelos hasta ahora descritos, por ser la que proporciona valores más representativos, mallado en 8 capas concéntricas de tetraedros libres de espesor 0.9 y factor de estrechamiento de 1.1.

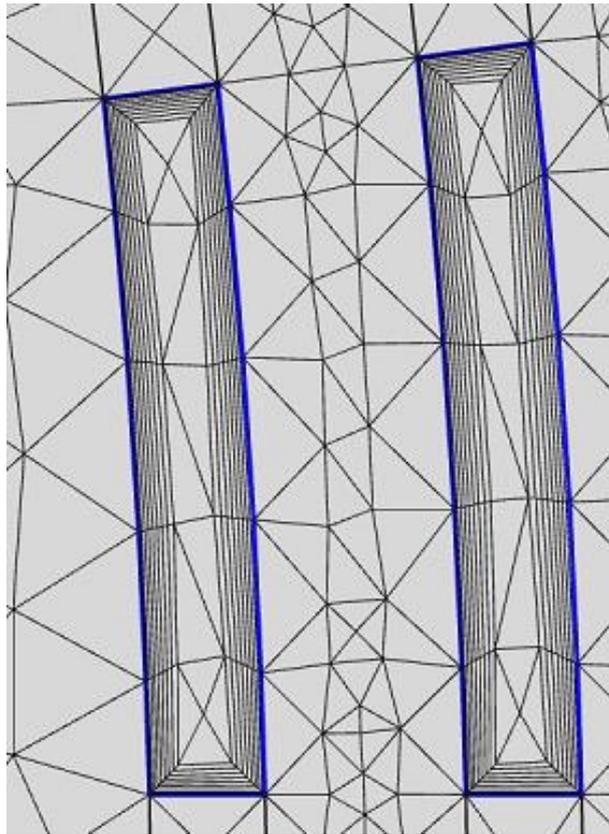


Ilustración 162. Canales finos, resistencia cobre despreciable

- Conjunto mallado

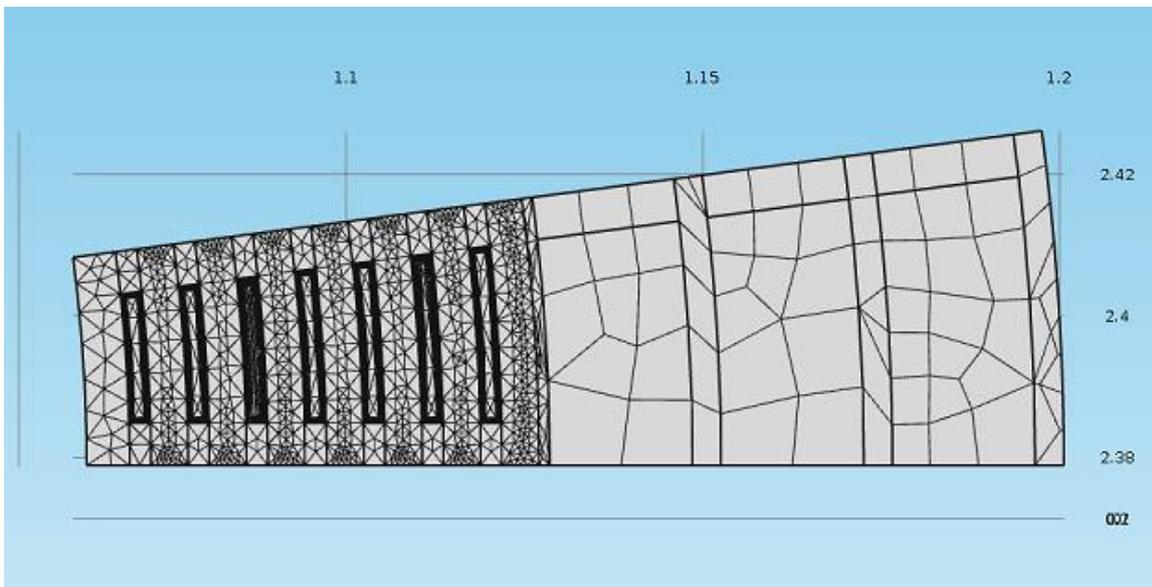


Ilustración 163. Conjunto mallado resistencia cobre despreciable

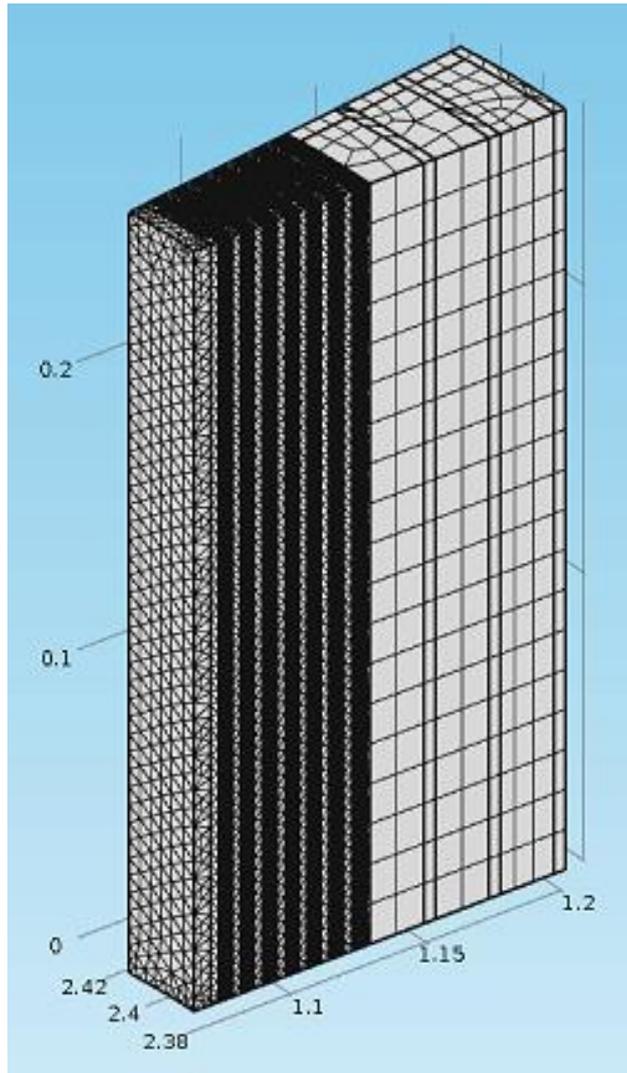


Ilustración 164. Conjunto mallado resistencia cobre despreciable b

- Distribución de temperaturas

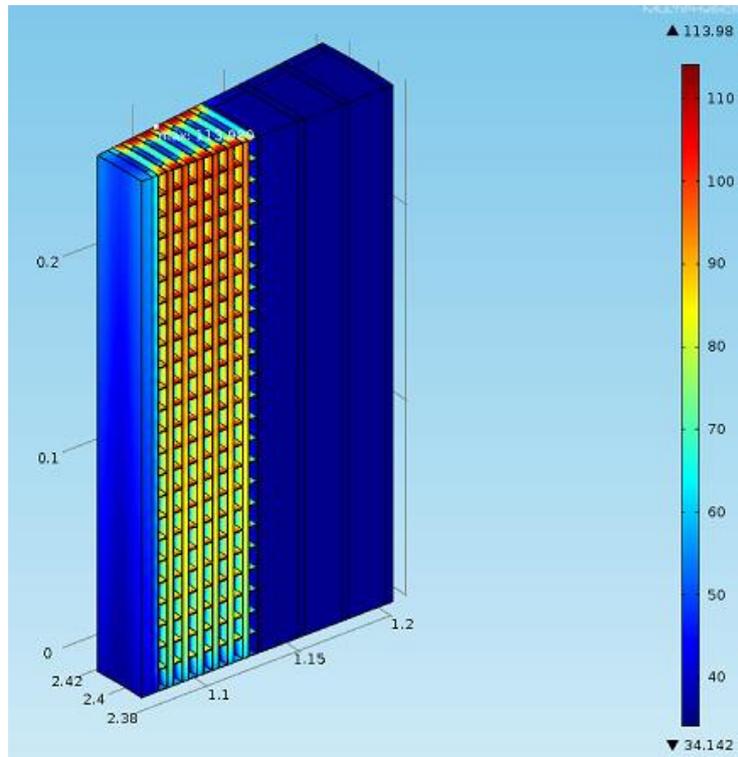


Ilustración 165. Distribución temperaturas resistencia cobre despreciable

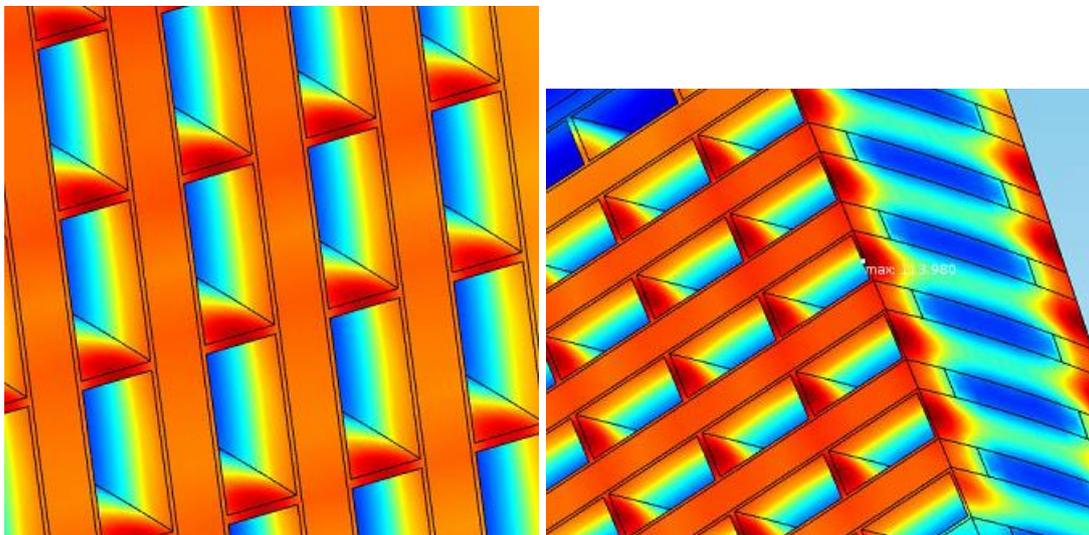


Ilustración 166. Vista dominio papel (a) y punto de máxima temperatura (b)

Tal y como se puede apreciar en la imágenes 166a y 166b, la distribución de temperaturas en la cara interna del papel es homogénea.

- Distribución de velocidades

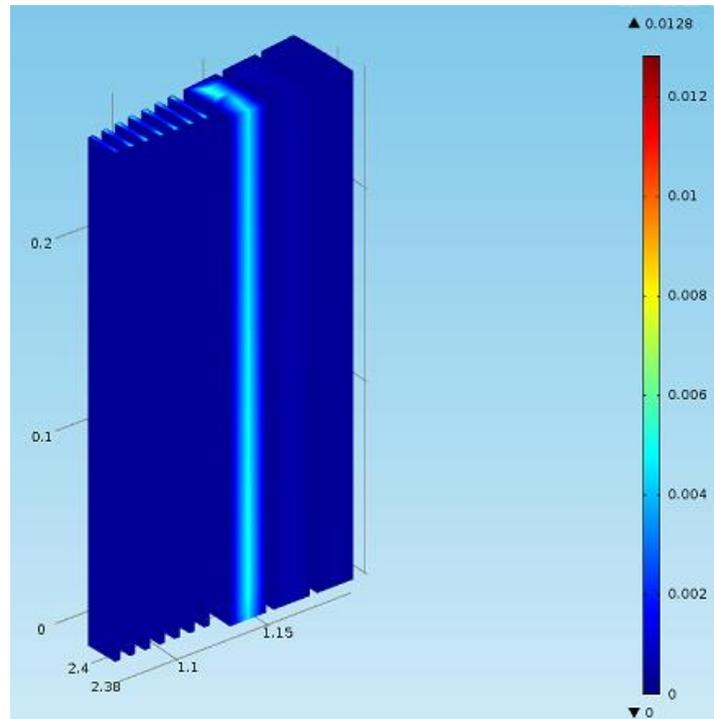


Ilustración 167. Distribución velocidades resistencia cobre despreciable

- Curva convergencia modelo resistencia interna del cobre despreciable

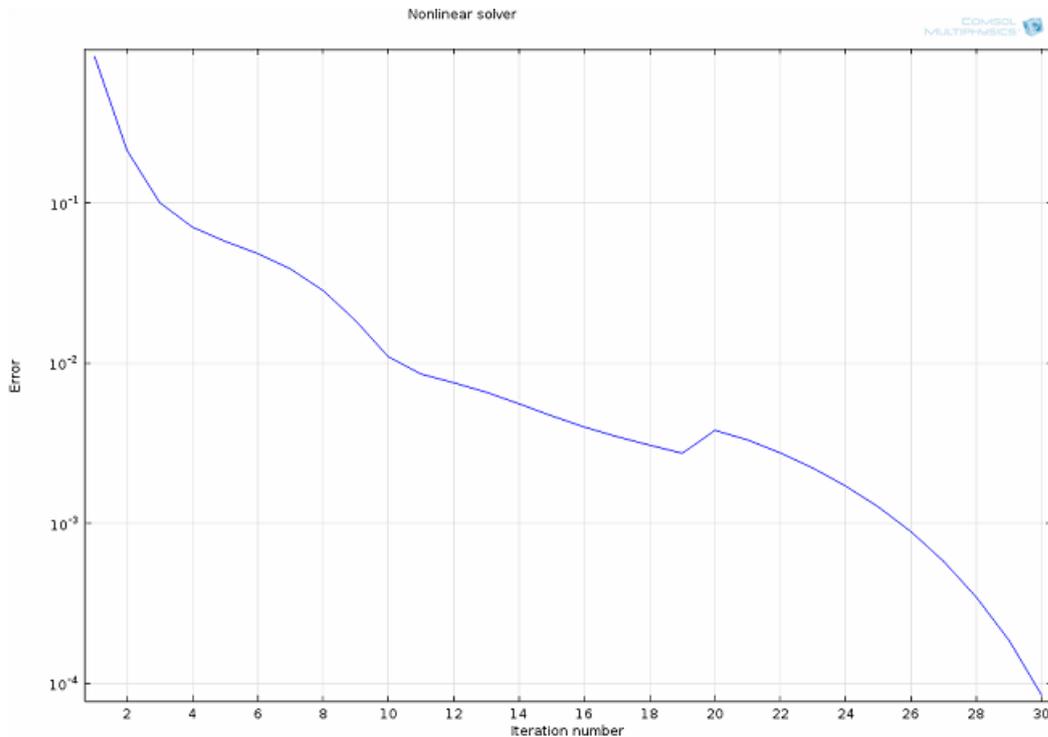


Ilustración 168. Curva de convergencia, modelo resistencia interna del cobre despreciable

El modelo de simulación de resistencia interna del cobre despreciable ha requerido de 30 iteraciones para alcanzar el rango de error esperado, 10^{-4} .

Capítulo VI. Resultados y conclusiones

VII. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A lo largo del presente capítulo se analizarán los resultados obtenidos de las simulaciones definidas en el capítulo anterior y se relacionará la carga computacional de la simulación con la validez de los resultados. Para ello se analizarán valores tales como temperaturas, velocidades, caudales, calores y transferencia de calor por convección.

En primer lugar se extraerán los resultados de interés de cada archivo de Comsol en función de los canales de aceite y se calcularán parámetros y datos que resulten útiles en la comparativa. El siguiente paso será la construcción de gráficos que comparen la evolución de los datos con respecto a los canales en cada modelo y por último se calcularán las desviaciones existentes en los resultados obtenidos con respecto al modelo original que tomaremos como punto de partida y cuyos resultados fueron incluidos en el capítulo V.

1. Resultados diferentes modelos

1.1. Mallado 2 modelo original

	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8	Canal 9	Canal 10
Temperatura entrada (K) (Condición contorno)	308,00									
Temperatura media de salida ponderada (K)	324,48	326,91	327,44	327,37	327,15	326,54	324,24	309,40	308,52	308,51
Temperatura máxima de salida (K)	327,43	328,82	329,12	329,27	329,99	328,57	327,00	314,41	308,24	308,03
Temperatura media Canal (K)	316,05	317,81	318,01	317,93	317,86	317,72	317,10	308,51	308,01	308,00
Temperatura máxima canal (K)	327,43	328,93	329,25	329,27	328,99	328,58	327,00	314,45	308,24	308,03
Calor específico entrada (J/kgK) (Dato)	2.009,00									
Calor específico salida (J/kgK)	2.071,34	2.080,83	2.082,88	2.082,62	2.081,75	2.079,38	2.070,42	2.012,53	2.009,11	2.009,05
Calor específico promedio por canal (J/kgK)	2.040,17	2.044,92	2.045,94	2.045,81	2.045,38	2.044,19	2.039,71	2.010,77	2.009,06	2.009,03
Incremento de entalpía por canal (j/kg)	33.622,00	38.669,34	39.773,07	39.627,34	39.168,93	37.899,28	33.124,89	2.815,07	1.044,71	1.024,60
Velocidad de entrada (m/s)	0,00296	0,00392	0,00409	0,00409	0,00392	0,00384	0,00364	0,00432	0,00011	0,00003
Velocidad de entrada (mm/s)	2,96	3,92	4,09	4,09	3,92	3,84	3,64	4,32	0,11	0,03
Velocidad media canal (m/s)	0,00313	0,00405	0,00417	0,00418	0,00414	0,00410	0,00380	0,00434	0,00010	0,00003
Velocidad media canal (mm/s)	3,13	4,05	4,17	4,18	4,14	4,10	3,80	4,34	0,10	0,03
Superficie de entrada canal (m2)	0,000055	0,000058	0,000061	0,000064	0,000068	0,000071	0,000074	0,000664	0,000727	0,000790

(valor conocido)	2700	4600	7100	9200	1400	3600	5000	9000	7000	4000
superficie entrada canal (mm2)	55,27	58,46	61,71	64,92	68,14	71,36	74,50	664,90	727,70	790,40
Caudal (m3/s)	0,000000 1636	0,000000 2292	0,000000 2524	0,000000 2655	0,000000 2671	0,000000 2740	0,000000 2712	0,000002 8724	0,000000 0800	0,000000 0237
Caudal (mm3/s)	163,60	229,16	252,39	265,52	267,11	274,02	271,18	2.872,37	80,05	23,71
Densidad aceite en la entrada (kg/m3) (Dato)	848,69									
Caudal másico aceite (kg/s)	0,000139	0,000194	0,000214	0,000225	0,000227	0,000233	0,000230	0,002438	0,000068	0,000020
Caudal másico aceite (g/s)	0,139	0,194	0,214	0,225	0,227	0,233	0,230	2,438	0,068	0,020
Calor transferido por canal (w)	4,67	7,52	8,52	8,93	8,88	8,81	7,62	6,86	0,07	0,02
Conductividad térmica(k)	0,127570	0,127190	0,127160	0,127000						
Superficie intercambio canal (m2)	0,011317 5000	0,011882 5000	0,012450 0000	0,013017 5000	0,013582 5000	0,014150 0000	0,014717 5000	0,022840 0000	0,024497 5000	0,026150 0000
Hc por canal W/(°Km2)	48,64	45,63	47,65	47,57	45,59	44,37	41,31	238,46	289,71	-
Calor transferido total (w)	61,91									
Temperatura salida media K	321,06									
Temperatura entrada media K	308,00									
Superficie intercambio total (m2)	0,16									
Hc total W/(°Km2)	44,35									
Temperaturas promedio salida canal (K)	323,98	326,41	326,94	326,87	326,65	326,04	323,74	308,90	308,02	308,01
Temperatura pared intercambio canal (K)	316,48	321,87	322,36	322,42	322,34	322,04	320,54	309,26	308,01	308,00
Calor efecto Joule bobinado (W) (Dato)	62,89									
Entalpia entrada comsol (J/kg)	607.248,00									
Entalpia salida comsol (J/kg)	639.866,	644.916,	646.009,	645.868,	645.405,	644.143,	639.374,	609.076,	607.305,	607.274,

	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
Incremento de entalpia (j/kg)	32.618,0 0	37.668,0 0	38.761,0 0	38.620,0 0	38.157,0 0	36.895,0 0	32.126,0 0	1.828,00	57,00	26,00
Calor absorbido por el fluido (W)	4,53	7,33	8,30	8,70	8,65	8,58	7,39	4,46	0,00	0,00
Suma de calor en todos los canales. (W)	57,94									
Calor evacuado por convección en la base (W)	4,95									
Superficie intercambio	0,002619	m2								
	1.889,13	W/m2								

Tabla 14. Resultados Mallado 2, Modelo original

1.2. Mallado 3 modelo original

	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8	Canal 9	Canal 10
Temperatura entrada (K) (Condición contorno)	308,00									
Temperatura media de salida ponderada (K)	323,47	326,14	326,59	326,49	326,26	325,62	322,92	309,66	308,57	308,51
Temperatura máxima de salida (K)	327,27	328,50	328,79	328,85	328,62	328,18	326,47	319,05	308,48	308,05
Temperatura media Canal (K)	315,57	317,46	317,61	317,52	317,44	317,27	316,36	308,53	308,01	308,00
Temperatura máxima canal (K)	327,27	328,59	328,87	328,85	328,62	328,19	326,47	319,05	308,48	308,05
Calor específico entrada (J/kgK)	2.009,00									
Calor específico salida (J/kgK)	2.067,38	2.077,80	2.079,55	2.079,17	2.078,29	2.075,80	2.065,24	2.013,56	2.009,29	2.009,06
Calor específico promedio por canal (J/kgK)	2.038,19	2.043,40	2.044,28	2.044,09	2.043,65	2.042,40	2.037,12	2.011,28	2.009,15	2.009,03
Incremento de entalpía por canal (j/kg)	31.530,80	37.067,28	38.003,07	37.795,13	37.316,96	35.987,09	30.393,83	3.338,72	1.145,21	1.024,61
Velocidad de entrada (m/s)	0,00311	0,00419	0,00433	0,00434	0,00420	0,00412	0,00371	0,00585	0,00018	0,00047
Velocidad de entrada (mm/s)	3,11	4,19	4,33	4,34	4,20	4,12	3,71	5,85	0,18	0,47
Velocidad promedio canal (m/s)	0,00328	0,00434	0,00445	0,00444	0,00440	0,00434	0,00385	0,00590	0,00018	0,00004
Velocidad promedio canal (mm/s)	3,28	4,34	4,45	4,44	4,40	4,34	3,85	5,90	0,18	0,04
Superficie de entrada canal (m2)	0,000055 2700	0,000058 4600	0,000061 7100	0,000064 9200	0,000068 1400	0,000071 3600	0,000074 5000	0,000664 9000	0,000727 7000	0,000790 4000
superficie entrada canal (mm2)	55,27	58,46	61,71	64,92	68,14	71,36	74,50	664,90	727,70	790,40
Caudal (m3/s)	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000003	0,000000	0,000000

	1719	2449	2672	2818	2862	2940	2764	8897	1310	3715
Caudal (mm ³ /s)	171,89	244,95	267,20	281,75	286,19	294,00	276,40	3.889,67	130,99	371,49
Densidad aceite en la entrada (kg/m³)	848,69									
Caudal másico aceite (kg/s)	0,000146	0,000208	0,000227	0,000239	0,000243	0,000250	0,000235	0,003301	0,000111	0,000315
Caudal másico aceite (g/s)	0,146	0,208	0,227	0,239	0,243	0,250	0,235	3,301	0,111	0,315
Calor transferido por canal (w)	4,60	7,71	8,62	9,04	9,06	8,98	7,13	11,02	0,13	0,32
Conductividad térmica(k)	0,127570	0,127190	0,127160	0,127000						
Superficie intercambio canal (m²)	0,011317	0,011882	0,012450	0,013017	0,013582	0,014150	0,014717	0,022840	0,024497	0,026150
Hc por canal W/(°Km ²)	51,32	46,62	48,24	48,28	46,73	45,65	40,88	652,10	173,23	-
Nusselt por canal L _{caract} =1,056 m	106,20	96,77	100,15	100,36	97,14	94,90	84,98	1.355,54	360,09	-
Nusselt	106,20	96,77	100,15	100,36	97,14	94,90	84,98	1.355,54	360,09	-
Calor transferido total (w)	66,61									
Temperatura salida media K	320,42									
Temperatura entrada media K	308,00									
Superficie intercambio total (m ²)	0,16									
Hc total W/(°Km ²)	51,09									
Temperaturas promedio salida canal (K)	322,97	325,64	326,09	325,99	325,76	325,12	322,42	309,16	308,07	308,01
Temperatura pared intercambio canal (K)	315,92	321,91	322,35	322,38	322,28	321,90	319,85	308,74	308,03	308,00
Calor efecto Joule bobinado (W) (Dato)	62,89									
Entalpia entrada comsol (J/kg)	607.248,00									



Entalpia salida consol (J/kg)	637.765,00	643.300,00	644.236,00	644.034,00	643.563,00	642.234,00	636.627,00	609.602,00	607.397,00	607.280,00
Incremento de entalpia (j/kg)	30.517,00	36.052,00	36.988,00	36.786,00	36.315,00	34.986,00	29.379,00	2.354,00	149,00	32,00
Calor absorbido por el fluido (W)	4,45	7,49	8,39	8,80	8,82	8,73	6,89	7,77	0,02	0,01
Suma de calor en todos los canales. (W)	61,37									
Calor evacuado por convección en la base (W)	1,52									
Superficie intercambio	0,002619	m2								
	581,51	W/m2								

Tabla 15. Resultados mallado 3, Modelo original

1.3. Resistencia interna del cobre despreciable

	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8	Canal 9	Canal 10
Temperatura entrada (K) (Condición contorno)	308,00									
Temperatura media de salida ponderada (K)	322,51	326,73	326,55	326,45	326,21	325,99	325,64	309,34	308,58	308,51
Temperatura máxima de salida (K)	332,53	343,65	343,87	343,87	344,21	343,95	342,98	310,53	308,40	308,04
Temperatura media Canal (K)	315,14	317,40	317,34	317,23	317,12	317,03	316,87	308,45	308,02	308,00
Temperatura máxima canal (K)	332,53	343,65	343,87	343,87	344,21	343,95	342,98	310,61	308,40	308,04
Calor específico entrada (J/kgK)	2.009,00									
Calor específico salida (J/kgK)	2.063,65	2.080,12	2.079,40	2.079,02	2.078,10	2.077,24	2.075,85	2.012,31	2.009,34	2.009,06
Calor específico promedio por canal (J/kgK)	2.036,33	2.044,56	2.044,20	2.044,01	2.043,55	2.043,12	2.042,43	2.010,66	2.009,17	2.009,03
Incremento de entalpía por canal (j/kg)	29.547,08	38.294,61	37.919,91	37.711,98	37.213,05	36.755,73	36.028,38	2.694,28	1.165,32	1.024,61
Velocidad de entrada (m/s)	0,00296	0,00425	0,00425	0,00413	0,00403	0,00404	0,00393	0,00474	0,00030	0,00050
Velocidad de entrada (mm/s)	2,96	4,25	4,25	4,13	4,03	4,04	3,93	4,74	0,30	0,50
Velocidad media canal (m/s)	0,00317	0,00432	0,00432	0,00429	0,00426	0,00424	0,00418	0,00513	0,00030	0,00004
Velocidad media canal (mm/s)	3,17	4,32	4,32	4,29	4,26	4,24	4,18	5,13	0,30	0,04
Superficie de entrada canal (m2)	0,000055 2700	0,000058 4600	0,000061 7100	0,000064 9200	0,000068 1400	0,000071 3600	0,000074 5000	0,000664 9000	0,000727 7000	0,000790 4000
superficie entrada canal (mm2)	55,27	58,46	61,71	64,92	68,14	71,36	74,50	664,90	727,70	790,40
Caudal (m3/s)	0,000000 1636	0,000000 2485	0,000000 2623	0,000000 2681	0,000000 2746	0,000000 2883	0,000000 2928	0,000003 1516	0,000000 2183	0,000000 3952

Caudal (mm ³ /s)	163,60	248,46	262,27	268,12	274,60	288,29	292,79	3.151,63	218,31	395,20
Densidad aceite en la entrada (kg/m³)	848,69									
Caudal másico aceite (kg/s)	0,000139	0,000211	0,000223	0,000228	0,000233	0,000245	0,000248	0,002675	0,000185	0,000335
Caudal másico aceite (g/s)	0,139	0,211	0,223	0,228	0,233	0,245	0,248	2,675	0,185	0,335
Calor transferido por canal (w)	4,10	8,07	8,44	8,58	8,67	8,99	8,95	7,21	0,22	0,34
Conductividad térmica(k)	0,127570	0,127190	0,127160	0,127000						
Superficie intercambio canal (m²)	0,011317	0,011882	0,012450	0,013017	0,013582	0,014150	0,014717	0,022840	0,024497	0,026150
Hc por canal W/(°Km ²)	38,89	50,19	50,37	49,64	48,63	49,04	48,12	500,83	220,34	-
Calor transferido total (w)	63,58									
Temperatura salida media K	320,65									
Temperatura entrada media K	308,00									
Superficie intercambio total (m ²)	0,16									
Hc total W/(°Km ²)	41,45									
Temperaturas promedio salida canal (K)	322,01	326,23	326,05	325,95	325,71	325,49	325,14	308,84	308,08	308,01
Temperatura pared intercambio canal (K)	317,32	321,54	321,46	321,28	321,13	320,96	320,64	308,63	308,04	308,00
Calor efecto Joule bobinado (W) (Dato)	62,89									
Entalpia entrada comsol (J/kg)	607.248,00									
Entalpia salida comsol (J/kg)	635.975,00	644.583,00	644.200,00	643.996,00	643.502,00	643.048,00	642.297,00	608.956,00	607.424,00	607.280,00
Incremento de entalpia (j/kg)	28.727,00	37.335,00	36.952,00	36.748,00	36.254,00	35.800,00	35.049,00	1.708,00	176,00	32,00

Calor absorbido por el fluido (W)	3,99	7,87	8,22	8,36	8,45	8,76	8,71	4,57	0,03	0,01
Suma de calor en todos los canales. (W)	58,98									
Calor evacuado por convección en la base (W)	3,92									
Superficie intercambio	0,002619	m2								
	1.494,96	W/m2								

Tabla 16. Resultados modelo Resistencia interna del cobre despreciable

2. Comparativa de datos y conclusiones

- Calor evacuado

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en cuanto a cantidad de calor transferido en cada canal tanto en el modelo original como en los tres mallados analizados.

Calores (W)	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8	Canal 9	Canal 10
Modelo y mallado original	4,51	8,13	8,84	9,31	9,44	9,60	8,23	6,40	0,08	0,03
Mallado 2	4,67	7,52	8,52	8,93	8,88	8,81	7,62	6,86	0,07	0,02
Mallado 3	4,60	7,71	8,62	9,04	9,06	8,98	7,13	11,02	0,13	0,32
Resistencia cobre despreciable	4,10	8,07	8,44	8,58	8,67	8,99	8,95	7,21	0,22	0,34

Tabla 17. Calor transferido

A partir de los resultados mostrados, podemos calcular la variación de los resultados obtenidos en los mallados analizados con respecto al mallado original, obteniéndose los siguientes valores:

% Desviación Calores	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8	Canal 9	Canal 10
Mallado 2	3,59	7,48	3,66	4,11	5,91	8,18	7,39	7,20	10,06	25,00
Mallado 3	2,07	5,20	2,55	2,95	3,96	6,46	13,39	72,16	61,33	1075,01
Resistencia cobre despreciable	8,96	0,66	4,56	7,85	8,10	6,31	8,75	12,57	173,60	1150,01

Tabla 18. % Desviación resultados transferencia de calor

	Calor total transferido (w)	Calor efecto joule bobinado (w)	% Desviación calor transferido	% calor transferido canales finos
Modelo y mallado original	64,56721274	62,89	2,67%	89,92%
Mallado 2	61,90906587		-1,56%	88,77%
Mallado 3	66,6055591		5,91%	82,78%
Resistencia cobre despreciable	63,58317974		1,10%	87,79%

Tabla 19. Calor transferido

En la Tabla 19 se puede observar el calor total transferido en los 10 canales de cada mallado y la desviación relativa a la condición de contorno fijada, 62.89 W. Teniendo en cuenta los % de desviación en los resultados podemos afirmar que se cumple el Primer Principio de la termodinámica, el cual enuncia que el calor cedido es igual al calor transferido.

Además, la Tabla 19 muestra como el 90 % de calor transferido es intercambiado en los 7 canales finos, es decir, son los canales térmicamente más activos, motivo por el que de ahora en adelante serán los únicos analizados.

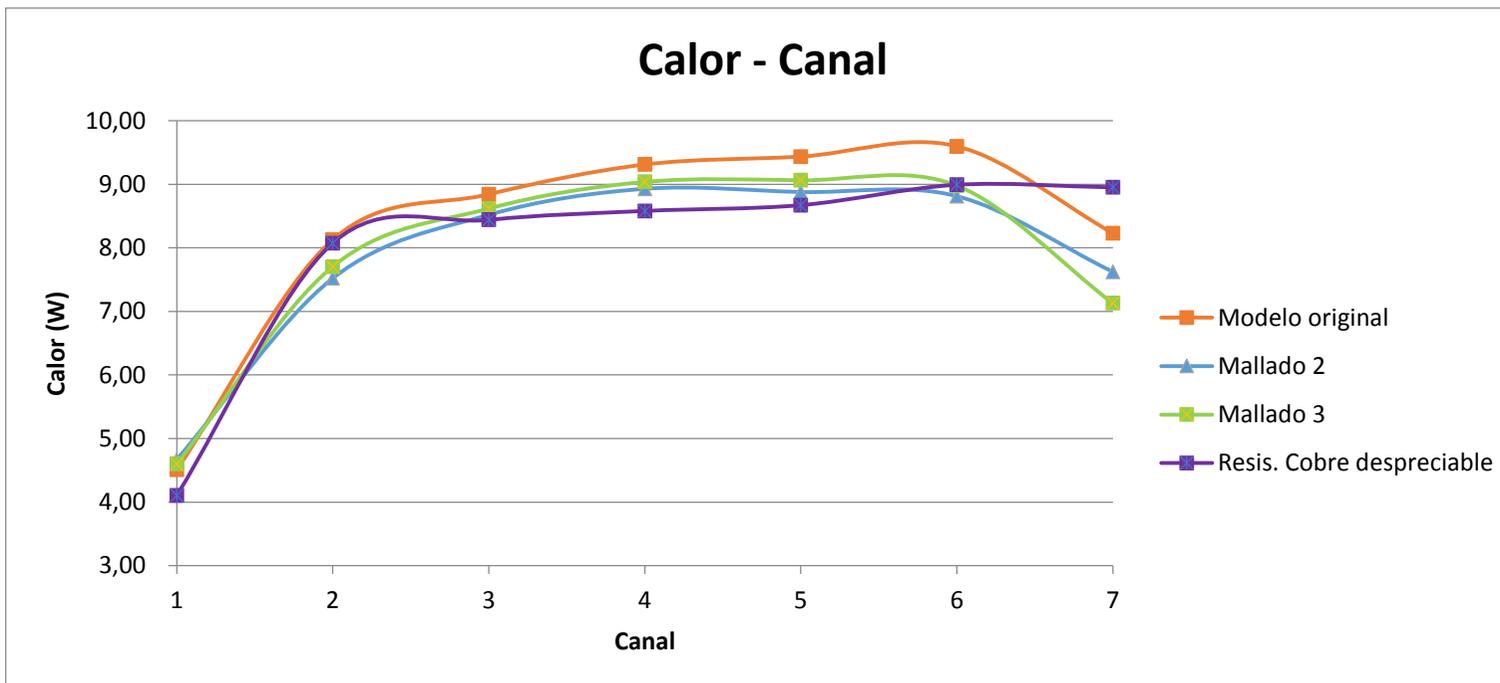


Ilustración 169. Calor transferido por canal

% Desviación Calores	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Mallado 2	3,59	7,48	3,66	4,11	5,91	8,18	7,39
Mallado 3	2,07	5,20	2,55	2,95	3,96	6,46	13,39
Resistencia cobre despreciable	8,96	0,66	4,56	7,85	8,10	6,31	8,75

Tabla 20. % Desviación en los resultados del calor transferido por canal relativo al modelo original

	% Medio Desviación calor transferido
Mallado 2	5,76
Mallado 3	5,23
Resistencia cobre despreciable	6,46

Tabla 21. % Medio desviación de calor transferido

Por los motivos expuestos, podemos afirmar que los 3 mallados analizados son fluído-térmicamente hablando, equivalentes al modelo original.

- Parámetro Hc

Parámetro hc (W/m ² K)	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Modelo y mallado original	55,07	47,24	48,03	48,47	47,46	47,05	43,49
Mallado 2	48,64	45,63	47,65	47,57	45,59	44,37	41,31
Mallado 3	51,32	46,62	48,24	48,28	46,73	45,65	40,88
Resistencia cobre despreciable	49,52	50,19	50,37	49,64	48,63	49,04	48,12

Tabla 22. Comparativa Parámetro Hc

% Desviación	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Mallado 2	11,68	3,41	0,78	1,85	3,94	5,70	5,03
Mallado 3	6,82	1,32	0,44	0,39	1,54	2,96	6,01
Resistencia cobre despreciable	10,08	6,24	4,87	2,42	2,47	4,24	10,65

Tabla 23. % Desviación en los resultados del parámetro Hc relativo al modelo original

	% Desviación media canales finos
Mallado 2	4,63
Mallado 3	2,78
Resistencia cobre despreciable	5,85

Tabla 24. % Medio Desviación parámetro Hc

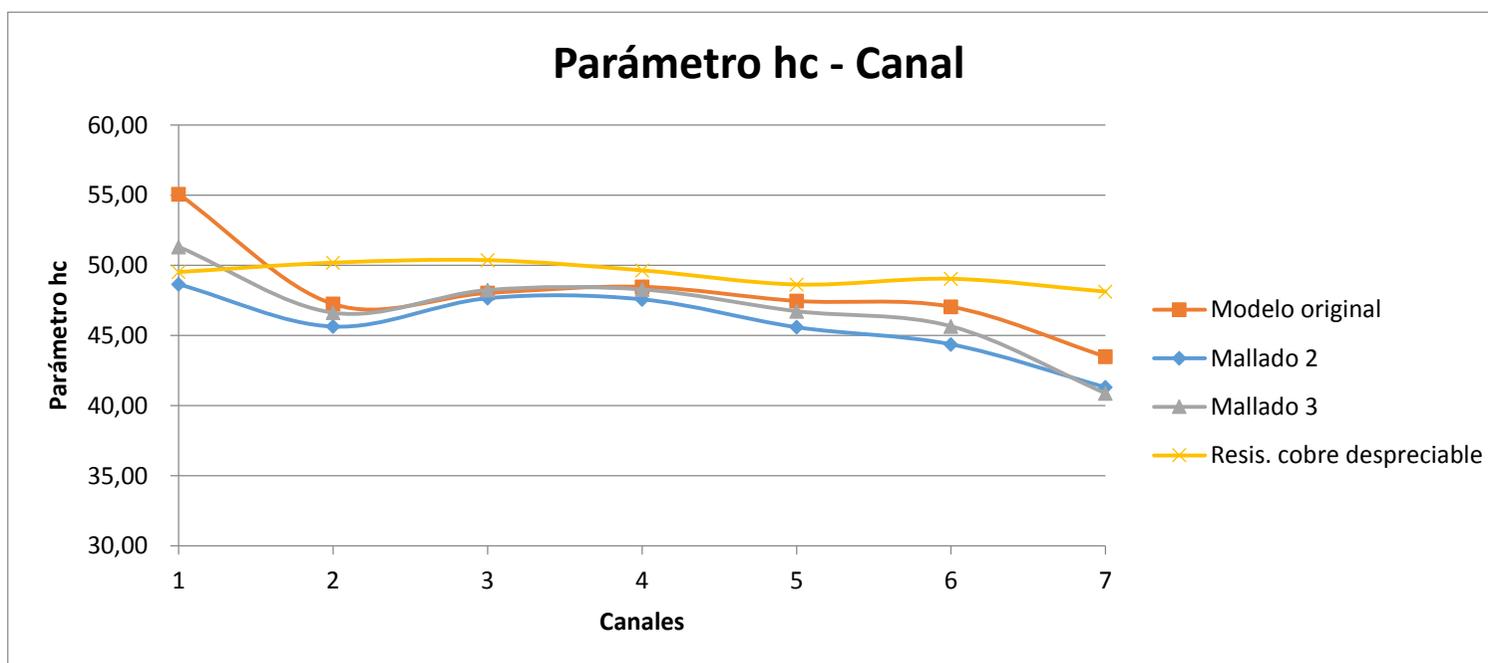


Ilustración 170. Gráfico comparación del parámetro hc

- Caudal másico

Caudal másico (g/s)	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Modelo y mallado original	0,150	0,222	0,237	0,252	0,258	0,268	0,262
Mallado 2	0,139	0,194	0,214	0,225	0,227	0,233	0,230
Mallado 3	0,146	0,208	0,227	0,239	0,243	0,250	0,235
Resistencia cobre despreciable	0,139	0,211	0,223	0,228	0,233	0,245	0,248

Tabla 25. Caudal másico por canal

% Desviación	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Mallado 2	7,50	12,30	9,71	10,50	12,11	13,32	12,29
Mallado 3	2,81	6,26	4,42	5,03	5,83	7,00	10,60
Resistencia cobre despreciable	7,50	4,92	6,18	9,63	9,64	8,80	5,30

Tabla 26. % Desviación en los resultados de caudal másico relativo al modelo original

	% Desviación media canales finos
Mallado 2	11,11
Mallado 3	5,99
Resistencia cobre despreciable	7,43

Tabla 27. % Medio Desviación caudal másico

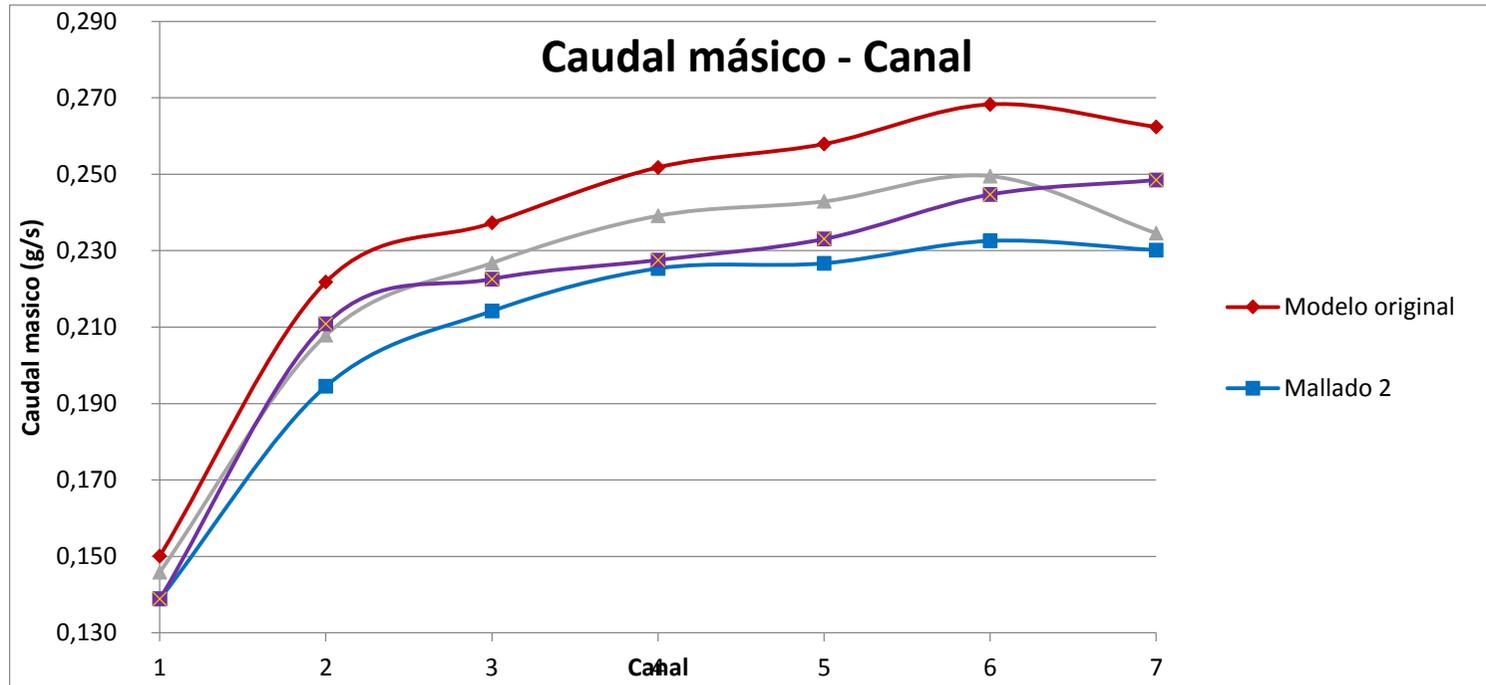


Ilustración 171. Gráfico comparativo de caudales máxicos

Cabe decir que existen dos tipos de canales desde el punto de vista geométrico: los conductos del 1 al 7, con sección transversal estrecha, y los conductos del 8 al 10, con sección transversal ancha. Es evidente que esta característica geométrica tiene una gran influencia en los flujos máxicos y en las velocidades por los canales y, como consecuencia, en sus temperaturas. Si se observan las figuras 144, 154 y 167, se puede comprobar que la mayor velocidad se alcanza en el canal grueso número 8.

- Temperatura media de salida de cada canal

Temperatura salida (K)	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Modelo y mallado original	322,74	325,94	326,24	326,10	325,91	325,52	323,36
Mallado 2	324,48	326,91	327,44	327,37	327,15	326,54	324,24
Mallado 3	323,47	326,14	326,59	326,49	326,26	325,62	322,92
Resistencia cobre despreciable	322,51	326,73	326,55	326,45	326,21	325,99	325,64

Tabla 28. Temperatura media salida canal

% Desviación	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Mallado 2	0,54	0,30	0,37	0,39	0,38	0,31	0,27
Mallado 3	0,23	0,06	0,11	0,12	0,11	0,03	0,14
Resistencia cobre despreciable	0,07	0,24	0,10	0,11	0,09	0,14	0,71

Tabla 29. % Desviación en los resultados de temperatura salida canal relativo al modelo original

	% Desviación media canales finos
Mallado 2	0,37
Mallado 3	0,11
Resistencia cobre despreciable	0,21

Tabla 30. % Medio Desviación temperatura media de salida de canal

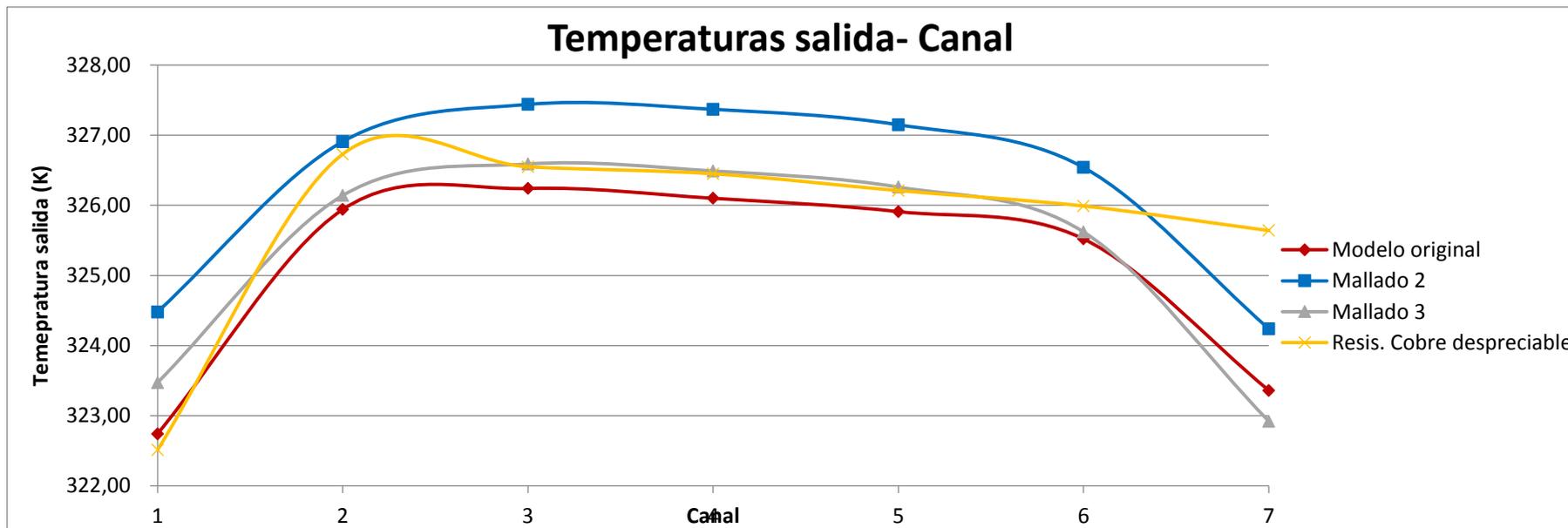


Ilustración 172. Gráfico comparativo temperatura salida canal

- Temperatura media canal

Temperatura media canal (K)	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Modelo y mallado original	315,17	317,38	317,44	317,33	317,33	317,13	316,57
Mallado 2	316,05	317,81	318,01	317,93	317,86	317,72	317,10
Mallado 3	315,57	317,46	317,61	317,52	317,44	317,27	316,36
Resistencia cobre despreciable	315,14	317,40	317,34	317,23	317,12	317,03	316,87

Tabla 31. Comparativa temperatura media canal

% Desviación	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Mallado 2	0,28	0,14	0,18	0,19	0,17	0,19	0,17
Mallado 3	0,13	0,03	0,05	0,06	0,03	0,04	0,07
Resistencia cobre despreciable	0,01	0,01	0,03	0,03	0,07	0,03	0,09

Tabla 32. % Desviación en los resultados de temperatura media canal relativo al modelo original

	% Desviación media canales finos
Mallado 2	0,19
Mallado 3	0,06
Resistencia cobre despreciable	0,04

Tabla 33. % Medio Desviación temperatura media canal

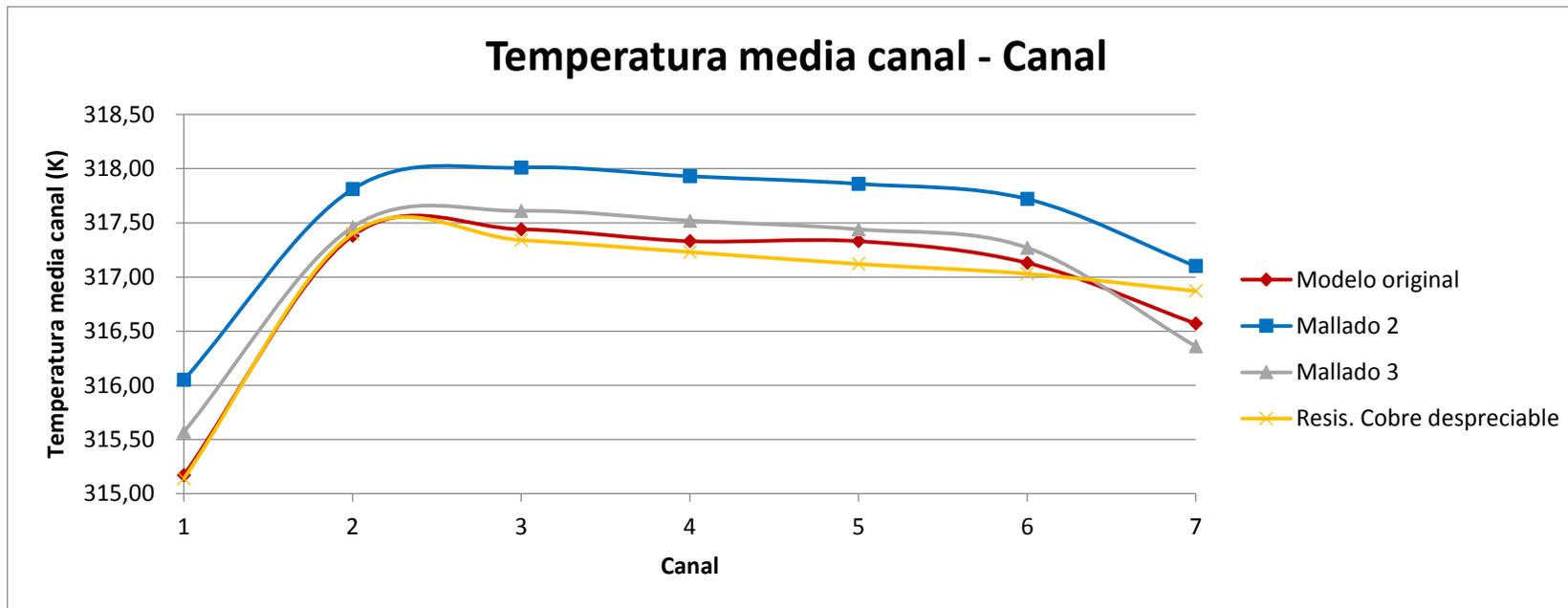


Ilustración 173. Diagrama comparativo temperatura media canal

- Velocidad entrada canal

Velocidad entrada (mm/s)	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Modelo y mallado original	3,20	4,47	4,53	4,57	4,46	4,43	4,15
Mallado 2	2,96	3,92	4,09	4,09	3,92	3,84	3,64
Mallado 3	3,11	4,19	4,33	4,34	4,20	4,12	3,71
Resistencia cobre despreciable	2,96	4,25	4,25	4,13	4,03	4,04	3,93

Tabla 34. Comparativo velocidad entrada canal

% Desviación	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Mallado 2	7,50	12,30	9,71	10,50	12,11	13,32	12,29
Mallado 3	2,81	6,26	4,42	5,03	5,83	7,00	10,60
Resistencia cobre despreciable	7,50	4,92	6,18	9,63	9,64	8,80	5,30

Tabla 35. % Desviación en los resultados velocidad entrada canal

	% Desviación media canales finos
Mallado 2	11,11
Mallado 3	5,99
Resistencia cobre despreciable	7,43

Tabla 36. % Medio Desviación velocidad entrada canal

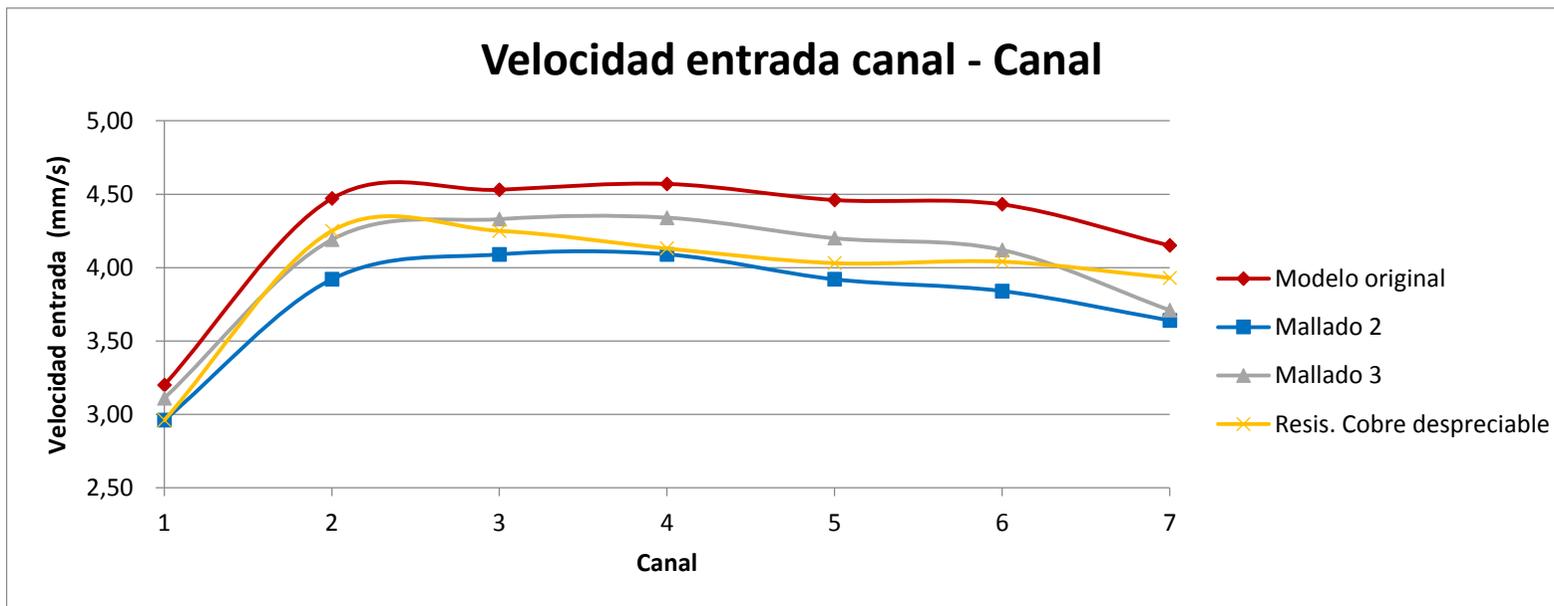


Ilustración 174. Gráfico comparativo velocidad entrada canal

- Velocidad media canal

Velocidad media canal (mm/s)	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Modelo y mallado original	3,28	4,57	4,63	4,61	4,57	4,54	4,25
Mallado 2	3,13	4,05	4,17	4,18	4,14	4,10	3,80
Mallado 3	3,28	4,34	4,45	4,44	4,40	4,34	3,85
Resistencia cobre despreciable	3,17	4,32	4,32	4,29	4,26	4,24	4,18

Tabla 37. Comparativo velocidad media canal

% Desviación velocidad media	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Mallado 2	4,57	11,38	9,94	9,33	9,41	9,69	10,59
Mallado 3	0,00	5,03	3,89	3,69	3,72	4,41	9,41
Resistencia cobre despreciable	3,35	5,47	6,70	6,94	6,78	6,61	1,65

Tabla 38. % Desviación velocidad media canal relativo al modelo original

	% Desviación media canales finos
Mallado 2	9,27
Mallado 3	4,31
Resistencia cobre despreciables	5,36

Tabla 39. % Medio Desviación velocidad media canal

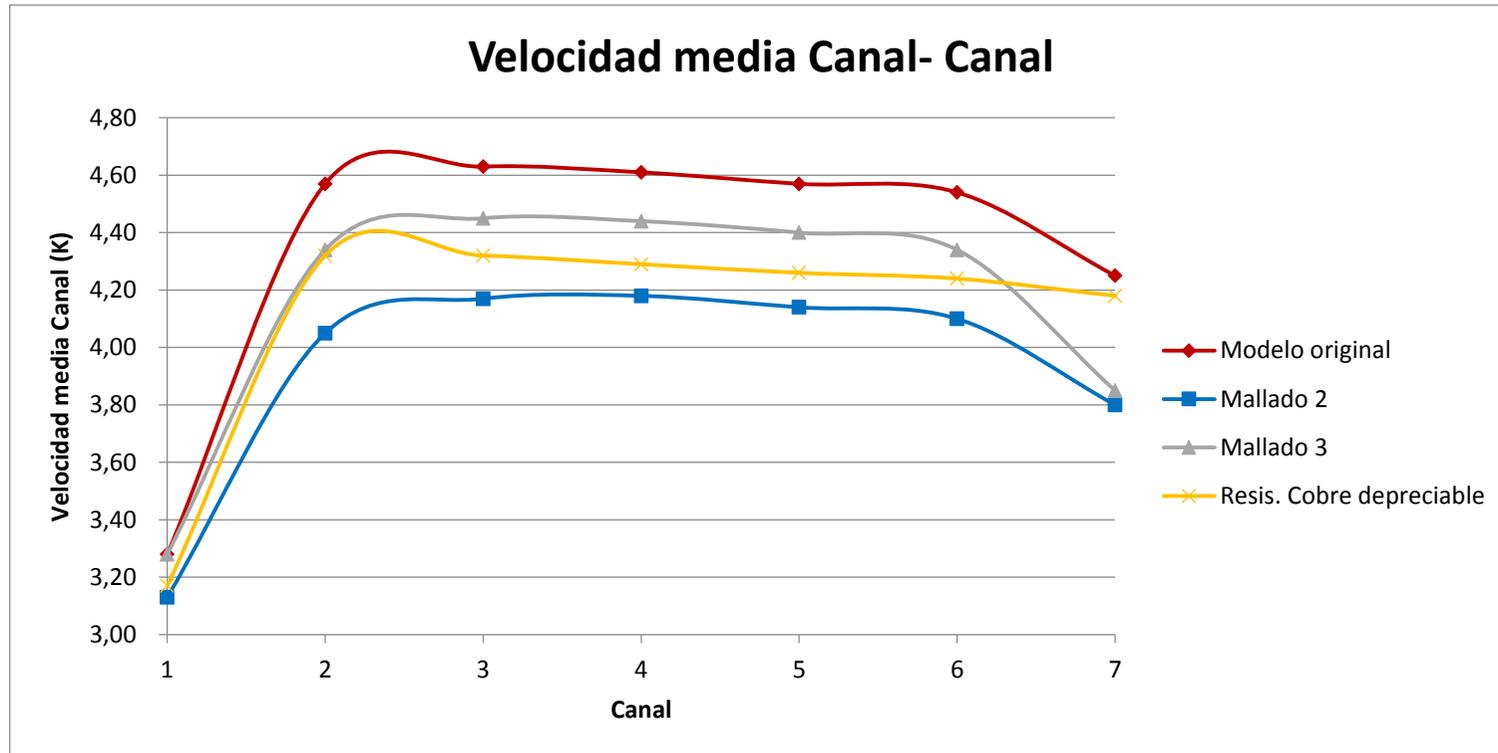


Ilustración 175. Gráfico comparativo velocidad media canal



	% Desviación conjunto de datos
Mallado 2	6,06
Mallado 3	3,50
Resis. Cobre desp.	5,08

Tabla 40. % Desviación media total en cada modelo de simulación

Los tres modelos proporcionan resultados válidos en los parámetros analizados del fluido. La ventaja que presenta este modelo de resistencia interna del cobre despreciables frente al original, para poder compensar el 391.22% más de elementos de malla (original 152816 y R.I.C.D 750668), es que en él se puede conocer la temperatura en la cara interna del papel, mientras que en los otros modelos esto no era posible.

En lo relativo a la tercera simulación llevada a cabo, el modelo en el que se supone que el cobre tiene resistencia interna despreciable, aunque fluido-térmicamente es un modelo equivalente al de partida, en relación a los valores de los componentes sólidos no podemos decir lo mismo, puesto que la temperatura máxima que alcanza el modelo es de 113 °C mientras que en el original es de 56°C. El hecho de no ser equivalentes en cuando a los parámetros de los componentes sólidos se debe a que el mallado no tiene el detalle suficiente como para obtener buenos resultados.

La temperatura máxima de este modelo se localiza en la cara interna del dominio papel, tal y como se puede ver en la imagen 166b. Este desfase existente entre la temperatura máxima de este modelo con respecto a los anteriores se debe a la simplificación de dominios y no se encuentra justificación a su aparición, puesto que para que en ese punto del dominio papel haya 113°C debe haber un punto más caliente desde el que se le esté cediendo calor, ya que de no existir una diferencia de temperatura no se cede calor de un cuerpo a otro. Además, este exceso de temperatura limitaría considerablemente la vida útil del papel dieléctrico y por extensión la del transformador, por lo que no se trata de una buena simplificación.

Capítulo VIII. Bibliografía y webgrafía

VIII. BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA

1. Alvarez, L.J.; Durany, J.; Fernández, G.; García, G.; Martínez, A.M.;

Método de elementos finitos, análisis, software y aplicaciones en ingeniería. Notas teóricas. Universidad de Vigo, 2001.

2. Delgado, F.; Ortiz, A.; Fernández, I.; Arroyo, A.; Macías, J.A.

Study on the cooling capacity of alternative liquids in power transformers IEEE 2012

3. Rahimpour, E.; Barati, M.; Schäfer, M.

An investigation of parameters affecting the temperature rise in windings with zigzag cooling flow path.

4. Skillen, A.; Revell, A.; Iacovides, H.; Wei, W.

Numerical prediction of local hot-spot phenomena in transformer windings.

5. Torriano, F.; Chaaban, M.; Picher, P.

Numerical study of parameters affecting the temperature distribution in a disc-type transformer winding.

6. Torriano, F.; Picher, P.; Chaaban, M.

Numerical investigation of 3D flow and thermal effects in a disc-type transformer winding.

7. El Wakil, N.; Chereches, N.C.; Padet, J.

Numerical study of heat transfer and fluid flow in a power transformer

8. Gastelurrutia, J.; Ramos, J.C.; Larraona, G.S.; Rivas, A.; Izagirre, J.; Del Rio, L.

Numerical modelling of natural convection of oil inside distribution transformers

9. Repositorio de Ucrea Universidad de Cantabria

- Christian Olmo Salas; Estudio comparativo de simulación 2d y 3d de la refrigeración de transformadores de potencia mediante dinámica computacional. Septiembre 2014.
- José Villar Gutiérrez; Estudio fluido-térmico mediante parámetros adimensionales de la capacidad refrigerante de un éster natural (FR3) para transformadores de potencia. Julio 2013.
- Agustín Santiesteban Díaz; Caracterización fluido-térmica de fluidos alternativos en transformadores de potencia con refrigeración zig-zag. Julio 2014.

10. Ramón Lecuna Tolosa;

Estudio de simulación fluido-térmico de cuatro aceites dieléctricos alternativos basados en ésteres naturales.

11. www.ree.es;

Tablas demanda eléctrica española, tablas componentes de la red eléctrica española, curvas de demanda, etc.