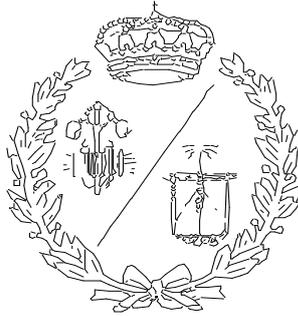


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS CFD DE LA REFRIGERACIÓN DE UN
TRANSFORMADOR DE POTENCIA CON
DISTINTOS TIPOS DE ACEITE**

**(CFD Analysis of the cooling of a power
transformer with different oil types)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: José Remondo Alonso

Junio - 2023

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es realizar estudio de la refrigeración de un transformador de potencia inmerso en aceite, mediante técnicas CFD (Dinámica de fluidos computacional). En concreto diseñaremos la parte del devanado, que es donde el fluido del sistema entra en contacto con las bobinas del transformador. Para ello se realizará un modelo a escala de esta parte del sistema de refrigeración.

El primer apartado consiste en obtener el mejor modelo posible para la simulación. Elaboraremos dos mallados, cuya diferencia está en el tamaño de los elementos que lo forman. Al final vemos que el modelo con más elementos y por lo tanto el más preciso es el mejor para este cometido. La principal duda era si la mayor calidad de simulación y por tanto uso de recursos, justificaba la diferencia de resultados.

En este estudio se valorarán diferentes aceites empleados en la refrigeración de transformadores, tanto de origen mineral como biodegradables. Para ello, se utilizarán, 4 aceites: un aceite de origen mineral, otro hecho a partir de soja, el tercero proveniente de la colza y por último uno sintético. Los aceites biodegradables y de origen vegetal se están abriendo un hueco en el mercado y se están empezando a implementar en los sistemas de refrigeración de transformadores de potencia. Mediante este estudio veremos qué diferencias tienen con los que se han usado históricamente, que son los de origen mineral.

El propósito de este trabajo es un estudio teórico del impacto de modificar la geometría de los canales de refrigeración del transformador para el uso de esteres naturales. En este ensayo no hemos tenido en cuenta las cualidades de cada tipo de aceite referidas a seguridad, mantenimiento, su facilidad de obtención etc. Cualidades que sí se tienen en cuenta a la hora de elegir el fluido para un sistema de refrigeración.

Veremos las grandes diferencias que existen entre las dos tipologías de aceite. Entre todos ellos, el que ha sido capaz de enfriar mejor el devanado de nuestro transformador es el aceite mineral. Dentro de los aceites biodegradables el que mejores resultados obtiene es el aceite vegetal 1 o aceite de soja. Aunque en muchos aspectos obtenga resultados parecidos al aceite vegetal 3 (sintético), en general es el que obtiene los valores más fiables. El que peor consigue

enfriar el devanado y obtiene los peores resultados, lejos de los otros dos, es el aceite vegetal 2, proveniente de la colza.

La última parte del ensayo consiste en ver si un aumento de tamaño en de nuestra pieza en determinados puntos influye en la refrigeración y si gracias a ello podemos igualar las prestaciones entre los aceites minerales y los biodegradables. Los datos obtenidos nos muestran que, como es lógico, al aumentar el tamaño de los conductos, mejoran los resultados. Esto es muy importante ya que hemos podido comprobar que, si se quieren cambiar los aceites de origen mineral por la nueva generación de aceites vegetales, al aumentar las dimensiones del sistema se pueden igualar e incluso superar las prestaciones, contando además con las cualidades que tienen los aceites biodegradables frente a los minerales.

ABSTRACT

The aim of this work is to study the cooling of a power transformer immersed in oil, using CFD (Computational Fluid Dynamics) techniques. Specifically, we will design the winding part, which is where the system fluid meets the transformer coils. To do this, a scale model of this part of the cooling system will be made.

The first section consists of obtaining the best possible model for the simulation. Two grids will be created, the difference between them is the size of the elements that make up the model. In the end we see that the model with more elements and therefore the more accurate one is the best for this task. The main doubt was whether the higher quality of the simulation, and therefore the use of resources, justified the difference in results.

In this study, different oils used in the cooling of transformers, both of mineral and biodegradable origin, will be evaluated. Four oils will be used for this purpose: one oil of mineral origin, another made from soya, the third from rapeseed and finally a synthetic oil. Biodegradable oils of vegetable origin are opening a niche in the market and are beginning to be implemented in the cooling systems of power transformers. Through this study we will see how they differ from those that have been used historically, which are those of mineral origin.

The purpose of this work is a theoretical study of the impact of modifying the geometry of the transformer cooling channels for the use of natural esters. In this test, we have not considered the qualities of each type of oil regarding safety, maintenance, ease of obtaining, etc. These qualities are considered when choosing the fluid for a cooling system.

We will see the major differences between the two types of oil. Among all of them, the one that has been able to cool the winding of our transformer the best is mineral oil. Among the biodegradable oils, the one with the best results is vegetable oil 1 or soya oil. Although in many aspects it obtains similar results to vegetable oil 3 (synthetic), in general it is the one that obtains the most reliable values. Vegetable oil 2, which comes from rapeseed, is the one with the worst winding cooling and the worst results, far behind the other two.

The last part of the test is to see if an increase in the size of our part at certain points influences the cooling and if this allows us to equalize the performance between mineral oils and biodegradable oils. The data obtained show that, logically, as the size of the ducts increases, the results improve. This is very important because we have been able to verify that, if we want to change the oils of mineral origin for the new generation of vegetable oils, by increasing the dimensions of the system, the performance can be equalized and even surpassed, also considering the qualities that biodegradable oils have over mineral oils.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	13
2.	TRANSFORMADOR DE POTENCIA.....	14
3.	GEOMETRÍA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	18
4.	ANÁLISIS CFD	22
4.1.	TEORÍA DENTRO DEL ANÁLISIS CFD	23
4.2.	ESTUDIO DE IMPACTO DE LA GEOMETRÍA EN EL FLUIDO	25
5.	ELABORACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN EL PROGRAMA DE ANÁLISIS CFD	27
5.1.	MEDIDAS PARAMETRIZADAS	28
6.	ELECCIÓN DEL MALLADO DEL SISTEMA	30
6.1.	MALLADO 1	34
6.2.	MALLADO 2	36
6.3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y ELECCIÓN DE MALLADO	42
7.	ESTUDIO DE TIPOS DE ACEITE	43
8.	ESTUDIO INICIAL	47
8.1.	CONDICIONES DE CONTORNO	47
8.2.	RESULTADOS DEL PRIMER ESTUDIO	49
8.2.1.	Aceite Mineral.....	49
8.2.2.	Aceite vegetal 1:.....	51
8.2.3.	Aceite vegetal 2:.....	55
8.2.4.	Aceite vegetal 3:.....	59
8.3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	62
8.4.	COMPARACION DE LOS 4 TIPOS DE ACEITE	63
8.5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	73
9.	ESTUDIO DE MODIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA	76
9.1.	RESULTADOS	77
9.2.	RESULTADOS GRÁFICOS	87
9.3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	91
10.	ESTUDIO DE TODAS LAS OPCIONES	93

10.1.	TEMPERATURA MEDIA DE LOS CONDUCTORES.....	94
10.2.	INCREMENTO DE TEMPERATURA RESPECTO A LA TEMPERATURA DE ENTRADA	96
10.3.	FLUJO MÁSIICO EN CADA SECCIÓN RAC	98
10.4.	PORCENTAJE DE FLUJO MÁSIICO DEL TOTAL EN CADA SECCIÓN RAC.....	99
10.5.	TEMPERATURAS MÁXIMAS ALCANZADAS	101
10.6.	NÚMERO DE REYNOLDS A LA ENTRADA	102
10.7.	NÚMERO DE GRASHOF	104
10.8.	DIFERENCIA DE TEMPERATURAS ENTRE LA ENTRADA Y LA SALIDA	106
10.9.	DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE LA ENTRADA Y LA SALIDA.....	107
10.10.	RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE REYNOLDS Y EL NÚMERO DE GRASHOF	108
11.	EVALUACIÓN DE TODOS LOS RESULTADOS.....	109
11.1.	TEMPERATURA MEDIA DE LOS CONDUCTORES.....	109
11.2.	INCREMENTO DE TEMPERATURA RESPECTO A LA TEMPERATURA DE ENTRADA EN CADA CONDUCTOR	109
11.3.	DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO MÁSIICO	110
11.4.	TEMPERATURAS MÁXIMAS ALCANZADAS	110
11.5.	NÚMERO DE REYNOLDS A LA ENTRADA	111
11.6.	NÚMERO DE GRASHOF	111
11.7.	DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE LA ENTRADA Y LA SALIDA.....	112
11.8.	DIFERENCIA DE PRESIÓN ENTRE LA ENTRADA Y LA SALIDA.....	112
11.9.	RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE REYNOLDS Y EL NÚMERO DE GRASHOF.....	112
12.	CONCLUSIÓN.....	114
13.	BIBLIOGRAFÍA.....	116

ÍNDICE DE FIGUAS

Figura 1 Sistema eléctrico	14
Figura 2 Transformador ideal [1]	16
Figura 3 Transformador ideal [1]	16
Figura 4 Técnica de devanado de disco [2]	18
Figura 5 Modelo sistema refrigeración (Hydro-Quattro) [4]	19
Figura 6 Modelo con medidas [4]	20
Figura 7 Modelo en CAD de la geometría	21
Figura 8 Modelo en CAD	21
Figura 9 Ejemplo de conductos mostrando el momento y la variación térmica [6]	24
Figura 10 Representación gráfica de un radiador con los diferentes elementos de pérdida de carga elementos [14]	26
Figura 11 Modelo en Design Modeler	27
Figura 12 Medidas parametrizadas	28
Figura 13 Superficies RAC	29
Figura 14 Dimensionamiento 1 del mallado	31
Figura 15 Dimensionamiento 2 del mallado	31
Figura 16 Mallado 1 variación temperatura	34
Figura 17 Mallado 1 variación velocidad	35
Figura 18 Mallado 2 variación temperatura	36
Figura 19 Mallado 2 variación velocidad	36
Figura 20 Resultados aceite mineral	49
Figura 21 Resultados aceite vegetal 1	51
Figura 22 Temperatura media aceite vegetal 1	52
Figura 23 Velocidad media aceite vegetal 1	54
Figura 24 Resultados aceite vegetal 2	55
Figura 25 Temperatura media aceite vegetal 2	56
Figura 26 Velocidad media aceite vegetal 2	58
Figura 27 Resultados aceite vegetal 3	59
Figura 28 Temperatura media aceite vegetal 3	60
Figura 29 Velocidad media aceite vegetal 3	62

Figura 30 Comparación temperatura media [°C].....	65
Figura 31 Comparación incremento temperatura.....	66
Figura 32 Comparación velocidad media [m/s].....	68
Figura 33 Comparación porcentaje de flujo másico [%].....	71
Figura 34 Comparación temperatura máxima [°C].....	72
Figura 35 Comparación temperatura media [°C].....	79
Figura 36 Comparación incremento de temperatura [°C].....	81
Figura 37 Comparación flujo másico cada RAD.....	83
Figura 38 Comparación flujo másico [kg/s].....	83
Figura 39 Comparación distribución del fluido [%].....	85
Figura 40 Comparación temperatura máxima [° C].....	86
Figura 41 Distribución de temperaturas de DP0, DP1 y DP2.....	87
Figura 42 Distribución de temperaturas de DP3, DP4 y DP5.....	88
Figura 43 Distribución de velocidades de DP0, DP1 y DP2.....	89
Figura 44 Distribución de velocidades de DP3, DP4 y DP5.....	90
Figura 45 Comparación temperatura media [° C].....	95
Figura 46 Comparación incremento temperatura [° C].....	97
Figura 47 Comparación de distribución del flujo.....	100
Figura 48 Comparación temperatura máxima [° C].....	101
Figura 49 Comparación número de Reynolds a la entrada.....	103
Figura 50 Comparación número de Grashof.....	105
Figura 51 Comparación diferencia de temperaturas [° C].....	106
Figura 52 Comparación diferencia de presiones [Pa].....	107
Figura 53 Comparación relación Reynolds y Grashof.....	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Medidas parametrizadas.....	28
Tabla 2 Elementos de cada mallado	32
Tabla 3 Propiedades del aluminio.....	33
Tabla 4 Propiedades del aceite mineral.....	33
Tabla 5 Temperatura media en cada conductor.....	38
Tabla 6 Temperatura máxima en cada conductor.....	39
Tabla 7 Velocidad media al paso de cada RAC	40
Tabla 8 Velocidad máxima al paso de cada RAC.....	41
Tabla 9 Diferencias entre tipologías de aceite [13]	45
Tabla 10 Propiedades de cada aceite	46
Tabla 11 Valores de entrada de cada aceite.....	48
Tabla 12 Temperatura media aceite vegetal 1	52
Tabla 13 Velocidad media aceite vegetal 1	53
Tabla 14 Temperatura media aceite vegetal 2	56
Tabla 15 Velocidad media aceite vegetal 2	57
Tabla 16 Temperatura media aceite vegetal 3	60
Tabla 17 Velocidad media aceite vegetal 3	61
Tabla 18 Comparación temperatura media.....	64
Tabla 19 Comparación incremento temperatura	66
Tabla 20 Comparación velocidad media.....	67
Tabla 21 Comparación flujo másico.....	69
Tabla 22 Comparación porcentaje de flujo másico	70
Tabla 23 Comparación temperatura máxima [° C]	72
Tabla 24 Estudio de dimensionamiento	76
Tabla 25 Comparación temperatura media [°C].....	78
Tabla 26 Comparación incremento de temperatura [°C]	80
Tabla 27 Comparación flujo másico [Kg/s]	82
Tabla 28 Comparación distribución del fluido [%].....	84
Tabla 29 Comparación temperatura máxima [° C]	86
Tabla 30 Porcentaje de flujo por cada RAD (%).....	99

Tabla 31 Comparación temperatura máxima [° C]	101
Tabla 32 Comparación número de Reynolds a la entrada.....	103
Tabla 33 Comparación número de Grashof.....	105
Tabla 34 Comparación diferencia de temperaturas [° C]	106
Tabla 35 Comparación diferencia de presiones [Pa]	107
Tabla 36 Comparación relación Reynolds y Grashof	108
Tabla 37 Valores de condiciones de entrada para cada pieza.....	78

1. INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia son componentes críticos del sistema eléctrico y además los más costosos. Por este motivo es de gran importancia obtener la mayor eficiencia posible. Aunque la eficiencia de estos aparatos ronda el 99 %, generan calor. Esto es debido a la resistividad de los conductores y a las corrientes parásitas. Un buen sistema de refrigeración nos permitirá ahorrar costes y aumentar la seguridad.

Dentro de lo compone sistema de refrigeración de un transformador, en este trabajo nos vamos a centrar en la parte donde el fluido refrigerante entra en contacto con el devanado. Esta es la zona donde el fluido refrigera los discos que contienen las bobinas. El bobinado de nuestro sistema se enfría por convección natural (ON) y hemos optado por la elección de un transformador de potencia tipo disco.

El objetivo de este trabajo es realizar un modelo a escala de esta parte del sistema de refrigeración mediante un programa CFD (Dinámica de fluidos computacional) y realizar simulaciones en busca de un modelo óptimo. Para ello haremos diversos cambios tanto en los parámetros de entrada como en nuestra pieza. Utilizaremos diversos aceites, de distintos orígenes. Desde los más usados históricamente, que son los de origen mineral, hasta las nuevas opciones que son los de origen vegetal. Estos últimos van a tomar un papel muy importante y ya se están implementando en este tipo de sistemas de refrigeración gracias a sus muy útiles propiedades. Además, jugaremos con las proporciones de nuestra pieza, viendo como influyen estos cambios en los distintos aceites, siempre buscando la opción que nos permita la mejor refrigeración posible y de la forma más eficiente.

Dentro de nuestro estudio no evaluaremos más allá de los resultados de las simulaciones. Es por ello, que otras características de los aceites como la seguridad, facilidad de obtención o mantenimiento, etc. no se tendrán en cuenta en el estudio, pero si se tienen en el mundo industrial.

2. TRANSFORMADOR DE POTENCIA

Los transformadores de potencia son componentes críticos de las redes eléctricas y por este motivo, tanto los fabricantes como las compañías eléctricas intentan constantemente mejorar su rendimiento y esperanza de vida. Los transformadores son los elementos más costosos del sistema de distribución eléctrica. Su eficiencia y confiabilidad son las que nos garantizan un servicio eléctrico de calidad y son los elementos principalmente responsables de un servicio eléctrico confiable para todos los usuarios. Aunque los transformadores son máquinas muy eficientes ($\eta > 99\%$), sus partes activas generan calor debido principalmente a la resistividad de los conductores y a las corrientes parásitas. Estas pérdidas provocan un calentamiento térmico de los componentes activos y para garantizar el buen funcionamiento del transformador, su temperatura debe mantenerse por debajo de un nivel crítico. Por ello es de gran importancia un buen sistema de refrigeración, que permita que dicho rendimiento sea el mayor posible.

A continuación, se muestra una ilustración del sistema eléctrico (Figura 1). En ella aparecen las fases de generación, transporte, distribución y consumo. Para el paso de una fase a otra se utilizan transformadores de potencia.

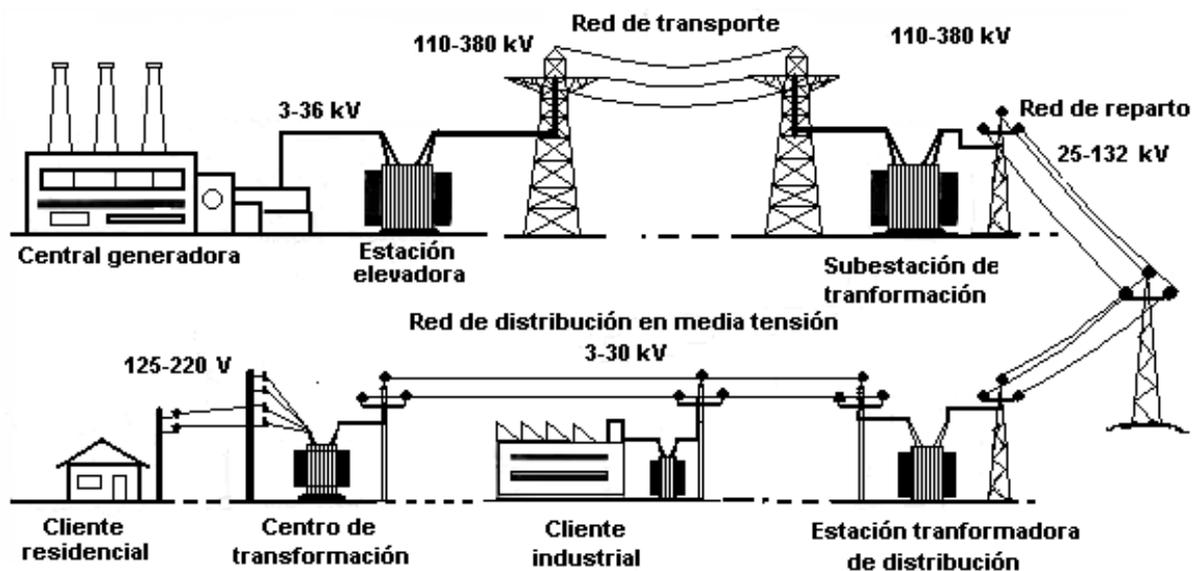


Figura 1 Sistema eléctrico

Los transformadores de potencia son máquinas eléctricas que trabajan de manera estática con corriente alterna y que, aprovechando la inducción electromagnética convierten la electricidad de un voltaje en electricidad con otro voltaje, ya sea de valor superior o inferior. Un transformador consigue esta conversión de voltaje usando una bobina primaria y una bobina secundaria, cada una de ellas devanada en un núcleo ferromagnético y que comprende varios giros de un conductor eléctrico. La bobina primaria se conecta a una fuente de voltaje y la secundaria se conecta a una carga. La proporción de giros de la bobina primaria con respecto a los giros de la secundaria es la misma que la proporción del voltaje de la fuente con respecto al voltaje de la carga y se denomina relación de transformación.[2]

El transporte de la energía eléctrica desde las centrales de generación hasta llegar a los consumidores se realiza en valores de alta tensión (>36 kV). El motivo es porque proporciona una mayor sostenibilidad económica y práctica al sistema, ya que, en valores de AT (alta tensión), para una potencia eléctrica constante, el valor de la intensidad de corriente disminuye notablemente. Todo esto permite reducir las pérdidas por el efecto Joule producidas durante el transporte, además de estrechar el diámetro necesario en los conductores. Como consecuencia a todo esto, se produce un importante ahorro económico y aumento de la eficiencia del sistema. Es aquí donde aparecen los transformadores, primero aumentan la tensión para su transporte y luego otros transformadores la reducen para que dicha electricidad sea usada.

$$P=V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (1)$$

P se corresponde con la potencia nominal, V la tensión eléctrica, I la intensidad de corriente y por último $\cos\varphi$, el factor de potencia de la línea.

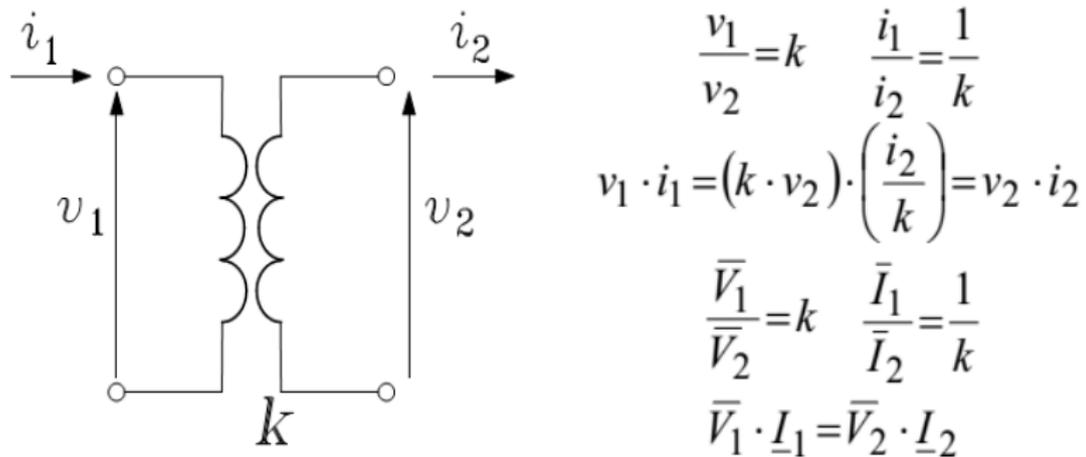


Figura 2 Transformador ideal [1]

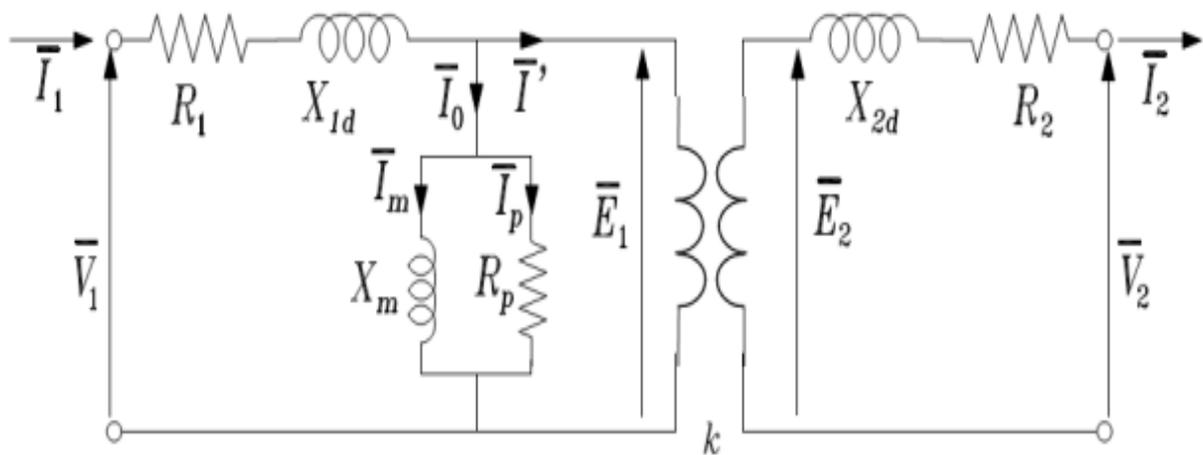


Figura 3 Transformador ideal [1]

En este trabajo vamos a realizar un modelo a escala del devanado de un transformador de potencia tipo disco ON (Figura 4). Para formar las bobinas se utilizan dos técnicas principales de devanado, devanado de capa y devanado de disco. [2] Para devanados de alta tensión con un gran número de giros requeridos, se usa habitualmente la técnica de devanado de disco (elegido en nuestro estudio), mientras que, para devanados de baja tensión con un número menor de giros requeridos, se usa habitualmente la técnica de devanado de capa.

Existen tres métodos para la refrigeración de transformadores:

- Por convección: Mediante el cual se produce un flujo que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas.

- Por conducción: El cual se basa en el flujo de calor de un cuerpo con mayor temperatura a uno con menor, a través del contacto directo.
- Por radiación: Mediante absorción o emisión de ondas electromagnéticas.

El sistema utilizado en este estudio es por convección. Los transformadores refrigerados por convección (tipo ON) se dividen a su vez en dos grupos; por convección natural y por convección forzada. En el primer modo, el flujo es inducido por la acción de la fuerza gravitatoria sobre un fluido de densidad variable. De hecho, la densidad del fluido dieléctrico (aceite refrigerante) no es uniforme en el interior del transformador, ya que existe un gradiente de temperatura elevado entre los devanados y el radiador. El aceite más frío (con mayor densidad) está presente en el interior del radiador mientras que el aceite más caliente (con menor densidad) está presente en los canales de refrigeración de los bobinados y es esta diferencia de peso entre las dos columnas de fluido la responsable del movimiento convectivo del aceite en el transformador. En la convección forzada, la circulación del fluido se realiza mediante una bomba y los caudales pueden ser un orden de magnitud superiores a los observados en el modo de convección natural. [6] A su vez dentro de los transformadores con circulación de aceite de forma natural encontramos distintos tipos; ONAF (oil natural air forced), OFAF (oil forced air forced). [3]

- ONAN: Circulación del aceite en forma natural y enfriamiento por aire en forma natural (por termosifón en ambos casos).
- ONAF: Circulación del aceite en forma natural (termosifón) y enfriamiento por aire en forma forzada (con ventiladores).

El sistema ventilación de Aire Forzado (ONAF) se utiliza convenientemente para reducir el tamaño de los radiadores necesarios para transformadores de gran potencia nominal, que de utilizar el sistema de ventilación de Aire Natural (ONAN) resultaría de dimensiones muy grandes. [3]

En nuestro caso vamos a utilizar un sistema tipo ONAN, tanto la circulación como el enfriamiento será de forma natural, sin la necesidad de aportes externos de energía.

3. GEOMETRÍA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

El modelo a escala del transformador reproduce el circuito cerrado de refrigeración de discos ON que se encuentra en un transformador de potencia. En la siguiente figura se puede ver la forma de dicho devanado (Figura 4).

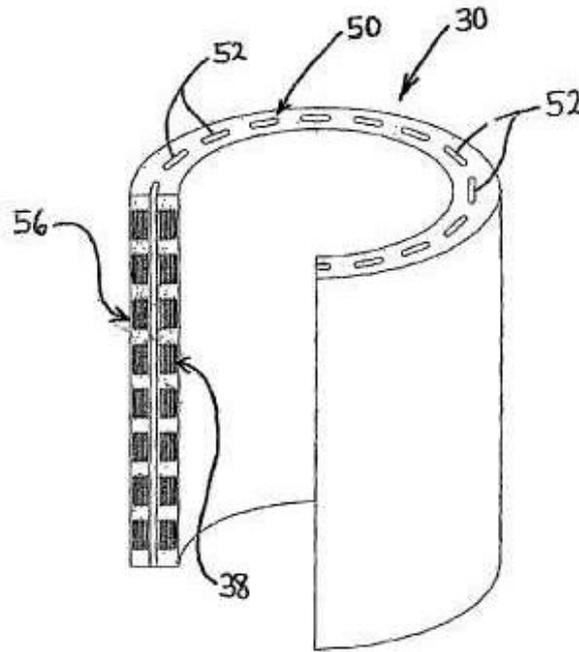


Figura 4 Técnica de devanado de disco [2]

El modelo de transformador que utilizaremos es similar a un transformador de potencia en servicio en Hydro-Quattro [4] (Figura 5). El depósito cilíndrico del devanado está lleno de aceite y está conectado al tanque de refrigeración a través de 18 canales superiores e inferiores. Hay 18 placas del radiador de acero inoxidable que están situadas dentro del depósito de refrigeración, que a su vez está lleno de agua fría. Un circuito de agua independiente y un refrigerador garantizan que la temperatura del agua en el depósito de refrigeración se mantenga constante durante las pruebas (Figuras 5 y 6). El bobinado se enfría por convección natural (ONAN) y los radiadores están elevados con respecto al devanado para que el caudal de aceite sea similar al del transformador de potencia de Hydro-Quattro.[4]

Además, las paredes del tanque de bobinado y las tuberías están aisladas para reducir la transferencia de calor al aire ambiente.

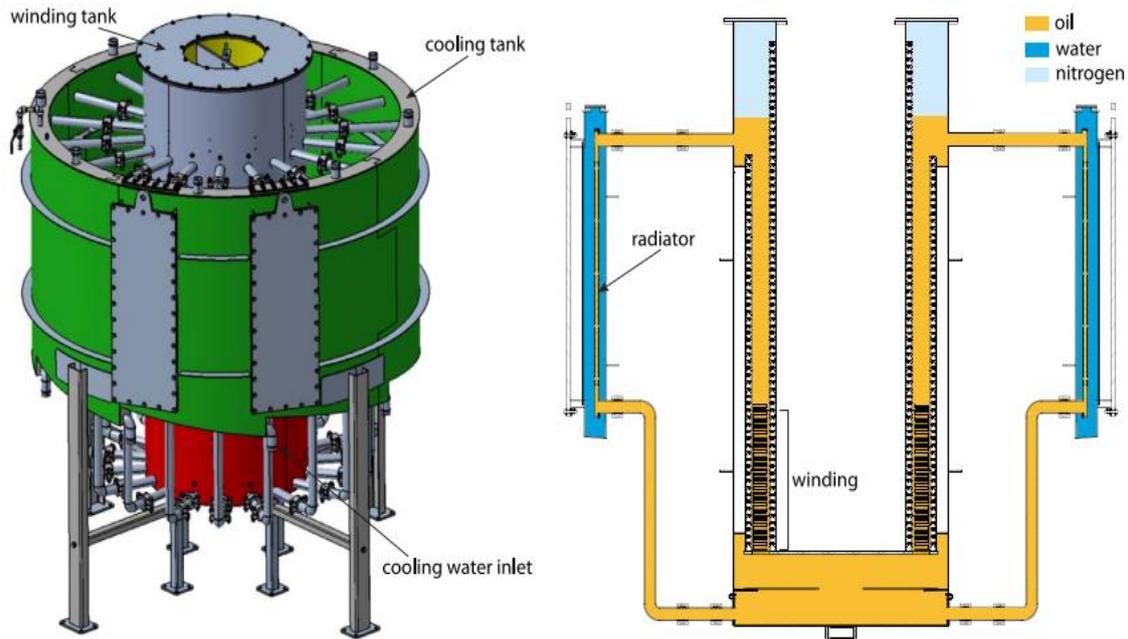


Figura 5 Modelo sistema refrigeración (Hydro-Quattro) [4]

En concreto la pieza que vamos a estudiar corresponde con la que está en contacto con el devanado, no trabajaremos sobre todo el sistema de refrigeración. Un sistema de refrigeración se trata de un circuito formado por tanques, radiadores, etc. como se ve en la Figura 5. Nuestra pieza, que va a ser objeto de todas las simulaciones corresponde con la Figura 6, solo la parte del devanado.[5]

Nuestra pieza del modelo a escala está formada por un cilindro interior y otro exterior. El modelo que vamos a utilizar es en 2D, aunque la pieza tenga forma cilíndrica (Figura 6). Cada cilindro tiene 36 varillas (15 mm de ancho) a lo largo de su circunferencia que crean una serie de conductos axiales, uno interior y otro exterior, con unas longitudes de 9 mm y 6 mm respectivamente. En la base de ambos, 21 discos de 55 mm de longitud y 15,9 mm de altura están apilados. Cada disco está separado de su vecino por 18 espaciadores (29 mm de ancho) a lo largo de la circunferencia que crean una serie de conductos radiales de 4 mm de altura. En el estudio realizado el fluido hará 3 pasadas por todo el devanado. Disponemos de 3 arandelas que separan la pieza en 3 partes (sectores) y cuya función es que el fluido siga siempre el mismo sentido. El primer sector está formado por 5 discos, el segundo por 7 y el último por 9 (en total 21 discos). Los discos del bobinado están formados por dos placas de aluminio entre las que se coloca una serpentina (elemento calefactor). La potencia de cada

disco puede variarse para obtener la distribución de pérdida de calor deseada a lo largo del bobinado.[4][6]

El devanado que se va a estudiar se trata de un modelo en 2D mostrado en la Figura 6. Compuesto por 21 discos, separados en 3 sectores. El fluido recorre toda la pieza de principio a fin enfriando estos discos entrando en contacto con ellos por toda la superficie. El fluido hace 3 pasadas a la pieza. Las Figuras 7 y 8 muestran los modelos CAD utilizados para la representación de la pieza.

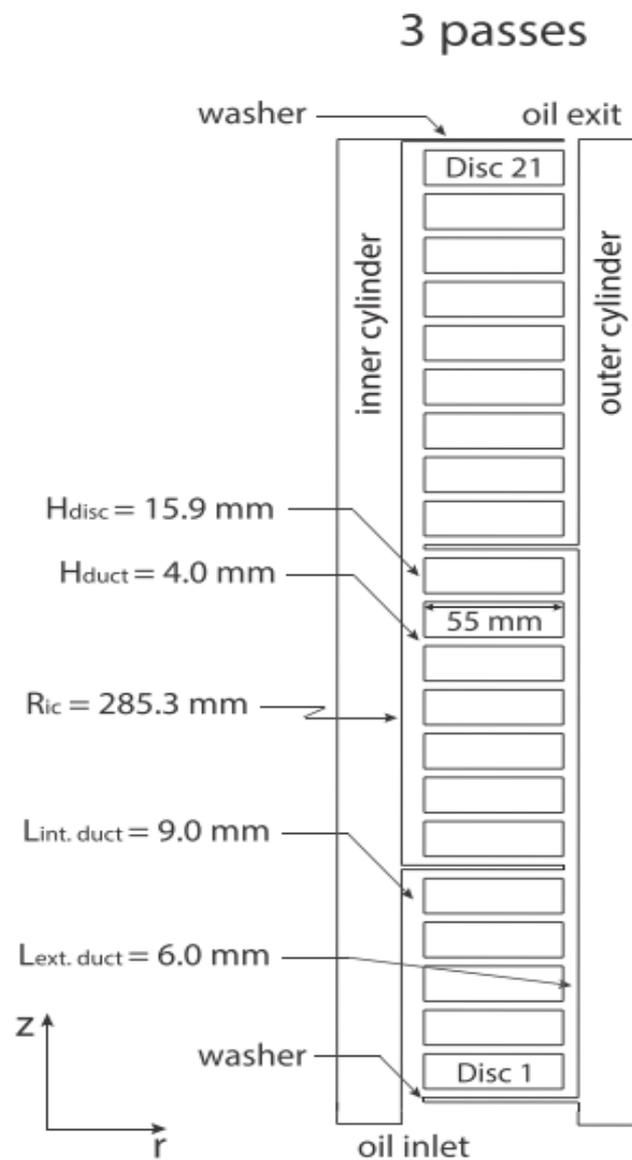


Figura 6 Modelo con medidas [4]



Figura 7 Modelo en CAD de la geometría

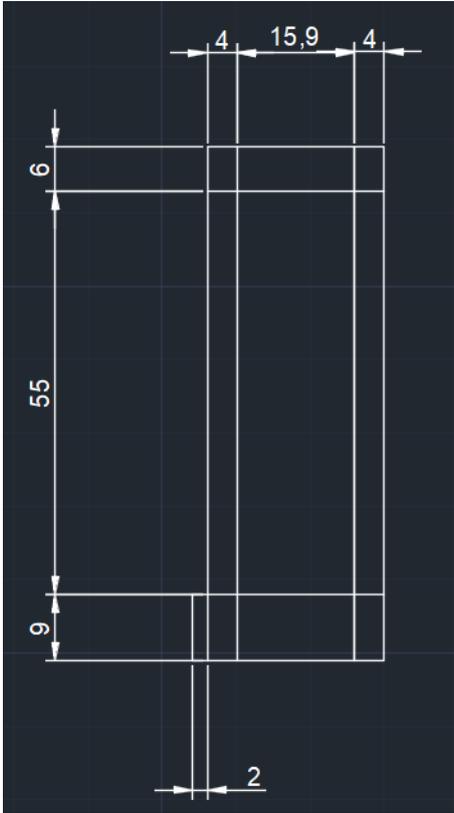


Figura 8 Modelo en CAD

4. ANÁLISIS CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión etc. El CFD se origina a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Su comportamiento se podría estudiar en cada punto del fluido con las ecuaciones de Navier-Stokes (Pág 23), pero son demasiado complejas y por eso se recurre a las simulaciones por ordenador. [18][19]

Los métodos de discretización más difundidos son el método de las diferencias finitas, el método de los elementos finitos y el método de los volúmenes finitos, siendo este último el más utilizado en Dinámica de Fluidos Computacional y el que utilizaremos. Este método consiste en dividir el fluido en pequeños 'bloques' y simular el comportamiento en los vértices de cada uno. Con esos métodos, se intercambia el dominio continuo por un dominio discreto, donde un conjunto de volúmenes de control es utilizado para representar el dominio original.

-Proceso de un análisis CFD:

- 1) Modelado: El primer paso es modelar la pieza u objeto que se quiera estudiar.
- 2) Mallado: Consiste en dividir el modelo en pequeños volúmenes (bloques) y calcular las condiciones del fluido en sus vértices. A partir de ahí, se interpola entre todos esos vértices para extraer las condiciones de todo el fluido. Cuanto más pequeñas sean las divisiones del fluido, más precisa será la simulación, pero también aumentará el coste computacional.
- 3) Ajuste de parámetros: Ahora que el modelo ya está perfectamente construido y mallado, hay que especificar sus características y las del líquido. Hay que especificar unas condiciones de entrada. Esto son las condiciones en las que se encuentra el fluido antes de ser afectado por el objeto, presión, velocidad etc.
- 4) Ejecución de la simulación: Una vez configurados perfectamente el sólido y el fluido, se puede ejecutar la simulación.
- 5) Análisis de los resultados.

4.1. TEORÍA DENTRO DEL ANÁLISIS CFD

Como se ha mencionado con anterioridad, la refrigeración de las bobinas del transformador se consigue mediante un fluido dieléctrico que transporta el calor generado por los devanados hacia los radiadores a través de un sistema de circuito cerrado. [6]

El flujo de fluido en los canales de refrigeración se resuelve mediante las ecuaciones de continuidad y Naviere Stokes (2) que, para un fluido incompresible, pueden escribirse como sigue:

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

En principio hay dos incógnitas, la velocidad \mathbf{U} y la presión p , que son funciones de la posición x y del tiempo t . La posición x recorre toda la región Ω ocupada por el fluido. El tiempo t avanza desde 0 hacia $+\infty$. [9]

Esta ecuación puede escribirse en forma adimensional y se obtienen tres parámetros adimensionales que caracterizan el flujo en el circuito de refrigeración de un transformador:

$$\text{Número de Reynolds} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho \times D \times v}{\mu} = \frac{v \times D}{\nu} \quad (3) \text{ (Pág 102)}$$

$$\text{Número de Grashof} = \frac{g \times \beta \times \Delta T \times l^3}{\nu^2} \quad (4) \text{ (Pág 104)}$$

$$\text{Número de Prandtl} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (5)$$

El número de Reynolds (3) representa la relación entre las fuerzas de inercia y viscosas que actúan sobre un cuerpo fluido, y se utiliza para determinar si el flujo en los canales de refrigeración de los bobinados es laminar ($Re < 2100$) o turbulento ($Re > 4000$) (Pág 102). El segundo parámetro adimensional, Grashof (4), es la relación entre las fuerzas de empuje y viscosas, suele utilizarse para caracterizar los flujos de convección natural (Pág 104). El número de Prandtl (5) expresa la relación entre la difusividad del momento y la difusividad térmica. Este parámetro estima la relación entre la capa límite de momento y la capa límite

térmica en un flujo. Por último, la relación Gr/Re^2 es muy útil para determinar si el flujo está en régimen de convección forzada ($Gr/Re^2 \sim 1$) o natural ($Gr/Re^2 \gg 1$). [6]

Como se muestra en la Figura 9 el sistema de refrigeración de un bobinado de disco consta de una serie de canales horizontales que conectan dos canales verticales. Así, en cada unión, el perfil de velocidad en el canal vertical cambia y el caudal de aceite en esos conductos varía en la dirección axial. Además, el perfil de velocidad en los canales axiales no es simétrico con respecto a la línea central del canal y las velocidades máximas están más cerca de las paredes del disco, donde los gradientes de temperatura (y densidad) son mayores. En los canales horizontales, el flujo nunca está completamente desarrollado, ya que las propiedades del fluido varían a lo largo del canal y la sección del canal no es constante (geometría cilíndrica). En el canal interior debería observarse el comportamiento contrario. La capa límite térmica que se desarrolla en la pared vertical exterior del disco, se conecta con el canal horizontal, por lo que en cada disco debe desarrollarse una nueva capa límite térmica. Por el contrario, la capa límite térmica presente en la pared axial interior del disco ya ha empezado a desarrollarse a lo largo de la parte superior del canal horizontal y, en consecuencia, la temperatura del aceite cerca de la pared interior es mayor [6]. Esta descripción se puede observar en la Figura 9, que es una reconstrucción a escala de lo que es nuestra figura y donde se puede ver la carga del fluido a través de los conductos.

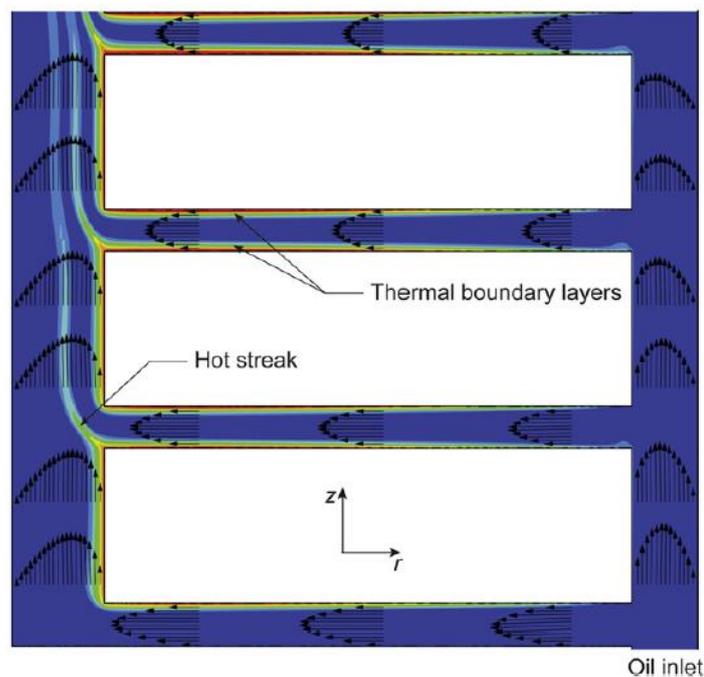


Figura 9 Ejemplo de conductos mostrando el momento y la variación térmica [6]

En el canal vertical interior se aprecia la presencia de una veta caliente, causada por la separación de la capa límite térmica que se desarrolla en la pared vertical interior del disco. Si la velocidad de flujo en el canal horizontal es suficientemente alta, la raya caliente es dirigida hacia el centro del canal interior, mientras que, si la velocidad de flujo es demasiado baja, la raya caliente permanece mucho más cerca de las paredes verticales del disco, aumentando así su temperatura.[6]

4.2. ESTUDIO DE IMPACTO DE LA GEOMETRÍA EN EL FLUIDO

El factor más importante que determina la vida útil del transformador es la temperatura del conductor. La velocidad de envejecimiento de estos materiales es una función exponencial de la temperatura. La mayor parte del esfuerzo se ha dedicado a la modelización correcta de los devanados del transformador, ya que es aquí donde se produce el punto caliente.

Diferentes autores han trabajado en este tema y se han publicado múltiples artículos sobre la modelización de los devanados de los transformadores.[4][5][6]

Físicamente, la temperatura del aceite que entra en el devanado depende de la capacidad de refrigeración externa y del caudal de aceite. Por lo tanto, la refrigeración externa tendrá un impacto directo en las temperaturas de los devanados del transformador, pero también en el caudal total de aceite en el modo de refrigeración ON:[14]

- La distribución del flujo de aceite sobre los radiadores afectará a la caída de presión.
- La distribución de la temperatura del aceite a lo largo de la altura del radiador afectará a la presión del termosifón.

En la mayoría de los modelos de transformadores, los radiadores se modelan mediante ecuaciones físicas muy simples o correlaciones empíricas, lo que limita la precisión de estos modelos. Aunque los radiadores son mecánicamente muy sencillos, su modelización térmica es bastante compleja.

Durante el funcionamiento del transformador, existe una diferencia de presión entre la válvula de entrada y la de salida del radiador. En la Figura 10 se representa gráficamente un

radiador con la identificación de los diferentes elementos de caída de presión y un bucle de aceite.

Los diferentes elementos de pérdida de carga son: [14]

- Pérdida de carga en la entrada
- Pérdida de carga en la válvula superior e inferior del radiador
- Pérdida de carga por fricción en el colector superior e inferior
- Pérdida de carga local para el aceite que pasa por una unión en T divisoria
- Pérdida de carga local para el aceite que se dobla en un panel del radiador
- Pérdida de carga por fricción en los paneles del radiador
- Caída de presión local para el aceite que fluye del panel del radiador al colector inferior
- Pérdida de carga local para el aceite que pasa por una unión en T combinada
- Pérdida de carga sobre la salida

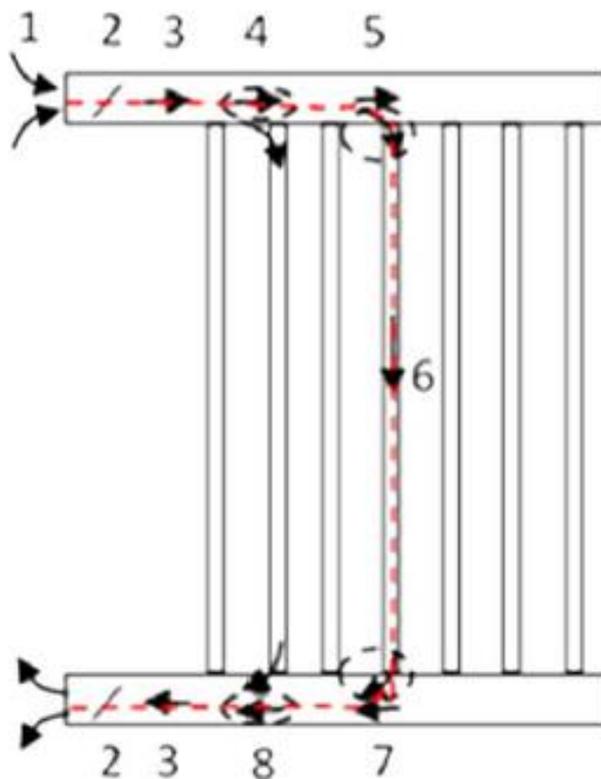


Figura 10 Representación gráfica de un radiador con los diferentes elementos de pérdida de carga elementos [14]

5. ELABORACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN EL PROGRAMA DE ANÁLISIS CFD

Una vez tenemos ya la geometría de nuestro sistema de refrigeración, el siguiente paso es elaborar dicha estructura en el programa CFD. Recordemos que nuestra estructura es en 2D. El programa elegido para todas las simulaciones es Ansys (ANSYS, Inc). Ansys [11] es un desarrollador especializado en ingeniería que da soporte a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno. Más en concreto vamos a utilizar el programa dentro de Ansys denominado Ansys Fluent, se trata de un software de simulación de fluidos.

Mediante el 'Design Modeler' de Ansys recreamos nuestro modelo a escala. Lo hacemos mediante extrusiones de superficies (Figura 11). Cabe destacar que es muy importante indicar que cada uno de los canales axiales, al igual que las arandelas, están formados por fluido y hay que indicarlo en el programa. Por otro lado, los discos (rectángulos centrales de color más oscuro), son sólidos y hay que indicarlos también.

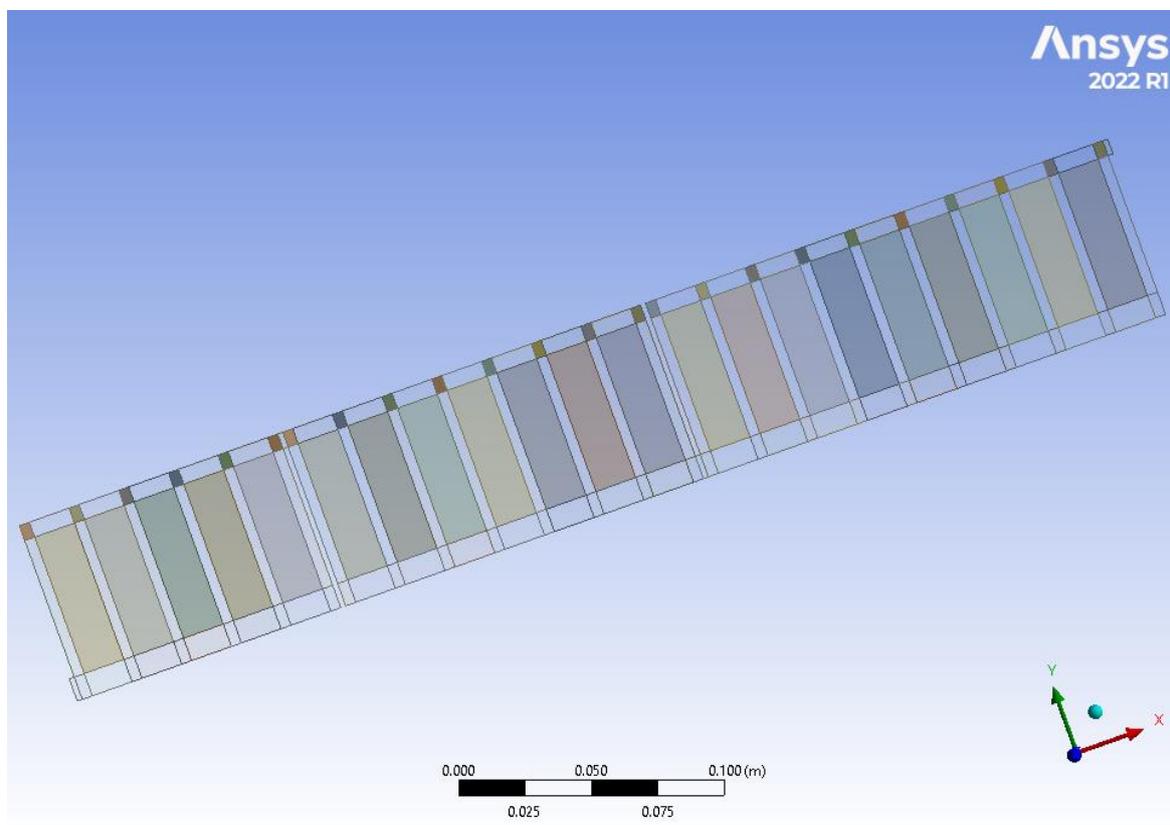


Figura 11 Modelo en Design Modeler

Durante este proceso vamos a parametrizar una serie de medidas (Tabla 1), para que luego sea más sencillo a la hora de realizar cambios de dimensionamiento en el modelo. Si una dimensión es parametrizada, en el momento de cambiar su valor no hace falta cambiar todo el modelo, sino sólo ese parámetro.

Todas estas medidas han sido escogidas porque serán de gran importancia durante todo el ensayo.

5.1. MEDIDAS PARAMETRIZADAS

Tabla 1 Medidas parametrizadas

L2	'Lint, duct'	Sección de entrada y del canal axial que recorre toda la geometría por el lado interior.
L3	'Hduct'	Medida que se corresponde con la sección que circula entre cada conductor de forma transversal.
L4	'Wcond'	Medida del largo del conductor.
L5	'Lext, cond'	Sección de salida y del canal axial que recorre toda la geometría por el lado exterior.
L6	'Hdisc'	Medida del ancho del conductor.

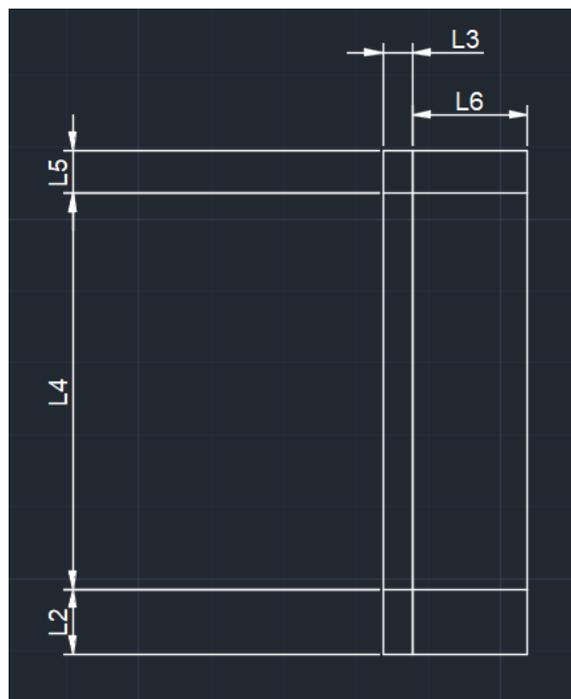


Figura 12 Medidas parametrizadas

6. ELECCIÓN DEL MALLADO DEL SISTEMA

El mallado consiste en dividir nuestra estructura en muchas partes pequeñas denominadas celdas. Esta división se realiza para que el programa estudie en cada simulación lo que ocurre en cada una de esas celdas. Cabe destacar que cuantas más celdas existan y sean de menor tamaño, los resultados serán más precisos y se ajustarán más a la realidad. Por otro lado, las simulaciones serán más complejas y se necesitarán más tiempo y recursos. El límite de celdas lo hemos establecido alrededor de 500.000 celdas.

Para elegir el sistema de mallado hemos realizado 2 modelos con celdas de dos tamaños distintos. El primer mallado tiene un tamaño de 0,2 mm por elemento (celda 0,2×0,2 mm) y el segundo mallado tiene un tamaño de 0,1 mm (0,1×0,1 mm). Estos modelos se someterán a ensayo a igualdad de condiciones y estudiaremos los resultados para ver cuál es el óptimo.

Una vez elegidos los tamaños de los elementos de ambos mallados trataremos de cambiar la geometría de alguna de las superficies, buscando obtener más elementos (más información), dónde las propiedades del fluido vayan a variar más y por ello la información es más valiosa. Estas regiones estarán cerca de los cambios de sección, giros del fluido, cerca de los discos que generan calor etc. Por otro lado, en las regiones que pensemos que el fluido vaya a verse sometido a menos cambios no es necesario tener tantos elementos.

El primer cambio que haremos es en un lateral de los discos (Figura 14), en cada extremo de dicha sección hay dos intersecciones dónde se unen los canales que se ubican entre los conductores. Al juntarse el fluido de dos sendas distintas generará cambios en su velocidad, presión etc. Por este motivo en esta zona necesitaremos más información y modificamos la sección para tener más celdas a los extremos. En cambio, en el centro de dicha región el comportamiento del fluido es mucho más estable y por ello no necesitamos tantos elementos.

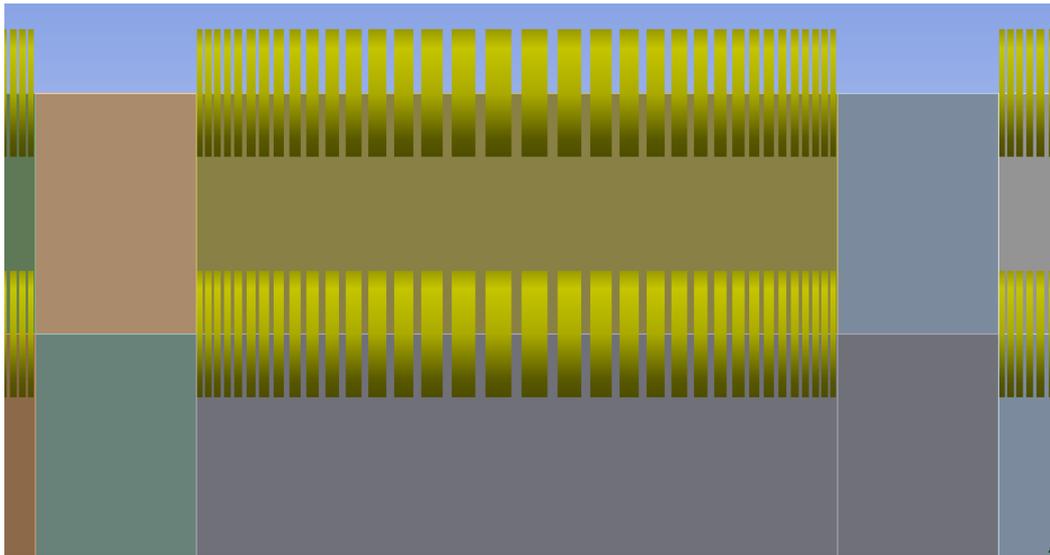


Figura 14 Dimensionamiento 1 del mallado

Esto mismo ocurre en los canales que separan los discos, pero en mayor medida, al ser una sección mucho más larga (Figura 15). Otra vez nos interesa la información en las esquinas mientras que en la parte media de la sección las condiciones apenas varían. Este es el segundo cambio que haremos.

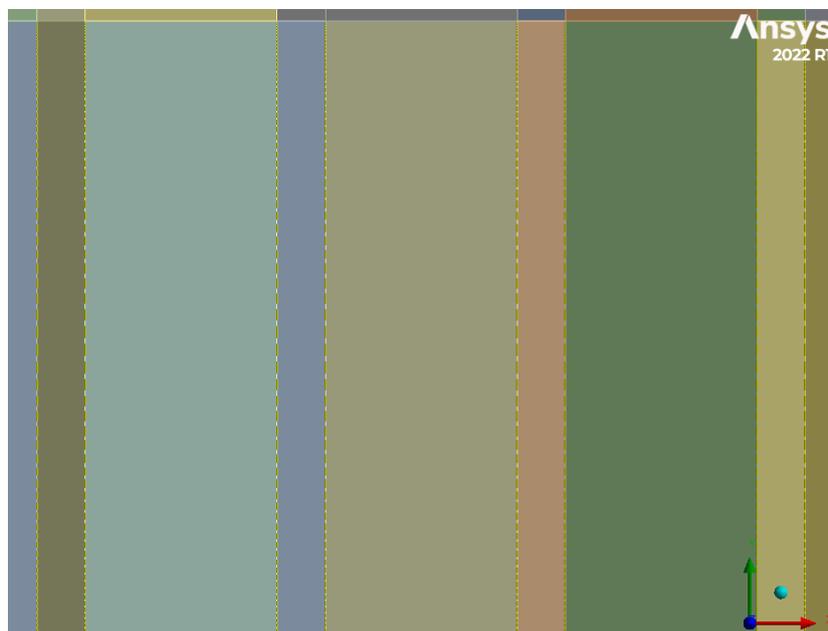


Figura 15 Dimensionamiento 2 del mallado

Una vez realizados estos dos cambios, obtenemos un primer mallado (0.2 mm) donde, a lo largo de la distancia 'Wcond' hay 85 elementos y a lo largo de 'Hdisc' 34 elementos. El número de celdas totales en el mallado 1 es de 192.540. Aun siendo un número muy grande, queda

lejos del límite de 500.000. Por este motivo el siguiente mallado tiene muchos más elementos, buscando una mayor precisión.

El segundo mallado (0,1mm), consta de 111 elementos a lo largo de la distancia 'Wcond' y de 46 elementos en la componente 'Hdisc'. El número de celdas del mallado 2 es de 508.686 en total. Este número sobrepasa por un poco los 500.000 que habíamos marcado en un principio, pero lo despreciamos, al ser una diferencia muy pequeña. Hemos optado por esta medida en cada celda, para ver si las simulaciones se pueden realizar sin problemas, debido a que con tantos elementos tendremos una muy buena precisión en los resultados. Habrá que ver el tiempo empleado en cada simulación.

Tabla 2 Elementos de cada mallado

	Mallado 1	Mallado 2
Tamaño de cada elemento (mm)	0,2	0,1
N° elementos en 'Wcond'	85	111
N° elementos en 'Hdisc'	34	46
N° total de elementos	192.540	508.686

Gracias a un mayor número de elementos, el segundo mallado nos dará una simulación que se ajuste más a la realidad. Ahora realizaremos una prueba para comprobar si dicha precisión merece la pena y si obtenemos grandes diferencias con el primero. Cabe destacar que con un mayor número de celdas el tiempo de simulación y los recursos del ordenador son mucho mayores. Puede ocurrir que esa precisión de más no cambie apenas los resultados y no merezca la pena por tanto la elección del mallado 2. Ahora hay que comprobar estas suposiciones simulando ambos casos a igualdad de condiciones.

En esta simulación y en las posteriores, nuestra estructura estará hecha de aluminio. Normalmente los conductos de los sistemas de refrigeración de los transformadores eléctricos de estas características están hechos de este material. Las propiedades del aluminio usado en nuestra pieza se ven en la Tabla 3.

Tabla 3 Propiedades del aluminio

Densidad [kg/m^3]	2699
Calor específico (C_p) [$\text{J} / (\text{kg K})$]	900
Conductividad térmica [$\text{W} / (\text{m K})$]	210

Los elementos que debemos refrigerar son los denominados discos. Estos contienen el devanado del transformador y por tanto la parte que genera calor. Como medida estándar y comparando con transformadores de esta índole [4], hemos elegido para la potencia de cada disco un valor de 1000 W. Teniendo en cuenta la sección del disco ($L4 \times L6$), esto equivale a una potencia de $565.600 \text{ W}/\text{m}^2$, que habrá que introducir en el programa en cada uno de los 21 discos.

Para la simulación vamos a utilizar como fluido un aceite mineral estándar con las características recogidas en la Tabla 4.

Tabla 4 Propiedades del aceite mineral

Densidad [kg/m^3]	870,97
Calor específico (C_p) [$\text{J} / (\text{kg K})$]	1919,35
Conductividad térmica [$\text{W} / (\text{m K})$]	0,1305
Viscosidad [$\text{kg} / (\text{m s})$]	0,00660939
Coefficiente de expansión térmica [K^{-1}]	0,00065
Flujo másico a la entrada [kg/s]	0,697
Temperatura de entrada [$^{\circ}\text{C}$]	42,6

Obtenemos la velocidad de entrada a partir del flujo másico de entrada, la sección de entrada y la densidad de dicho aceite.

Cálculo de la sección. Se trata de un tubo con sus respectivos radios exterior e interior.

$$S = (R2^2 - R1^2) \times \pi$$

$$R1 = Ric = 0,2853 \text{ m}$$

$$R2 = Ric + Lint, \text{ duct} = 0,2853 + 0,009 = 0,2943 \text{ m}$$

$$A = 0,016388 \text{ m}^2 = \text{Sección de entrada del fluido}$$

$$\text{Velocidad(entrada)} = \frac{\frac{\text{Flujo másico de entrada}}{\text{Densidad del fluido}}}{\text{Sección de entrada}} = \frac{\frac{0,697 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}}{870,97 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}}{0,016388 \text{ m}^2} = 4,883 \times 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

En esta simulación y en las posteriores marcaremos la presión de salida como 0 atm. Así será más fácil calcular la diferencia de presión con cada punto de la pieza.

Los datos que vamos a recoger son; las velocidades del fluido en cada RAD y las temperaturas en cada disco (COND), tanto máximas y como medias.

A continuación, veremos los resultados de las simulaciones de ambos mallados. Primero las representaciones gráficas de los campos de velocidades y temperaturas. Después los valores numéricos de estas soluciones.

6.1. MALLADO 1

Tamaño de cada elemento: 0.2 mm

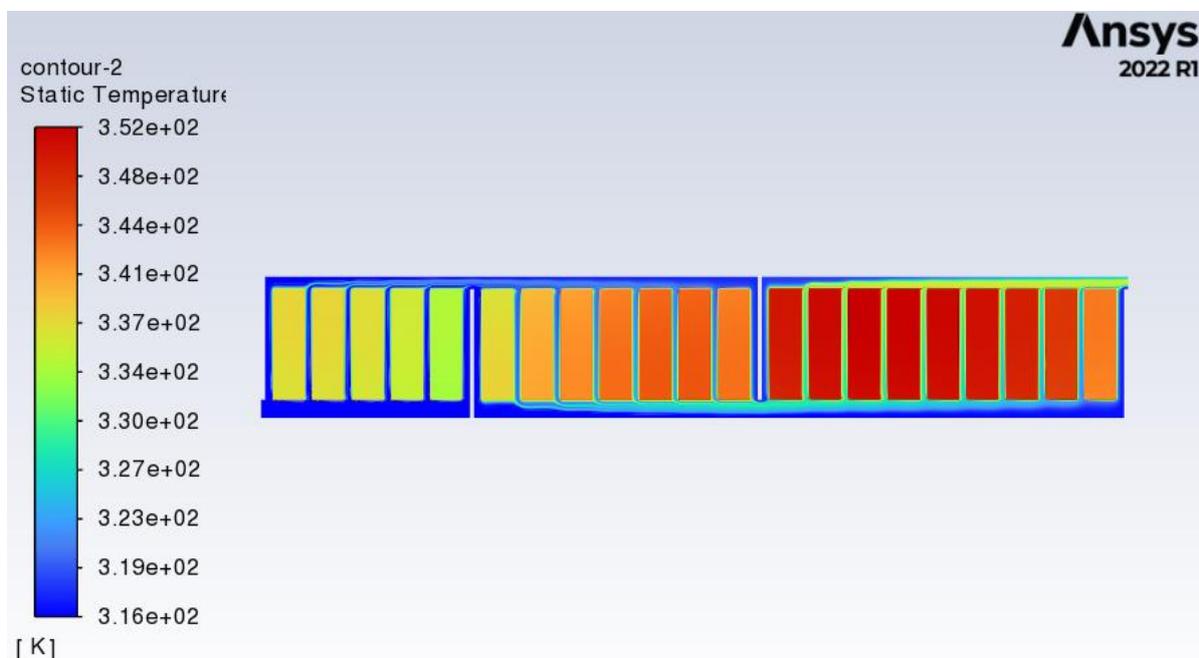


Figura 16 Mallado 1 variación temperatura

Como se puede apreciar las mayores temperaturas en los discos se obtienen en el tercer sector justo después de la última arandela. Estos equivalen a los discos 13-20. Esto es lógico

debido a que el fluido entra en el sistema con una menor temperatura y esta va aumentando a medida que entra en contacto con los discos y absorbe el calor. Por otro lado, la menor temperatura la tiene el quinto disco. En cuanto a la temperatura del fluido en los canales, se ve como en el segundo sector empieza a tomar tonos amarillentos a lo largo del conducto axial y como aumenta a medida que pasa por cada uno de los discos, alcanzando su máximo justo en la salida.[7]

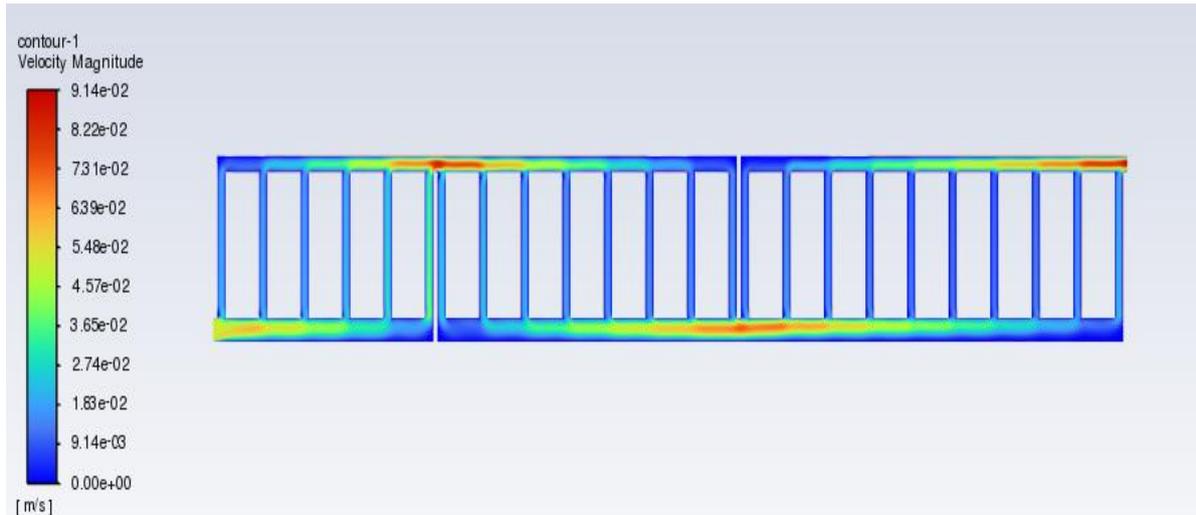


Figura 17 Mallado 1 variación velocidad

Como era de esperar las velocidades mayores se encuentran en los puntos donde dos sendas de fluido se juntan (Pág 24). Esto es debido a que un mayor flujo tiene que estar circulando por la misma sección, aumentan las presiones y por este motivo acelera y aumenta su velocidad (aumenta también el número de Reynolds (3)). Justo en los 2 puntos de separación y en el tramo de salida se obtienen los tonos más rojizos y por lo tanto las mayores velocidades. Cabe destacar, la entrada del fluido en la pieza, en esta zona el flujo no está nada desarrollado y tiene mayores velocidades que el resto de la pieza.

6.2. MALLADO 2

Tamaño de cada elemento: 0.1 mm

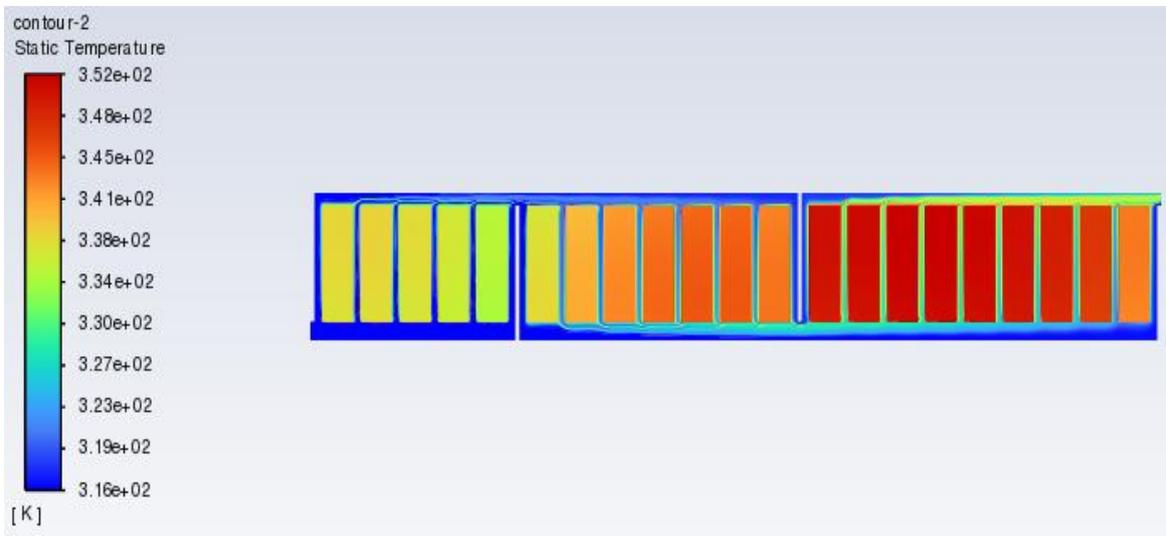


Figura 18 Mallado 2 variación temperatura

Igual que en el caso de la Figura 16, en la Figura 18 se aprecia que las mayores temperaturas en los discos se obtienen justo después de la última arandela (separación sectores 2 y 3). Estos equivalen a los discos números 13-20. Por otro lado, la menor temperatura la tiene el quinto disco. En cuanto a la temperatura del fluido se ve como en el último sector es mayor que en el resto de la pieza, alcanzando su máximo justo en la salida. Se observa un ligero cambio de temperaturas respecto al otro mallado en los discos centrales, pero el mayor cambio se aprecia en el conducto axial externo a medida que se acerca la salida, los tonos amarillentos aparecen en una mayor medida que en el mallado 1.

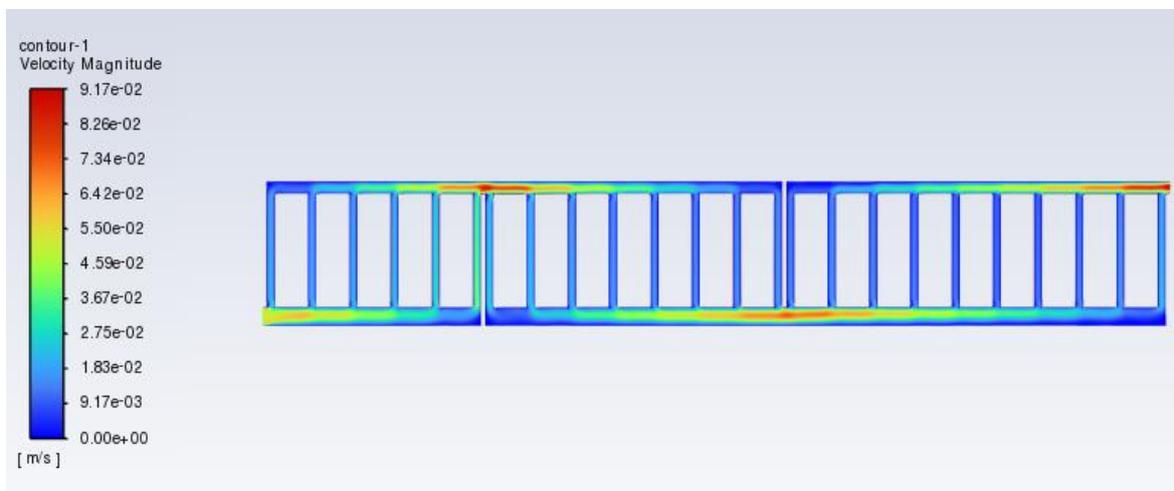


Figura 19 Mallado 2 variación velocidad

La figura 19 es bastante pareja a la Figura 17, prácticamente no se divisa ningún cambio. Las velocidades mayores son en los puntos donde dos sendas de fluido se juntan. Esto es debido a que un mayor flujo tiene que estar pasando por la misma sección y por este motivo acelera y aumenta su velocidad. Justo en los 2 puntos de separación y en el tramo de salida se obtienen los mayores valores. Un poco por detrás, pero con valores también mayores al resto de la pieza está la entrada del fluido.

Hasta el momento todos los datos obtenidos son gráficos y con ellos nos podemos hacer una idea clara de cómo varían las propiedades del aceite a lo largo de la pieza, tanto las temperaturas como las velocidades del fluido.

Las próximas tablas obtenidas son los valores numéricos de la simulación. Nos permiten tener ya una idea precisa de las dimensiones de estos resultados. Además, gráficamente no es posible apreciar determinados cambios, mientras que con los siguientes resultados podremos ver la verdadera magnitud de las variaciones en los resultados.

Tabla 5 Temperatura media en cada conductor

CONDUCTOR	MODELO 1	MODELO 2
cond-1	64.306651	64.581549
cond-2	64.465801	64.827915
cond-3	63.858751	64.230334
cond-4	62.667176	62.994505
cond-5	61.141522	61.616054
cond-6	64.340263	64.258121
cond-7	67.196063	67.210659
cond-8	68.563402	69.068784
cond-9	70.120179	70.663236
cond-10	71.105661	71.544818
cond-11	71.307365	71.569596
cond-12	70.06559	70.289111
cond-13	76.175621	77.084312
cond-14	77.42254	77.881433
cond-15	78.137556	78.627614
cond-16	78.066493	78.574925
cond-17	77.656313	78.196769
cond-18	76.816097	77.328268
cond-19	75.560179	76.086642
cond-20	73.477652	73.925826
cond-21	69.644179	69.945164
Total	70.575955	70.976459

Los valores, como se puede observar en la Tabla 5, oscilan entre un mallado y el otro con hasta 0,6 °C de variación máxima y la mayoría de ellos en torno a los (0,4 - 0,5) °C. Esto supone un cambio significativo, se trata de una diferencia de temperaturas importante y se tendrá en cuenta en la elección del mallado.

Tabla 6 Temperatura máxima en cada conductor

CONDUCTOR	MODELO 1	MODELO 2
cond-1	64.650385	64.922296
cond-2	64.777643	65.139551
cond-3	64.1383	64.51507
cond-4	62.923242	63.2492
cond-5	61.374292	61.848199
cond-6	64.755151	64.681024
cond-7	67.594293	67.617853
cond-8	68.933923	69.435144
cond-9	70.460748	71.00625
cond-10	71.422845	71.863702
cond-11	71.601068	71.86178
cond-12	70.33053	70.554163
cond-13	76.475885	77.3659
cond-14	77.745905	78.19964
cond-15	78.443231	78.930109
cond-16	78.355249	78.863367
cond-17	77.93017	78.472131
cond-18	77.072137	77.586755
cond-19	75.803186	76.330652
cond-20	73.706689	74.155908
cond-21	69.859277	70.160486
Net	78.443231	78.930109

Ocurre lo mismo que para la Tabla 5, cambios del orden de (0,4-0,5) °C. En este caso coge mayor importancia aun, porque la máxima temperatura de la pieza tiene que mantenerse por debajo de unos márgenes establecidos, y esta diferencia puede resultar un gran cambio.

Tabla 7 Velocidad media al paso de cada RAC

RAD	MODELO 1	MODELO 2
rad-1	0.013110611	0.013184019
rad-2	0.012858135	0.012830684
rad-3	0.013996503	0.013881047
rad-4	0.016593144	0.016401956
rad-5	0.021189477	0.020945052
rad-6	0.028823434	0.028565144
rad-7	0.020787968	0.02060834
rad-8	0.021473595	0.021170207
rad-9	0.017715506	0.017314843
rad-10	0.014955906	0.014618486
rad-11	0.012899342	0.012592308
rad-12	0.011445276	0.011213665
rad-13	0.010591864	0.010473031
rad-14	0.010969834	0.010919602
rad-15	0.009391648	0.009281742
rad-16	0.011846255	0.011665623
rad-17	0.011873232	0.011677382
rad-18	0.011844304	0.011621576
rad-19	0.012062493	0.011788532
rad-20	0.012543433	0.012229005
rad-21	0.013316377	0.012973032
rad-22	0.014504813	0.014156771
rad-23	0.016374117	0.01605071
rad-24	0.01899777	0.018745151
Net	0.015006877	0.01478783

Numéricamente las diferencias de velocidad media son del orden de 1×10^{-4} m/s. Estas variaciones pueden parecer pequeñas, pero en términos de velocidad dentro del sistema no lo son.

Tabla 8 Velocidad máxima al paso de cada RAC

RAD	MODELO 1	MODELO 2
rad-1	0.018550158	0.018769905
rad-2	0.018859155	0.01900582
rad-3	0.021157479	0.021233391
rad-4	0.025906913	0.025918901
rad-5	0.034314707	0.034344811
rad-6	0.04900369	0.0492214
rad-7	0.028952511	0.029218707
rad-8	0.028340723	0.028512483
rad-9	0.023239959	0.023146614
rad-10	0.01960903	0.019498663
rad-11	0.016908165	0.016793165
rad-12	0.015090657	0.014985515
rad-13	0.013952188	0.013935442
rad-14	0.014779186	0.014832102
rad-15	0.013187571	0.013104424
rad-16	0.0175536	0.017468991
rad-17	0.017715003	0.017680883
rad-18	0.017625168	0.017563939
rad-19	0.01770062	0.017630909
rad-20	0.018271785	0.018142112
rad-21	0.019434351	0.019281749
rad-22	0.021534704	0.021438614
rad-23	0.025152694	0.025208371
rad-24	0.030233249	0.030448919
Net	0.04900369	0.0492214

Los datos en cuanto a velocidad máxima (Tabla 8) cumplen la misma dinámica que en velocidades medias (Tabla 7), con una variación del orden de 2×10^{-4} m/s.

6.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y ELECCIÓN DE MALLADO

Analizando los resultados tanto gráficos como numéricos vemos que los resultados gráficos no nos permiten ver las diferencias entre los mallados, casi no se aprecian cambios. Lo contrario ocurre en el análisis numérico, donde los resultados sí difieren.

Las temperaturas tanto medias como máximas varían del orden de entre 0,4 y 0,5 °C, mientras que para las velocidades obtenemos un cambio del orden de 2×10^{-4} m/s. Ambas variaciones sí que pueden significar un problema, por lo que el primer mallado no consigue alcanzar los órdenes de calidad que se buscan. Las variaciones en los resultados son muy abultadas y sabemos de antemano que el que más se aproxima a la realidad es el segundo. Además, el tiempo de simulación del modelo 2, que era su principal inconveniente, no es malo y se pueden realizar las simulaciones en intervalos de tiempo que no suponen ningún problema. Como es lógico, estos intervalos de tiempo son mayores que en el primer modelo, pero es posible hacer simulaciones rápidas con él.

Por estos motivos se considera el mallado 2 más adecuado que el primero para el ensayo que vamos a realizar. A partir de este momento el modelo que va a ser utilizado en las próximas simulaciones será el MALLADO 2.

7. ESTUDIO DE TIPOS DE ACEITE

Este trabajo consiste en la simulación y optimización del sistema de refrigeración de un transformador. Una vez tenemos el modelo a escala del sistema y el mallado elegido, es hora de cambiar las condiciones de contorno y empezaremos con el fluido utilizado.

El tipo de aceite utilizado es de vital importancia en la refrigeración de transformadores y por ello clave en este ensayo, ya que cada una de sus propiedades determinará en gran medida los resultados de nuestro estudio, viscosidad, densidad, temperatura de entrada etc. El objetivo es encontrar un aceite con las propiedades necesarias para que la temperatura de los discos no supere unos márgenes. Dentro de cualquier proyecto industrial se valora el precio, mantenimiento, el impacto ambiental etc.

Hasta la fecha en la mayoría de los sistemas refrigeración de transformadores se han venido utilizando aceites de origen mineral (igual que el utilizado en la simulación de los mallados). En los últimos años han aparecido en escena los denominados aceites vegetales que como su propio nombre indica provienen de materia orgánica.

El aceite mineral como dieléctrico ha sido utilizado durante mucho tiempo con resultados satisfactorios. Aunque es muy confiable, tiene algunos problemas inherentes a sus características propias y a su uso, como son, por ejemplo, que se va degradando a medida que se usa el transformador, que existe riesgo de incendio o explosión y que es altamente contaminante.

El uso del aceite vegetal nace como una respuesta a las necesidades de utilizar líquidos más seguros y ecológicos. Haciendo que los transformadores sean elementos más confiables. Los aceites vegetales ofrecen varias ventajas, incluyendo que tienen una alta biodegradabilidad en una gran mayoría de los casos, su alta temperatura de ignición, alta conductividad térmica, bajo valor calorífico y alta estabilidad de temperatura. Elevar los puntos de ignición del aceite de 160 °C a 360 °C, es quizás su principal ventaja. Después de todo es una tecnología relativamente nueva y se ha incluido en transformadores que están siendo probados alrededor de todo el mundo. Consecuentemente, los aceites vegetales ofrecen una mejor relación costo-beneficio que muchos de los aceites minerales.[12]

Existen varias ventajas para el uso de fluidos dieléctricos en base de aceites vegetales y sintéticos como reemplazo del aceite mineral en transformadores. Los aceites vegetales tienen una gran conductividad térmica, mayor que la del aceite mineral y por ello están mejor adecuados para la regulación de la temperatura del transformador. El punto de ignición y punto de fuego son significativamente altos para los aceites vegetales en comparación con los aceites minerales. Los aceites vegetales pueden mitigar la seguridad de fuego y las preocupaciones de los aseguradores, particularmente en situaciones en donde distancias y dimensiones son pequeñas. Adicionalmente, la combustión de los aceites vegetales no produce agentes tóxicos o elementos no biodegradables. Los aceites vegetales, naturales y sintéticos tienen una estabilidad de temperatura mayor que los aceites minerales, significando esto que pueden estar expuestos a altas temperaturas por largos periodos con menor degradación que la que ocurriría en los aceites minerales. [12]

Dentro de las desventajas, la principal es que debido a que tienen una mayor viscosidad, afecta la velocidad del refrigerante a través de la parte activa del transformador y, en consecuencia, puede afectar al rendimiento general de transferencia de calor. Este aspecto debe ser efectivamente controlado en la etapa de diseño del equipo a través de una elección óptima de los canales y radiadores de nuestro sistema de refrigeración. Otro punto para destacar es que los aceites vegetales tienen tendencia a la gelificación al contacto con el aire y, por tanto, deben utilizarse en taques herméticamente sellados para evitar este fenómeno, lo que dificulta la instalación. [12][13]

Tabla 9 Diferencias entre tipologías de aceite [13]

ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL
<p>Riesgo de incendios:</p> <p>-El punto de inflamación de unos 150 °C, superior al límite de temperatura de funcionamiento.</p>	<p>Seguridad contra incendios:</p> <p>-El punto de inflamación es más del doble del límite de temperatura de funcionamiento, unos 300 °C.</p>
Bajo grado de biodegradación.	Fácilmente biodegradables.
<p>Baja saturación de humedad:</p> <p>-Especialmente a bajas temperaturas, la capacidad dieléctrica puede ser reducida.</p>	<p>Saturación de humedad más de 10 veces mayor:</p> <p>-Mantiene el rendimiento dieléctrico a temperaturas muy bajas.</p> <p>-Reduce la tasa de degradación del papel.</p>
La oxidación puede conducir a la formación de lodos, degradación del papel y problemas dieléctricos.	Muy baja formación de lodos, en algunos casos la oxidación conduce a un aumento de la viscosidad.

Ya hemos vistos las principales diferencias entre las tipologías, ahora toca ver su desempeño dentro de nuestra pieza. Para comprobar estas suposiciones realizaremos una serie de simulaciones con 3 aceites vegetales y un aceite mineral. El aceite de origen mineral será el mismo que hemos utilizado en el ensayo para elección de mallado. Por otro lado, los 3 aceites de origen vegetal son aceites adecuados para sistemas de refrigeración de transformadores. El primer aceite está hecho a partir de soja, el segundo de colza y el tercero se trata de un aceite vegetal sintético. Todos ellos son aceites que están siendo utilizados en la actualidad en transformadores de potencia reales.

Como cada aceite es distinto, cada uno tiene sus propiedades (Tabla 10). Por este motivo, las condiciones de entrada como el flujo másico, la temperatura de entrada, la presión de entrada etc. varían (Tabla 11).

Tabla 10 Propiedades de cada aceite

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	ACEITE VEGETAL 2	ACEITE VEGETAL 3
Densidad [kg/m^3]	870,97	910,59	907,67	955,13
Calor específico (Cp) [$\text{J} / (\text{kg K})$]	1919,35	2006,17	1873,22	1937,85
Conductividad térmica [$\text{W} / (\text{m K})$]	0,1305	0,1654	0,1754	0,1461
Viscosidad [$\text{kg} / (\text{m s})$]	0,00660939	0,02968	0,04133	0,0323
Coefficiente de expansión térmica [K^{-1}]	0,00065	0,000724	0,000705	0,000738

8. ESTUDIO INICIAL

Para poder comparar cada uno de los aceites realizaremos sus respectivas simulaciones igual que hemos hecho en la elección de mallado. Al cambiar las propiedades de cada aceite también lo harán sus condiciones de contorno. El flujo de entrada, la temperatura y velocidad de entrada varían en cada uno de los aceites. Estos valores se han obtenido gracias a una serie de cálculos previos, no realizados en este trabajo (Tabla 11).

Primero simularemos cada uno de los aceites vegetales y veremos las diferencias que hay entre ellos. Después compararemos los resultados con los del aceite mineral, para así ver las diferencias entre las dos tipologías de aceite. Por último, elegiremos uno de entre los tres aceites biodegradables, el que mejores prestaciones obtenga, para su uso en los posteriores estudios.

8.1. CONDICIONES DE CONTORNO

Una vez tenemos los aceites, las condiciones de contorno para nuestra simulación son las mismas que para el ejemplo de elección del mallado. (Págs 33-34)

- Potencia generada en cada disco 565.600 W/m^3 .
- Propiedades de los materiales sacadas de las tablas 2 Y 9.
- Entorno adiabático (no hay conducción hacia el exterior).
- Condiciones e entrada de cada aceite (Tabla 11).

Tabla 11 Valores de entrada de cada aceite

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	ACEITE VEGETAL 2	ACEITE VEGETAL 3
Flujo másico a la entrada [kg/s]	0,697	0,36	0,3094	0,372
Temperatura de entrada [°C]	42,6	37,55	35,24	37,54
Velocidad de entrada [m/s]	0,04883	0,02412	0,0208	0,02376

-Cálculo de velocidad de entrada:

$$\text{Velocidad}(m/s) = \frac{\frac{\text{Flujo másico de entrada}}{\text{Densidad del fluido}}}{\text{Sección de entrada}}$$

Los resultados que vamos a obtener serán tanto gráficos como numéricos. La primera gráfica corresponde con la distribución de temperaturas a lo largo de la pieza. La segunda gráfica corresponde con el campo de velocidades del fluido. Dentro de las tablas evaluaremos las temperaturas y velocidades, mínimas, máximas y medias en cada una de las secciones 'RAC' y 'COND'.

8.2. RESULTADOS DEL PRIMER ESTUDIO

8.2.1. Aceite Mineral

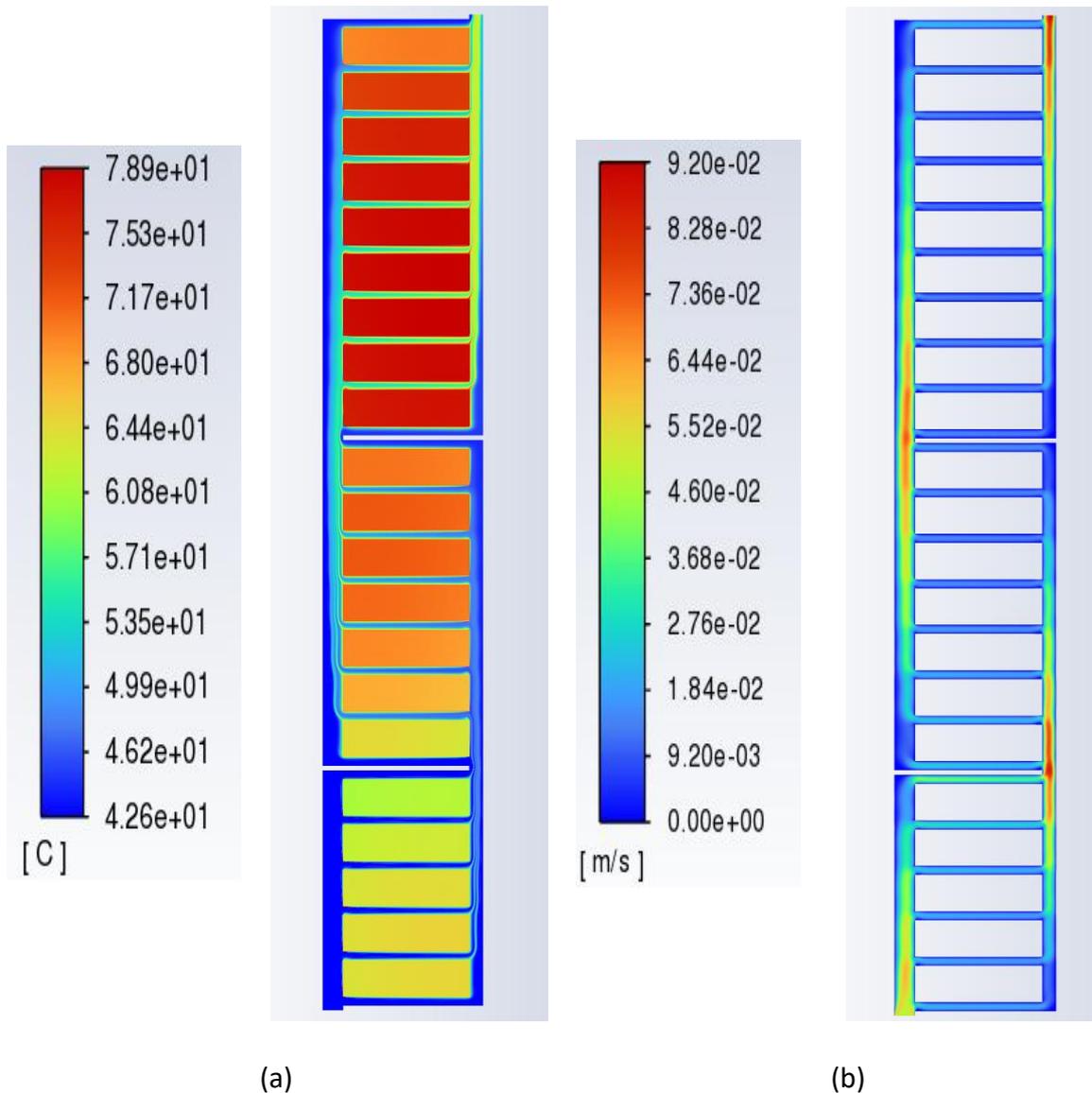


Figura 20 Resultados aceite mineral

La figura 20a se corresponde con la misma distribución de temperaturas que obtuvimos en el estudio de mallado (Figura 18). Como pudimos ver, las mayores temperaturas de los discos se obtienen en los discos del último sector, debido que la temperatura del fluido aumenta a medida que entra en contacto con más discos y por ello pierde capacidad de refrigeración. Los discos que obtienen las temperaturas más altas se encuentran entre los números 15-20. En el caso de la temperatura de los canales, es mayor después de ambas intersecciones

(apartados 4.1 y 4.2), esto corresponde a la salida de los discos 6-20 por un lado y después de la salida pasado por los discos 14 hasta el 21 y salida por el otro. Al tratarse de un aceite de origen distinto al resto, la distribución de temperaturas será también diferente.

La Figura 20b corresponde con el mismo gráfico que en estudio de los mallados (Figura 19). Al igual que en dicha gráfica las velocidades mayores ocurren en los puntos donde dos sendas de fluido se juntan. Esto es debido a que un mayor flujo tiene que estar pasando por la misma sección y por este motivo acelera y aumenta su velocidad (mayor número de Reynolds, apartado 4.1). Justo en los 2 puntos de separación y en el tramo de salida se obtienen los mayores valores. También se obtienen valores altos en la entrada del fluido.

8.2.2. Aceite vegetal 1:

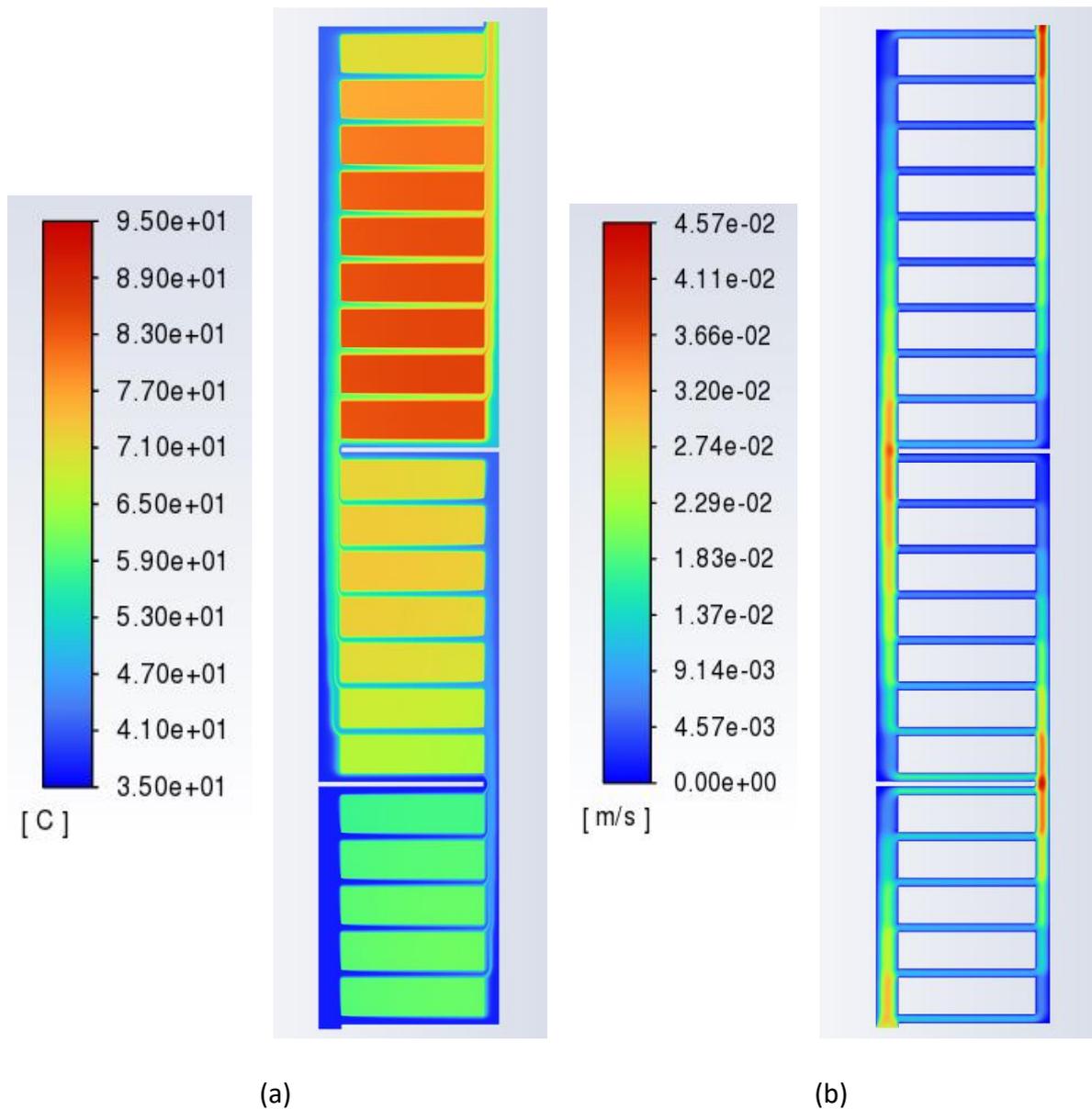


Figura 21 Resultados aceite vegetal 1

En la Figura 21a se puede apreciar un gráfico con un crecimiento más uniforme que en caso del aceite mineral (Figura 20a), además de que las temperaturas son mayores en prácticamente toda la pieza. La temperatura va aumentando en cada disco hasta que alcanza los máximos valores entorno a los discos 13-17. Pasado el disco 17 la temperatura de los discos se va reduciendo de manera uniforme. En el caso de los canales vemos que en último sector alcanzan temperaturas notablemente más altas.

Tabla 12 Temperatura media aceite vegetal 1

ACEITE 1	TEMP MEDIA CONDUCTORES	TEMP MIN CONDUCTORES	TEMP MAX CONDUCTORES
cond-1	60.534176	59.42077	60.864099
cond-2	60.973924	59.918481	61.276239
cond-3	60.794748	59.815729	61.068262
cond-4	59.835401	58.955652	60.07525
cond-5	58.599403	57.81994	58.814539
cond-6	66.241999	65.208063	66.587305
cond-7	68.24068	67.155023	68.610193
cond-8	70.706119	69.635126	71.062219
cond-9	72.344548	71.297601	72.684412
cond-10	72.928633	71.907373	73.262231
cond-11	72.717901	71.748254	73.033533
cond-12	71.815146	70.929956	72.103448
cond-13	84.339344	83.217096	84.652155
cond-14	85.265862	84.124628	85.585992
cond-15	84.975425	83.836664	85.290704
cond-16	84.668399	83.529199	84.98208
cond-17	84.273141	83.135156	84.588281
cond-18	83.097754	81.990045	83.402673
cond-19	80.783661	79.732507	81.072656
cond-20	76.677041	75.727869	76.939447
cond-21	71.331644	70.513605	71.555505
Net	72.91166424	71.88660652	73.21482014

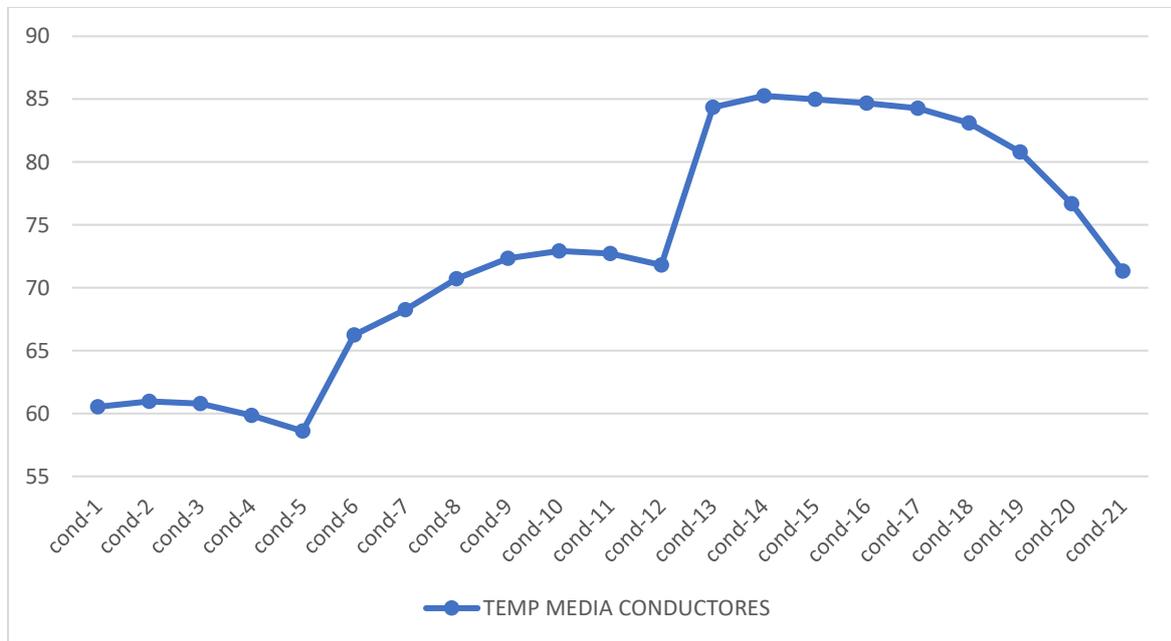


Figura 22 Temperatura media aceite vegetal 1

En la Figura 21b correspondiente con el campo de velocidades se aprecia que al tratarse de un fluido con una mayor viscosidad obtenemos unas velocidades notablemente menores en

toda la pieza que en el caso del aceite mineral (Figura 20b). Los valores de la Tabla 13 lo confirman, la velocidad del fluido es en todo momento menor que en el aceite de origen mineral.

Tabla 13 Velocidad media aceite vegetal 1

ACEITE 1	VEL MEDIA RAD	VEL MIN RAD	VEL MAX RAD
rad-1	0.007500094	0.000481895	0.01051086
rad-2	0.007044575	0.000600443	0.009847837
rad-3	0.007280001	0.000704091	0.010324819
rad-4	0.008272986	0.000998138	0.011803459
rad-5	0.010052958	0.001297081	0.014413275
rad-6	0.012790651	0.001601469	0.018486079
rad-7	0.012324378	0.001602609	0.016992474
rad-8	0.010036453	0.001337432	0.013923992
rad-9	0.007913537	0.00106493	0.011039179
rad-10	0.00632303	0.000821751	0.008857917
rad-11	0.005152051	0.000591318	0.007244847
rad-12	0.004347227	0.000394552	0.006092944
rad-13	0.003929341	0.000374466	0.005398915
rad-14	0.003986354	0.000259087	0.005522782
rad-15	0.00677226	0.000421101	0.009463904
rad-16	0.006366598	0.000554197	0.009046115
rad-17	0.006027186	0.000863245	0.008576436
rad-18	0.006030055	0.001254331	0.008457766
rad-19	0.006299464	0.001603823	0.008656798
rad-20	0.006712887	0.001879545	0.009080121
rad-21	0.007193144	0.002067403	0.009660798
rad-22	0.007739277	0.002166063	0.01041415
rad-23	0.008430797	0.002178703	0.011458507
rad-24	0.009354291	0.002112555	0.012919554
Net	0.00741165	0.001134593	0.010341397

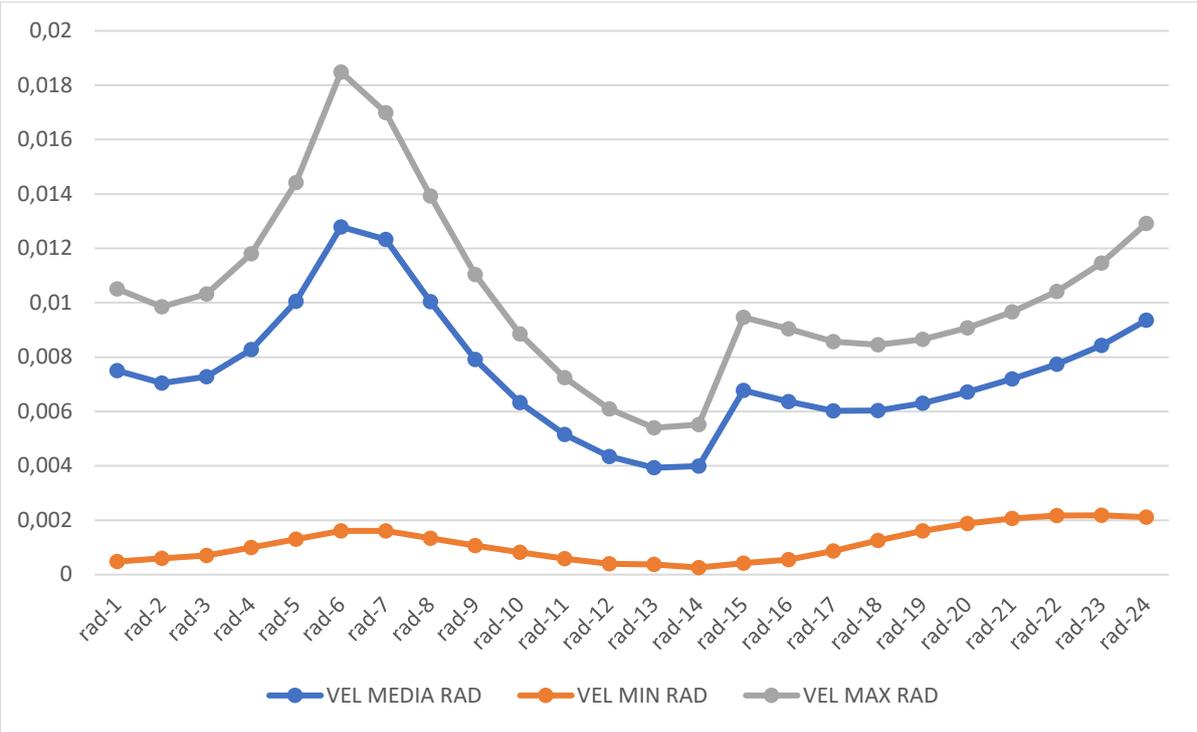
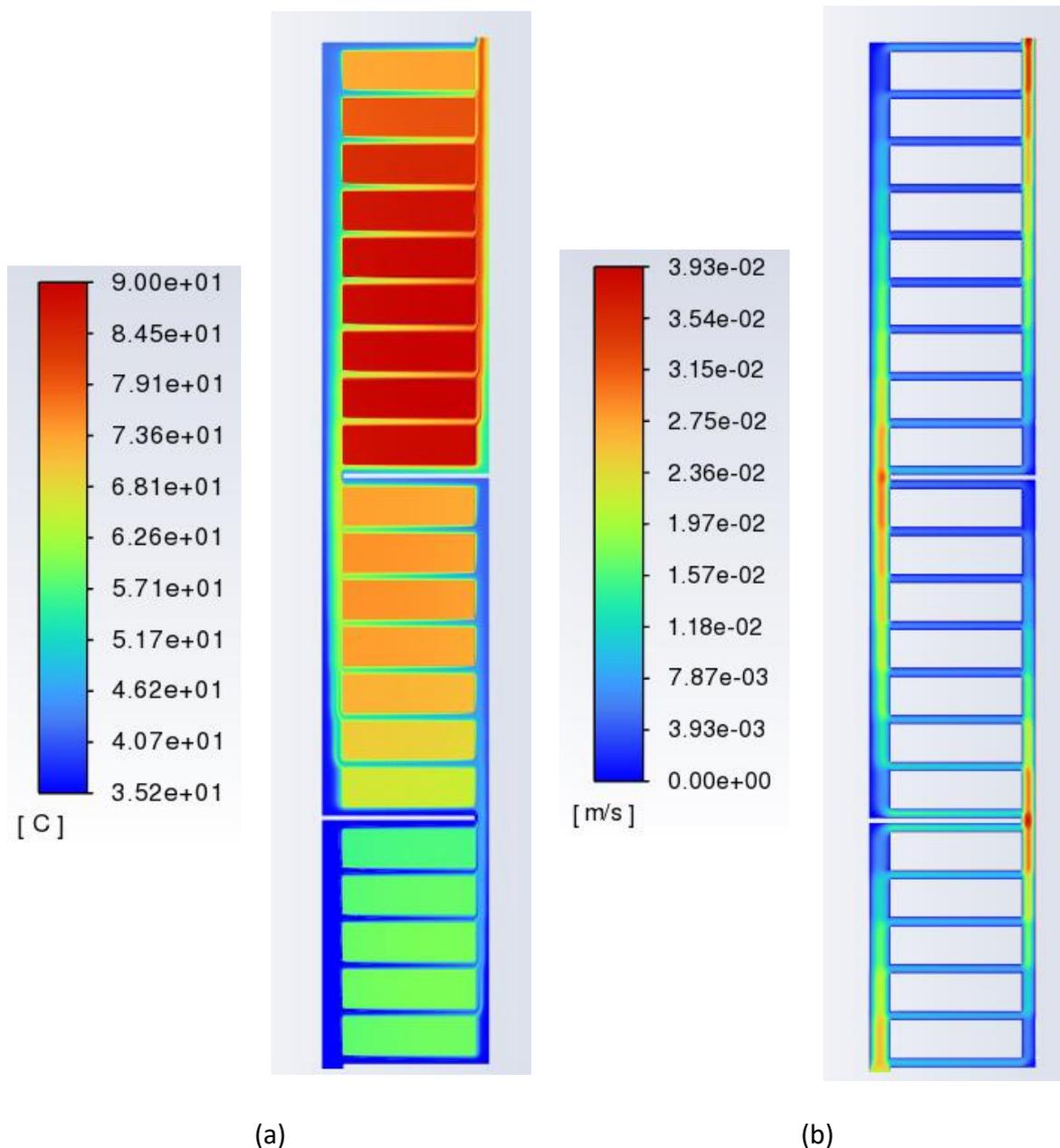


Figura 23 Velocidad media aceite vegetal 1

8.2.3. Aceite vegetal 2:



(a) distribución de temperaturas (b) campo de velocidades.

Figura 24 Resultados aceite vegetal 2

Como se puede apreciar en la Figura 24a el resultado se asemeja más al del aceite vegetal 1 (Figura 21a) que al mineral (Figura 20a). Lógico, al ser ambos de origen vegetal, tienen propiedades similares en comparación con los de otras tipologías. La distribución vuelve a ser más uniforme que en ejemplo del aceite mineral, pero los valores de temperatura son mayores. En este caso vemos colores más rojizos que en la Figura 21a, esto quiere decir que

este aceite no refrigera tan bien como el aceite vegetal 1. Gracias a la comparación entre las Tablas 14 y 12 lo confirmamos. Esto es una clara desventaja a la hora de compararlos.

Tabla 14 Temperatura media aceite vegetal 2

COND	TEMP MEDIA CONDUCTORES	TEMP MIN CONDUCTORES	TEMP MAX CONDUCTORES
cond-1	59.131672	58.015283	59.467859
cond-2	59.861176	58.78811	60.17663
cond-3	59.714738	58.712213	60.003564
cond-4	58.701792	57.806451	58.950891
cond-5	57.345238	56.553796	57.566919
cond-6	66.338122	65.306604	66.684564
cond-7	69.282891	68.182825	69.663782
cond-8	71.964754	70.868951	72.34057
cond-9	73.689888	72.592523	74.064478
cond-10	74.540259	73.451959	74.916925
cond-11	74.504191	73.462457	74.869348
cond-12	73.552595	72.612177	73.8789
cond-13	88.538452	87.44198	88.843591
cond-14	89.668707	88.493494	90.011926
cond-15	89.507043	88.308221	89.857202
cond-16	89.377191	88.154016	89.736993
cond-17	88.96456	87.72561	89.339136
cond-18	87.580629	86.360773	87.951105
cond-19	84.664442	83.510065	85.016656
cond-20	79.749758	78.71319	80.062891
cond-21	73.551224	72.679834	73.806665
Net	74.77282486	73.7019301	75.10526643

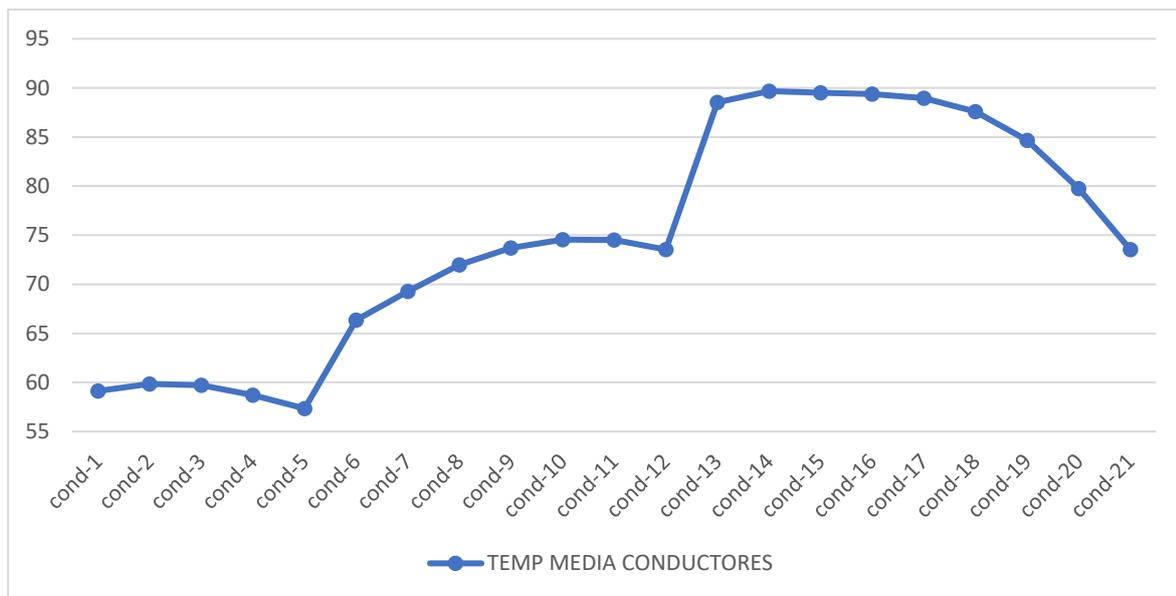


Figura 25 Temperatura media aceite vegetal 2

En la Figura 24b, volvemos a ver una gráfica parecida a la Figura 21b. Este aceite tiene una mayor viscosidad que en el caso anterior, por lo tanto y como vemos en la Tabla 15, las velocidades son menores que en el aceite vegetal 1 (Tabla 13) y mucho menores que en el aceite mineral. Por otro lado, al ser el fluido que se desplaza más lento, es que tiene un intervalo de velocidades más pequeño. Un desplazamiento más uniforme (Figura 26).

Tabla 15 Velocidad media aceite vegetal 2

ACEITE 2	VEL MEDIA RAD	VEL MIN RAD	VEL MAX RAD
rad-1	0.006544007	0.00042453	0.009169767
rad-2	0.006106776	0.000538168	0.008515842
rad-3	0.006290043	0.000607296	0.008897103
rad-4	0.007131184	0.000866659	0.010128981
rad-5	0.008644352	0.001135957	0.012314572
rad-6	0.010928077	0.001402385	0.015640173
rad-7	0.010807287	0.0013719	0.015018664
rad-8	0.008676846	0.00113492	0.012136826
rad-9	0.006800791	0.000901215	0.009546587
rad-10	0.005401584	0.000691869	0.007614684
rad-11	0.004381771	0.000495428	0.006192789
rad-12	0.00369688	0.000330747	0.005203587
rad-13	0.00335906	0.000313815	0.004632718
rad-14	0.003430638	0.000221604	0.004763024
rad-15	0.005959523	0.000377818	0.008325534
rad-16	0.005459368	0.000457375	0.007732675
rad-17	0.005134259	0.000719887	0.007298288
rad-18	0.00514373	0.00107951	0.007210248
rad-19	0.005391872	0.001400042	0.007400388
rad-20	0.005759515	0.001649114	0.007777107
rad-21	0.006181567	0.001816934	0.008286571
rad-22	0.00666179	0.00190298	0.008947692
rad-23	0.007284608	0.001916035	0.009881239
rad-24	0.008144397	0.001866604	0.011212466
Net	0.00638833	0.000984283	0.008910314

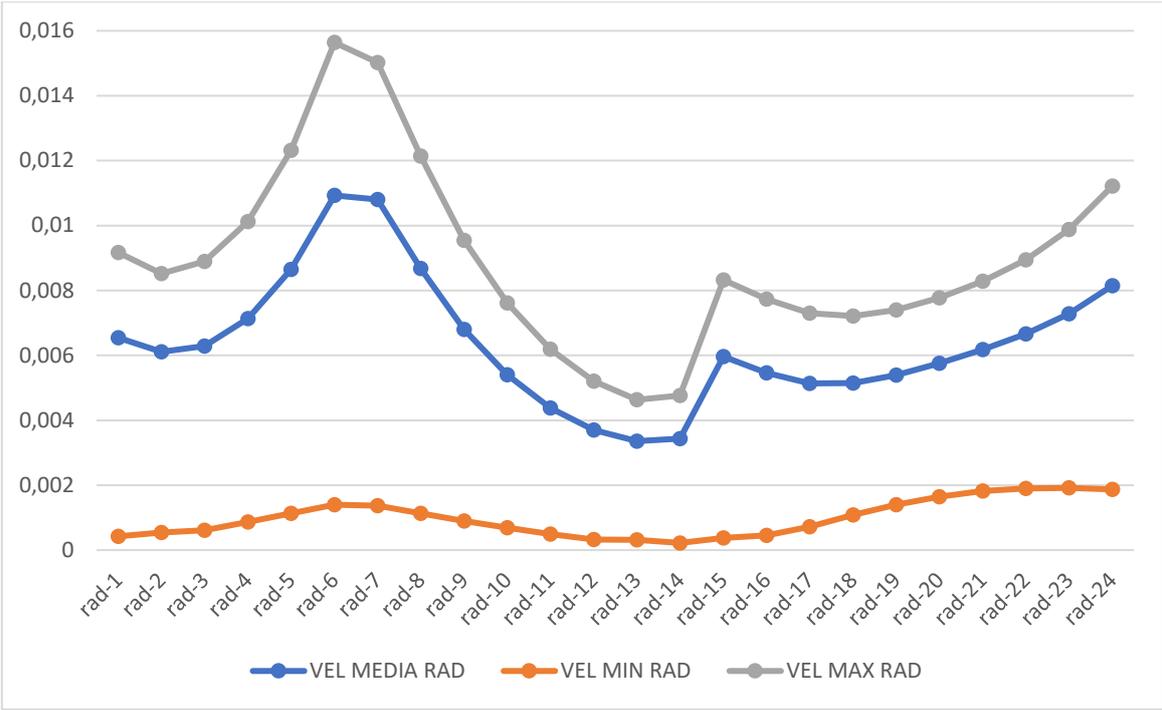
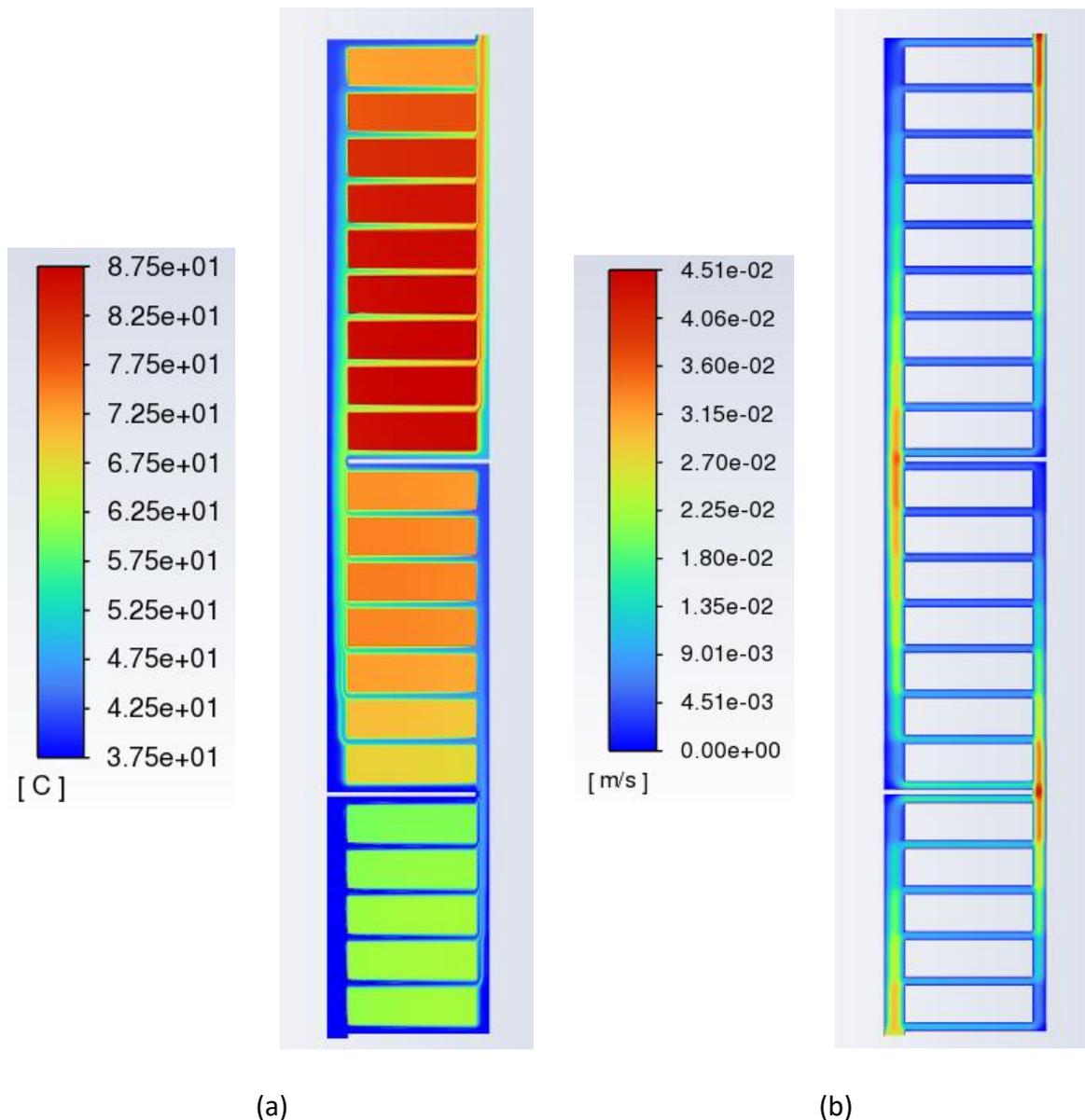


Figura 26 Velocidad media aceite vegetal 2

8.2.4. Aceite vegetal 3:



(a) distribución de temperaturas (b) campo de velocidades.

Figura 27 Resultados aceite vegetal 3

En la Figura 27a vemos un cambio en comparación con los otros vegetales, parte de unas temperaturas menores en los primeros discos (primer sector) y luego alcanza temperaturas mayores en los discos pertenecientes al último sector. Por esto podemos decir que la distribución de temperaturas es menos uniforme que en los otros aceites vegetales. Este cambio se aprecia mejor viendo la Figura 28 en comparación con las Figuras 22 y 24. En la tabla 16, vemos que su capacidad de refrigeración es algo peor que la del aceite vegetal 1, pero mejor que el segundo.

Tabla 16 Temperatura media aceite vegetal 3

ACEITE 3	TEMP MEDIA CONDUCTORES	TEMP MIN CONDUCTORES	TEMP MAX CONDUCTORES
cond-1	62.400951	61.288873	62.728448
cond-2	62.841827	61.790521	63.141229
cond-3	62.609463	61.636621	62.878595
cond-4	61.634333	60.760492	61.871576
cond-5	60.418975	59.639124	60.634241
cond-6	68.264196	67.224939	68.612451
cond-7	70.057407	68.973627	70.425226
cond-8	72.663764	71.599084	73.0151
cond-9	74.353726	73.317407	74.685083
cond-10	74.964771	73.957208	75.287622
cond-11	74.674211	73.727075	74.974847
cond-12	73.645773	72.780908	73.920831
cond-13	86.381695	85.246881	86.699945
cond-14	87.219627	86.087	87.535089
cond-15	86.93782	85.816492	87.245569
cond-16	86.632665	85.516962	86.933405
cond-17	86.216169	85.105402	86.517236
cond-18	85.025881	83.947015	85.316339
cond-19	82.729957	81.71264	83.001825
cond-20	78.577389	77.652887	78.825739
cond-21	72.93756	72.133173	73.15484
Net	74.81848381	73.80544433	75.11453505

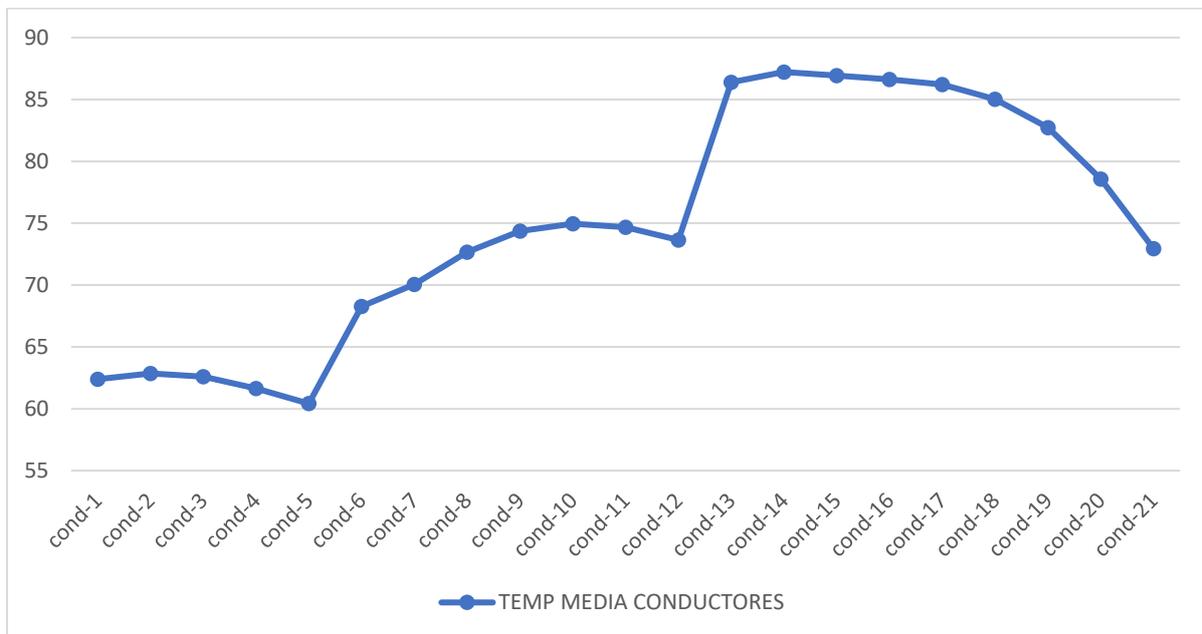


Figura 28 Temperatura media aceite vegetal 3

La viscosidad del fluido se encuentra entre la de los aceites 1 y 2, por este motivo en la Tabla 17 obtenemos unas velocidades con valores entre las otras dos gráficas (Tablas 13 y 15), pero más parecidas al caso del primer aceite.

Tabla 17 Velocidad media aceite vegetal 3

ACEITE 3	VEL MEDIA RAD	VEL MIN RAD	VEL MAX RAD
rad-1	0.00739426	0.000475468	0.010356246
rad-2	0.0069478	0.000595077	0.009700761
rad-3	0.007178122	0.000702892	0.010162652
rad-4	0.008154384	0.000994172	0.011611557
rad-5	0.009904434	0.001289479	0.014175177
rad-6	0.012591978	0.001589915	0.018163692
rad-7	0.012152178	0.001580393	0.01676867
rad-8	0.009887122	0.001315943	0.013725575
rad-9	0.007801756	0.001049162	0.010888195
rad-10	0.006239504	0.000811031	0.008742938
rad-11	0.005088753	0.000584903	0.007156276
rad-12	0.004291594	0.00038974	0.006015255
rad-13	0.003866703	0.000366572	0.005311812
rad-14	0.003899857	0.000253162	0.005400135
rad-15	0.006655371	0.000412107	0.009295663
rad-16	0.006306268	0.000564581	0.008952817
rad-17	0.005980665	0.000871216	0.008491234
rad-18	0.005980484	0.00125335	0.00836871
rad-19	0.006241241	0.001596534	0.008559212
rad-20	0.00664599	0.00186945	0.00897279
rad-21	0.007117395	0.00205727	0.009540831
rad-22	0.007650955	0.002158675	0.010272722
rad-23	0.008313312	0.002173167	0.011268815
rad-24	0.009179167	0.002105327	0.012642225
Net	0.00731122	0.001127483	0.010189332

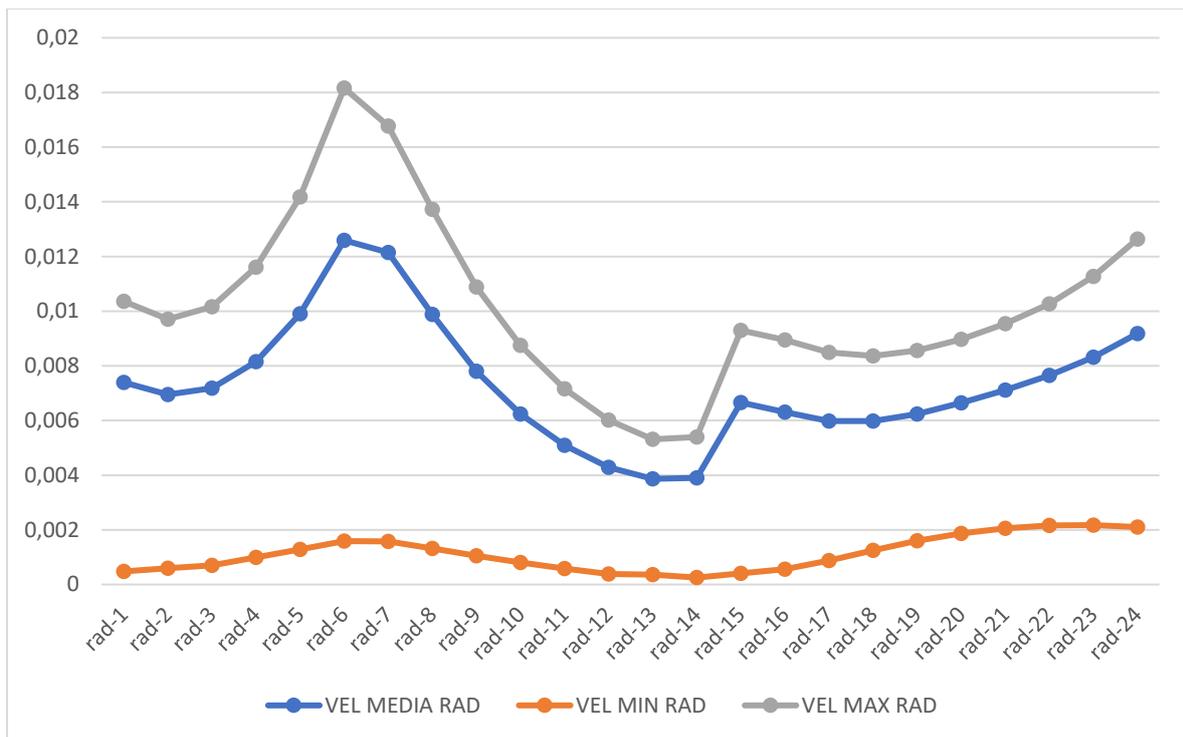


Figura 29 Velocidad media aceite vegetal 3

8.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez obtenidos los resultados ya podemos ver las principales diferencias entre el uso de aceites de origen mineral o vegetal. La principal característica que los difiere es la viscosidad. Esto produce que la velocidad del fluido en el caso de los aceites biodegradables sea mucho menor, repercutiendo en una peor refrigeración.

En este primer análisis de los aceites vegetales vemos que el que mejores resultados ha obtenido es el aceite vegetal 1, seguido del tercero y por último el aceite vegetal 2. Este último tiene la mayor viscosidad y por lo tanto es el más lento.

El siguiente estudio consiste en juntar estos tres aceites junto al aceite mineral y ver de mejor forma sus diferencias en cuanto a rendimiento.

8.4. COMPARACION DE LOS 4 TIPOS DE ACEITE

Una vez realizadas las simulaciones de todos los aceites pasamos a juntar los resultados de todas ellas para poner en valor las diferencias de prestaciones.

Para esta comparación utilizaremos la temperatura media en cada disco/conductor, para todos los aceites. Además, haremos una característica nueva denominada incremento medio de temperatura. Esta variable consiste en la diferencia de temperatura que existe entre cada conductor (COND) respecto a la temperatura de entrada del fluido. Nuestro sistema de refrigeración es autosuficiente y no necesita de un aporte de energía exterior. Cuanto menor sea la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida, menos energía habrá para el trabajo del radiador. Estas dos particularidades nos permitirán ver la capacidad de refrigeración de cada aceite.

Ayudándonos de los datos recogidos de velocidad de paso por cada 'RAC', de la sección que tiene cada región y la densidad de cada aceite, podemos obtener el flujo másico de fluido (kg/s) de paso por cada 'RAC'. Con estos datos y sabiendo el flujo de entrada obtendremos qué porcentaje del líquido total circula en cada parte, y así saber la distribución de este a lo largo de toda la pieza. Cuanto mejor sea la distribución del refrigerante a lo largo de la pieza mejor rendimiento obtiene. Cabe destacar que la suma total del porcentaje ha de darnos 300%, porque como recordemos en nuestro ensayo el fluido hace tres pasadas a la pieza.

Tabla 18 Comparación temperatura media

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	ACEITE VEGETAL 2	ACEITE VEGETAL 3
COND-1	64.581549	60.534176	59.131672	62.400951
COND-2	64.827915	60.973924	59.861176	62.841827
COND-3	64.230334	60.794748	59.714738	62.609463
COND-4	62.994505	59.835401	58.701792	61.634333
COND-5	61.616054	58.599403	57.345238	60.418975
COND-6	64.258121	66.241999	66.338122	68.264196
COND-7	67.210659	68.24068	69.282891	70.057407
COND-8	69.068784	70.706119	71.964754	72.663764
COND-9	70.663236	72.344548	73.689888	74.353726
COND-10	71.544818	72.928633	74.540259	74.964771
COND-11	71.569596	72.717901	74.504191	74.674211
COND-12	70.289111	71.815146	73.552595	73.645773
COND-13	77.084312	84.339344	88.538452	86.381695
COND-14	77.881433	85.265862	89.668707	87.219627
COND-15	78.627614	84.975425	89.507043	86.93782
COND-16	78.574925	84.668399	89.377191	86.632665
COND-17	78.196769	84.273141	88.96456	86.216169
COND-18	77.328268	83.097754	87.580629	85.025881
COND-19	76.086642	80.783661	84.664442	82.729957
COND-20	73.925826	76.677041	79.749758	78.577389
COND-21	69.945164	71.331644	73.551224	72.93756
NET	70.976459	72.911664	74.772825	74.818484



Figura 30 Comparación temperatura media [°C]

El propósito de todo este experimento trata de obtener un aceite que refrigere de la mejor forma nuestro transformador. Por ello y cómo ya hemos dicho en anterioridad es necesario que las temperaturas no superen unos márgenes. El dato de la temperatura media es muy importante (Tabla 18) y estos resultados recalcan la superioridad del aceite de origen mineral respecto a los de origen vegetal.

El aceite mineral (70,97 °C), aun partiendo de una temperatura superior en la entrada y en los primeros discos, a partir del quinto disco obtenemos menores temperaturas y a partir del disco 12 (coincidiendo con el cambio de sector) esta diferencia se acentúa. Esto da a lugar a una media de 2°C menos respecto al mejor aceite de origen vegetal (Tabla 18), que es el aceite vegetal 1 y de 4 °C respecto a los otros dos aceites vegetales.

Por otro lado, los tres aceites vegetales se comportan de manera bastante parecida. La mejor temperatura media es la del aceite 1 (72,9°C), mientras que los otros dos obtiene resultados parejos (aceite vegetal (74,77 °C) y aceite vegetal 3 (74,81 °C).

Tabla 19 Comparación incremento temperatura

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	ACEITE VEGETAL 2	ACEITE VEGETAL 3
T ° ENTRADA	42.6	37.55	35.24	37.54
COND-1	21.981549	22.984176	23.891672	24.860951
COND-2	22.227915	23.423924	24.621176	25.301827
COND-3	21.630334	23.244748	24.474738	25.069463
COND-4	20.394505	22.285401	23.461792	24.094333
COND-5	19.016054	21.049403	22.105238	22.878975
COND-6	21.658121	28.691999	31.098122	30.724196
COND-7	24.610659	30.69068	34.042891	32.517407
COND-8	26.468784	33.156119	36.724754	35.123764
COND-9	28.063236	34.794548	38.449888	36.813726
COND-10	28.944818	35.378633	39.300259	37.424771
COND-11	28.969596	35.167901	39.264191	37.134211
COND-12	27.689111	34.265146	38.312595	36.105773
COND-13	34.484312	46.789344	53.298452	48.841695
COND-14	35.281433	47.715862	54.428707	49.679627
COND-15	36.027614	47.425425	54.267043	49.39782
COND-16	35.974925	47.118399	54.137191	49.092665
COND-17	35.596769	46.723141	53.72456	48.676169
COND-18	34.728268	45.547754	52.340629	47.485881
COND-19	33.486642	43.233661	49.424442	45.189957
COND-20	31.325826	39.127041	44.509758	41.037389
COND-21	27.345164	33.781644	38.311224	35.39756
NET	28.376459	35.361664	39.532825	37.278484

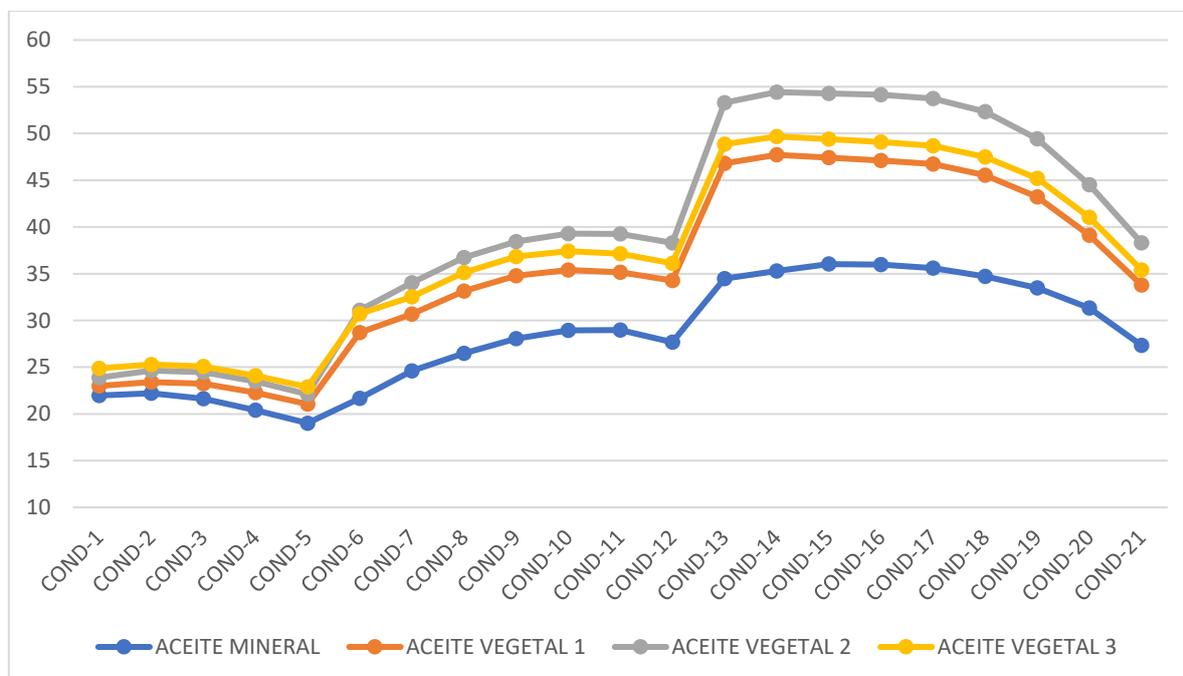


Figura 31 Comparación incremento temperatura

El resultado es la diferencia de temperatura entre cada sección y la temperatura de entrada del fluido en el sistema. (Tabla 19 y Figura 31)

Como ocurría en la tabla de temperatura media (Tabla 18), el aceite de origen mineral obtiene los mejores resultados (28,37 °C), pero esta vez la diferencia es mayor. Esto ocurre debido a que la temperatura de entrada de este aceite es la mayor y después menor para la mayoría de los discos, quitando los cinco primeros (primer sector).

La diferencia entre los incrementos de temperatura en los aceites vegetales es también mayor. Los mejores resultados por este orden son para el aceite 1, luego el 3 y por último el 2. La diferencia entre cada uno es de unos 2 °C, la cual es considerable y dejando en mal lugar al segundo aceite vegetal.

Tabla 20 Comparación velocidad media

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	ACEITE VEGETAL 2	ACEITE VEGETAL 3
RAD-1	0.013184019	0.007500094	0.006544007	0.00739426
RAD-2	0.012830684	0.007044575	0.006106776	0.0069478
RAD-3	0.013881047	0.007280001	0.006290043	0.007178122
RAD-4	0.016401956	0.008272986	0.007131184	0.008154384
RAD-5	0.020945052	0.010052958	0.008644352	0.009904434
RAD-6	0.028565144	0.012790651	0.010928077	0.012591978
RAD-7	0.02060834	0.012324378	0.010807287	0.012152178
RAD-8	0.021170207	0.010036453	0.008676846	0.009887122
RAD-9	0.017314843	0.007913537	0.006800791	0.007801756
RAD-10	0.014618486	0.00632303	0.005401584	0.006239504
RAD-11	0.012592308	0.005152051	0.004381771	0.005088753
RAD-12	0.011213665	0.004347227	0.00369688	0.004291594
RAD-13	0.010473031	0.003929341	0.00335906	0.003866703
RAD-14	0.010919602	0.003986354	0.003430638	0.003899857
RAD-15	0.009281742	0.00677226	0.005959523	0.006655371
RAD-16	0.011665623	0.006366598	0.005459368	0.006306268
RAD-17	0.011677382	0.006027186	0.005134259	0.005980665
RAD-18	0.011621576	0.006030055	0.00514373	0.005980484
RAD-19	0.011788532	0.006299464	0.005391872	0.006241241
RAD-20	0.012229005	0.006712887	0.005759515	0.00664599
RAD-21	0.012973032	0.007193144	0.006181567	0.007117395
RAD-22	0.014156771	0.007739277	0.00666179	0.007650955
RAD-23	0.01605071	0.008430797	0.007284608	0.008313312
RAD-24	0.018745151	0.009354291	0.008144397	0.009179167
NET	0.014787829	0.00741165	0.00638833	0.00731122

Estos resultados (Tabla 20) los obtenemos para luego calcular el flujo en cada sección, que es lo que buscamos. Como ya suponíamos, el que obtiene mayores velocidades es el aceite mineral, muy por delante de los biodegradables, debido a su menor viscosidad.

Dentro de los aceites vegetales el más rápido es el primero, coincidiendo con el que mejor refrigera. Seguido está el aceite vegetal 3 y por último el segundo, que es el que mayor viscosidad tiene.

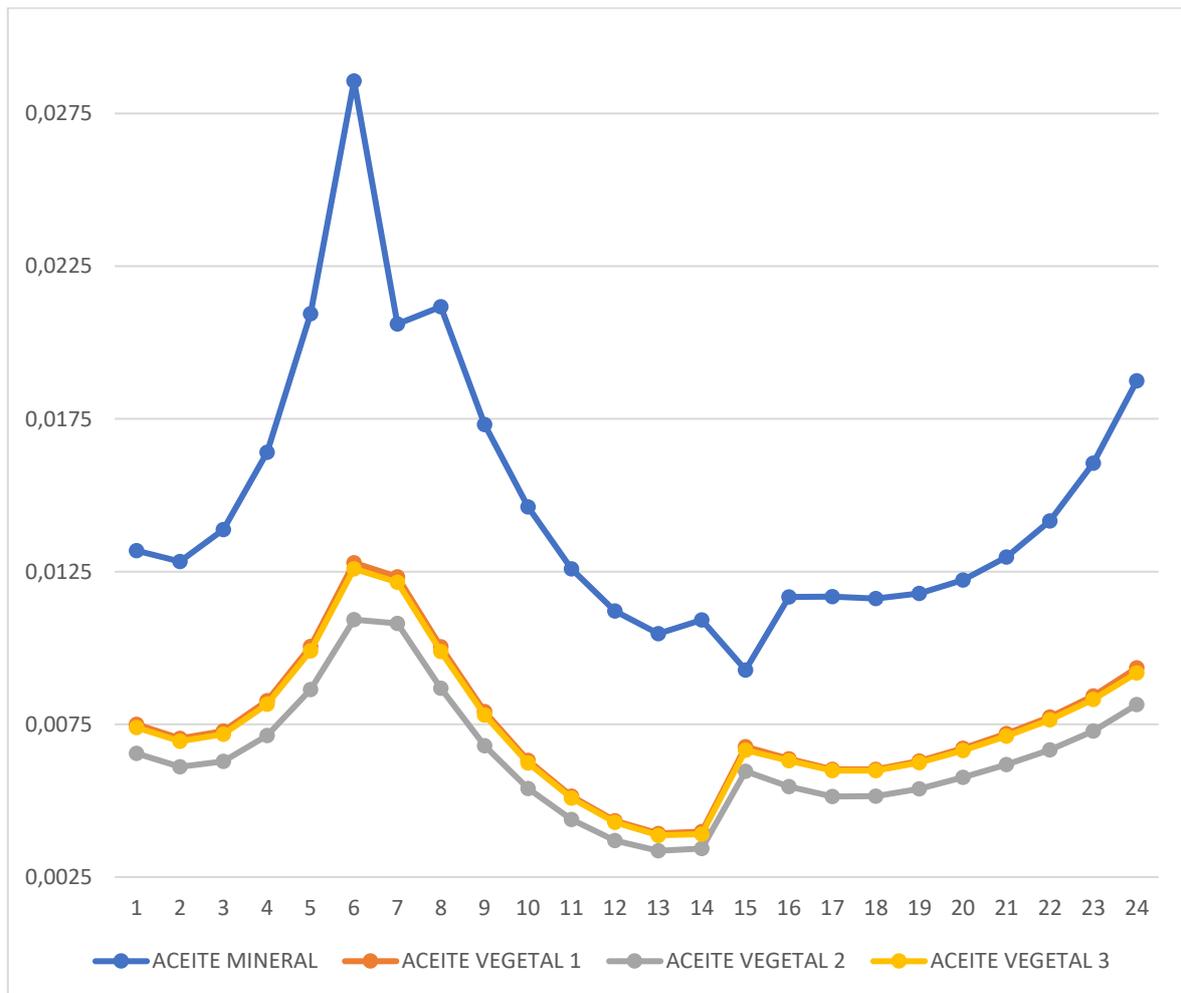


Figura 32 Comparación velocidad media [m/s]

Tabla 21 Comparación flujo másico

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	ACEITE VEGETAL 2	ACEITE VEGETAL 3
FLUJO ENTRADA	0.695	0.36	0.3094	0.372
RAD-1	0.098174647	0.05833618	0.050733217	0.06031333
RAD-2	0.089446336	0.0524980190	0.045410714	0.054280302
RAD-3	0.091537676	0.0504758610	0.043484403	0.05217773
RAD-4	0.10456043	0.0538685480	0.046238704	0.055664085
RAD-5	0.13273978	0.0637504970	0.054522807	0.065845491
RAD-6	0.18050674	0.0810060550	0.06900396	0.083621995
RAD-7	0.11768995	0.0809545230	0.070575818	0.083647906
RAD-8	0.10917809	0.0639161660	0.055229043	0.066053257
RAD-9	0.09289933	0.0502086530	0.043092335	0.05192412
RAD-10	0.081177589	0.0404625900	0.034516742	0.041880363
RAD-11	0.073549096	0.0340126080	0.028885933	0.035226519
RAD-12	0.070426135	0.0303612550	0.025768455	0.031423863
RAD-13	0.072038277	0.0292683280	0.024948917	0.030198846
RAD-14	0.080012723	0.0307574370	0.026379043	0.031551653
RAD-15	0.06836062	0.0525410030	0.046152176	0.054114577
RAD-16	0.076783469	0.0456258930	0.03925962	0.047247997
RAD-17	0.070980139	0.0380850310	0.032422132	0.039560943
RAD-18	0.064024035	0.0322121550	0.027270378	0.033505149
RAD-19	0.058514762	0.0283956260	0.023993591	0.029539012
RAD-20	0.055975508	0.0266461140	0.022550046	0.027690205
RAD-21	0.057472767	0.0269999170	0.022967016	0.02799028
RAD-22	0.064271456	0.0296954380	0.025459364	0.030659266
RAD-23	0.078351972	0.0352901390	0.030536354	0.036235261
RAD-24	0.10223221	0.04444719	0.038785037	0.04536167
NET	0.087120989	0.04499230	0.038674409	0.046488076

Tabla 22 Comparación porcentaje de flujo másico

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	ACEITE VEGETAL 2	ACEITE VEGETAL 3
FLUJO ENTRADA	0,695	0,36	0,3094	0,372
RAD-1	14%	16%	16%	16%
RAD-2	13%	15%	15%	15%
RAD-3	13%	14%	14%	14%
RAD-4	15%	15%	15%	15%
RAD-5	19%	18%	18%	18%
RAD-6	26%	23%	22%	22%
RAD-7	17%	22%	23%	22%
RAD-8	16%	18%	18%	18%
RAD-9	13%	14%	14%	14%
RAD-10	12%	11%	11%	11%
RAD-11	11%	9%	9%	9%
RAD-12	10%	8%	8%	8%
RAD-13	10%	8%	8%	8%
RAD-14	12%	9%	9%	8%
RAD-15	10%	15%	15%	15%
RAD-16	11%	13%	13%	13%
RAD-17	10%	11%	10%	11%
RAD-18	9%	9%	9%	9%
RAD-19	8%	8%	8%	8%
RAD-20	8%	7%	7%	7%
RAD-21	8%	7%	7%	8%
RAD-22	9%	8%	8%	8%
RAD-23	11%	10%	10%	10%
RAD-24	15%	12%	13%	12%
NET	300%	300%	300%	300%

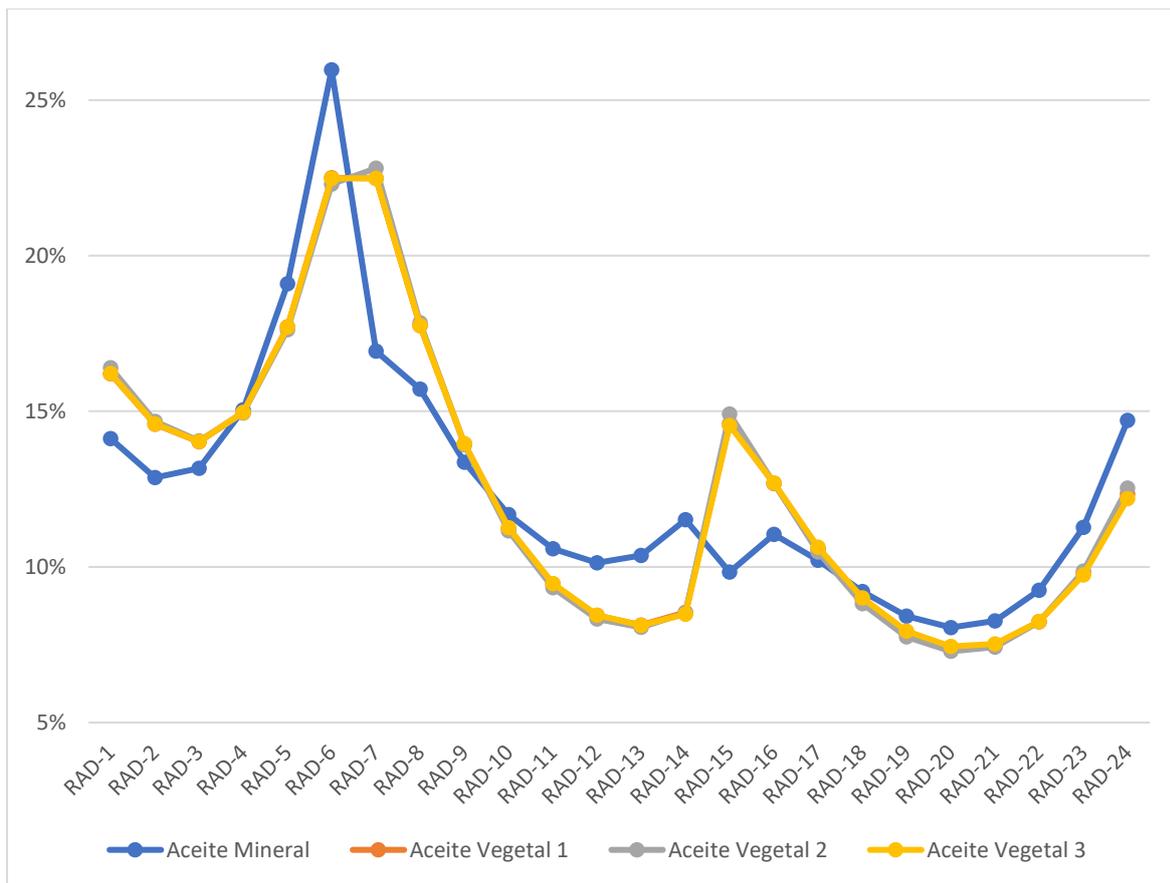


Figura 33 Comparación porcentaje de flujo másico [%]

Este estudio (Tabla 22 y Figura 33) comprueba la distribución del fluido a lo largo de la pieza. Una vez más se ve la diferencia entre aceites vegetales y minerales. Los aceites biodegradables se distribuyen de una manera más uniforme que los de origen mineral. Las zonas donde hay menos fluido corresponden con las zonas donde las temperaturas son más altas (Págs 23 y 24), por este motivo es de vital importancia su correcta distribución.

El caudal de fluido en el caso del mineral es menor en la entrada y mayor en la salida. Alcanza su máximo en el RAD 6, coincidiendo con el último rad anterior al cambio entre el primer y el segundo sector. A partir de ese punto comienza un descenso, hasta que a mitad del tercer sector aumenta el porcentaje de flujo respecto al total. Correspondiendo las zonas más bajas con las de mayor temperatura.

Los tres aceites vegetales actúan de una forma muy parecida, casi no se distingue diferencia en la Figura 33. Se aprecia el cambio del primer sector (RADS 6-7), aumentando en gran medida el cambio de sector al igual que en el aceite mineral. A diferencia de este último

también se aprecia el cambio entre los sectores 2 y 3 con un notable aumento en el RAD 15, perteneciente al primer canal del tercer sector.

-Temperatura máxima obtenida:

La temperatura máxima obtenida es un dato de gran valor. Este valor es la máxima temperatura obtenida por cada aceite en cualquier punto de la pieza. Es muy importante este dato porque los discos no pueden aumentar nunca la temperatura establecida por el fabricante.

Tabla 23 Comparación temperatura máxima [°C]

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	ACEITE VEGETAL 2	ACEITE VEGETAL 3
[°C] MAX	78,930109	85,585992	90,011926	87,535089

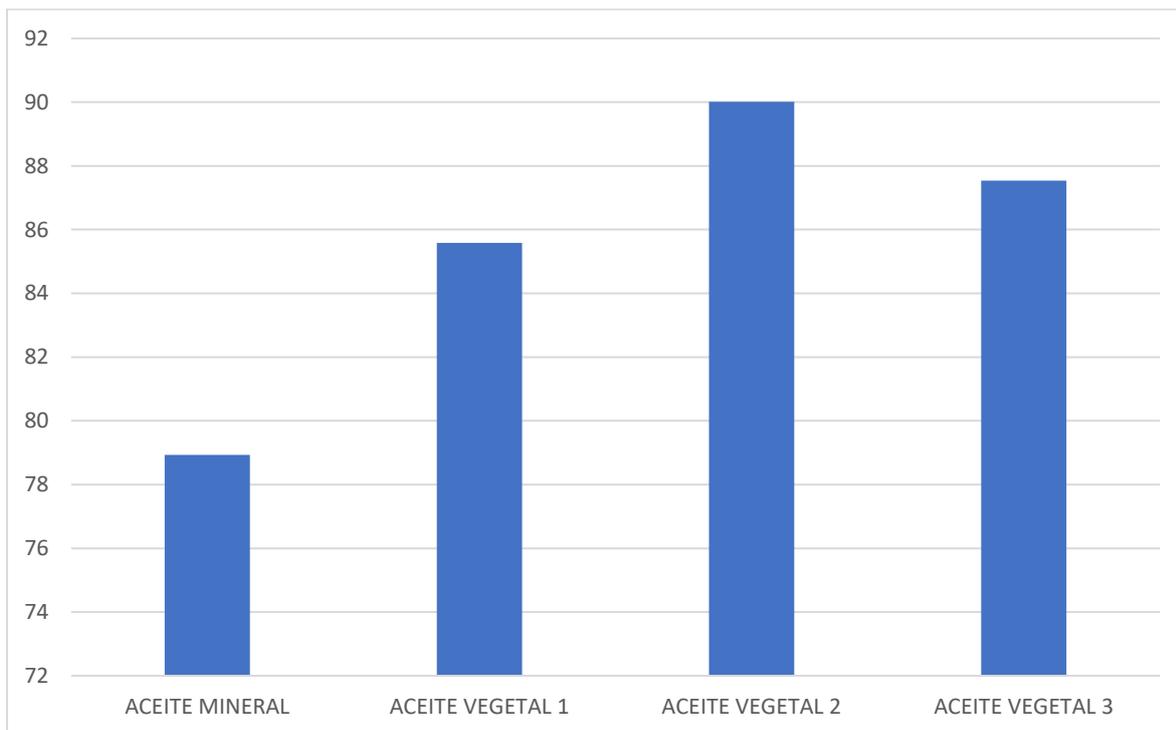


Figura 34 Comparación temperatura máxima [°C]

Como en el resto de las simulaciones de capacidad de refrigeración, el aceite mineral tiene el mejor resultado, con una temperatura máxima de casi 79 °C.

Otra vez es el aceite vegetal 2 es el que peor rendimiento tiene dentro de los biodegradables. Los aceites vegetales 1 y 3 obtienen valores intermedios teniendo una vez más los mejores resultados entre los vegetales, el aceite vegetal 1 (85,5 °C).

8.5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Dejando de lado las ventajas o desventajas que tenga la utilización de aceites de origen mineral o vegetal, las cuales discutiremos más adelante junto con estos resultados, este estudio se ha enfocado meramente en las temperaturas obtenidas a lo largo de la pieza y la distribución del líquido. Resultados prestacionales, sin tener en cuenta otras características.

El objetivo era comprobar las diferencias que tiene un aceite mineral estándar, con tres tipos de aceite de origen vegetal. Los tres aceites varían en su procedencia (soja, colza y sintético) y por lo tanto lo hacen sus propiedades.

El primer campo estudiado es la temperatura media en los discos (Tabla 18 y Figura 30). El ensayo trata de un sistema de refrigeración, por lo que obtener las temperaturas más bajas de la forma óptima es lo que buscamos. El mejor aceite en esta sección, con una clara ventaja es el aceite mineral. Aun siendo el fluido que entra en el circuito con una mayor temperatura, obtiene la mejor media de temperaturas (71 °C), siendo 2 °C menor que el mejor aceite biodegradable, el aceite vegetal 1 y 4°C menor que los otros dos. A partir del primer cambio de sector el aceite mineral es el que obtiene menores temperaturas en todos los conductores. El aceite mineral es también el que el incremento de temperatura entre la entrada y la salida es menor. Otra vez, el mejor aceite vegetal resulta el primero (73 °C), 2 °C mejor que los otros dos refrigerantes. Con un resultado muy parecido en cuanto a temperatura media final se encuentran los aceites vegetales 2 y 3 (~ 75 °C). El que peores resultados obtiene es el aceite vegetal 2, puesto que es que tiene la menor temperatura de entrada y también es el que tiene una mayor temperatura de salida, por ello es el que más fluctúa.

El segundo estudio es la diferencia de temperatura de cada disco respecto a la temperatura de entrada (Tabla 19 y Figura 31). Otra vez el mejor parado es el aceite mineral, obtiene un incremento medio de 28,4 °C, bastante lejos el mejor aceite vegetal que vuelve a ser el primero con 35,4 °C. El aceite mineral, obtiene un mejor valor en cada uno de los discos. Pasándonos a los aceites vegetales el mejor vuelve a ser el número 1, parte de una temperatura de entrada algo inferior que el mineral y muy similar que el vegetal 3, pero obtiene los mejores valores para todos los discos dentro de los aceites de esta tipología, muy seguido por el aceite vegetal 3 que obtiene unos resultados muy similares (35, 4 °C vs 37 °C).

Otra vez el peor parado sale el aceite vegetal 2 (39, 5 °C), debido a que tiene la menor temperatura de entrada y las peores temperaturas medias en los discos.

En resumen, el fluido que consigue refrigerar los discos de mejor manera es el aceite mineral, obtiene claramente los mejores resultados en ambos campos. Dentro de los aceites vegetales el que tiene mejores prestaciones es el aceite vegetal 1, seguido por el aceite vegetal 3. En última posición y lejos de los resultados del resto está el segundo de los aceites de origen vegetal.

La tercera simulación es la de velocidad de paso por cada sección RAD (Tabla 20 y Figura 32). Aquí entra en escena la viscosidad del fluido. Como ya vimos, los aceites de origen vegetal tienen una mayor viscosidad respecto a los que origen mineral. Por este motivo, el aceite mineral obtiene velocidades mayores en toda la pieza, el doble que los biodegradables. En los aceites vegetales los que obtienen mayores velocidades son el 1 y 3 con resultados muy parejos. El más lento de todos coincidiendo con el de mayor viscosidad es el aceite vegetal 2.

El estudio del flujo másico (Tablas 21,22 y Figura 33) tiene un como objetivo comprobar la distribución del fluido a lo largo de la pieza. Los tres aceites biodegradables obtienen una distribución más uniforme que el mineral. Hay que recordar que las zonas donde hay menos líquido tendrán menor capacidad de refrigeración. El aceite mineral alcanza su máximo en el RAD 6, coincidiendo con el RAD del cambio entre el primer y el segundo sector. A partir de ese punto comienza un descenso, coincidiendo con las zonas de mayor temperatura en los discos, hasta que a mitad del tercer sector aumenta el porcentaje de flujo respecto al total. Los tres aceites vegetales actúan de una forma muy parecida, casi coincidiendo en todos los puntos. Se aprecia una gran subida en el primer sector (rads 6-7), aumentando en gran medida el cambio de sector al igual que en el aceite mineral. A diferencia de este último también se aprecia otra subida en el cambio de los sectores 2 y 3 con un notable aumento en el RAD 15.

Por último, obtuvimos los datos de temperatura máxima total (Tabla 23 y Figura 34). Los resultados obtenidos siguen la misma tendencia que los anteriores. El que obtiene los mejores efectos, como en todo a lo que se refiere a temperaturas, es el aceite mineral. El segundo con menor temperatura alcanzada el aceite vegetal 1, seguido del 3 y otra vez el que obtiene el peor resultado el aceite vegetal 2.

Una vez terminado este estudio queda claro que el que mejores prestaciones ha obtenido es el aceite mineral. Recalcar otra vez que dentro de este estudio no se tienen en cuenta otras prestaciones que tienen los refrigerantes más allá de la capacidad refrigerante. Dentro de los aceites vegetales estudiados, el primero es el que mejores resultados tiene con diferencia. Es por ello, por lo es el elegido para los siguientes estudios en busca del sistema óptimo para nuestro transformador.

9. ESTUDIO DE MODIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Hasta el momento lo único que hemos hecho es cambiar el tipo de aceite y ver en que afecta en nuestros resultados, la pieza se ha mantenido intacta. En este estudio lo que haremos es cambiar las dimensiones de ciertas partes de nuestra pieza y así poder ver de qué forma afecta esto en nuestros resultados. El objetivo no es otro que paliar la diferencia de viscosidad que hay entre las dos tipologías de aceite, aumentando las secciones para que aumente la velocidad del fluido en el caso de los aceites vegetales y así consigan una mejor refrigeración.

Para ello vamos a utilizar el aceite vegetal 1 de la simulación anterior. Es el que ha obtenido las mejores prestaciones dentro de los aceites vegetales.

Vamos a hacer un total de cinco nuevas piezas y compararlas con los resultados anteriores de la pieza original con el aceite vegetal 1. Estas nuevas piezas van a tener el prefijo de 'DP', DP1, DP2 etc. hasta DP5. Siendo DP0 la pieza original usada en las anteriores comparaciones.

En los 4.1 y 4.2 se explican los agentes implicados en la pérdida de carga del fluido. Ahora que sabemos dónde están los principales puntos de pérdida en la pieza, gracias a los estudios [14][10], hemos optado por variar ambos canales axiales que recorren toda la pieza (Pág 28); 'Lint duct' y 'Lext duct'.

Al cambiar las condiciones de la pieza también cambiarán las condiciones de contorno en nuestro estudio, como ocurría en el estudio de los tipos de aceites, estos valores han sido calculados previamente. El flujo másico es distinto, al igual que la temperatura de entrada, la presión etc. Como estos valores fueron parametrizados con anterioridad, la simulación dentro del programa se agiliza mucho. Sólo es necesario cambiar las dimensiones, la velocidad y temperatura de entrada.

Tabla 24 Estudio de dimensionamiento

	Lint duct [mm]	Lext duct [mm]	Flujo másico [Kg/s]	Temp entrada [°C]
PIEZA ORIGINAL	9	6	0,36	37,55
DP1	11	8	0,487	39,4
DP2	11	11	0,474	40,1
DP3	12	12	0,492	40,4
DP4	15	15	0,529	41
DP5	18	18	0,549	41,28

Calculamos las nuevas secciones de entrada, que varían al cambiar 'Lint duct' y con el flujo másico de cada pieza calculamos las velocidades de entrada:

$$\text{Sección (m}^2\text{)} = (R2^2 - R1^2) \times \pi$$

$$R2 = R1 + L2 = R1 + 0,011$$

$$\text{Velocidad entrada (m/s)} = \frac{\frac{\text{Flujo másico de entrada}}{\text{Densidad}}}{\text{Sección}}$$

Tabla 37 Valores de condiciones de entrada para cada pieza

Figura	Sección (m ²)	Velocidad entrada (m/s)
DP1	0,020098	0,02387
DP2	0,020098	0,0259
DP3	0,02196	0,0246
DP4	0,027595	0,02105
DP5	0,03328	0,01811

Al cambiar las dimensiones, cambian las secciones de los canales al igual que la de entrada, esto permite que el flujo de fluido sea mayor. En un principio esto repercutirá en unas mejores prestaciones. Cuanto más fluido, mejores resultados.

9.1. RESULTADOS

Una vez ya tenemos calculadas todas las condiciones de contorno y al igual que en los otros dos estudios, hacemos las simulaciones correspondientes y comparamos los resultados. En este caso seguiremos el mismo método que para la comparación de aceites. Obtendremos la temperatura media, el incremento de temperatura, el flujo másico en cada paso por un RAD, el porcentaje de flujo másico en cada RAD (distribución del flujo) y por último las temperaturas máximas alcanzadas.

Tabla 25 Comparación temperatura media [°C]

	ACEITE VEGETAL 1	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5
COND-1	60.534176	60.972542	60.623831	61.016201	60.624592	60.769155
COND-2	60.973924	61.282213	61.192246	61.237201	60.709312	60.968667
COND-3	60.794748	61.100372	61.324923	61.578549	61.008985	61.048876
COND-4	59.835401	60.834722	61.574898	61.884047	61.149153	61.364385
COND-5	58.599403	60.38078	61.674651	61.996072	61.192864	61.37908
COND-6	66.241999	67.958217	69.710059	69.836783	69.007249	69.151459
COND-7	68.24068	68.011658	68.787987	68.829818	68.06035	68.324721
COND-8	70.706119	69.378857	69.217324	69.27701	68.246887	68.444649
COND-9	72.344548	70.283979	69.595194	69.4322	68.573237	68.700285
COND-10	72.928633	70.685482	69.640028	69.59614	68.719891	68.746891
COND-11	72.717901	70.395257	69.255374	69.307168	68.762995	68.49188
COND-12	71.815146	69.172161	67.503084	67.901897	66.880313	66.773365
COND-13	84.339344	79.136424	76.401745	76.571047	74.844578	74.357735
COND-14	85.265862	80.2647	77.502053	77.241474	75.65922	75.09889
COND-15	84.975425	80.570676	78.176691	77.577265	76.269841	75.674102
COND-16	84.668399	80.448464	78.596398	78.016395	77.067541	76.681693
COND-17	84.273141	80.131206	78.83277	78.377466	77.667986	77.231194
COND-18	83.097754	79.774708	79.264766	78.825064	76.905329	75.952846
COND-19	80.783661	78.654857	78.920423	78.652231	75.491243	74.861264
COND-20	76.677041	76.511657	77.706001	77.364974	75.245536	74.875756
COND-21	71.331644	73.063727	76.244353	76.060515	75.383921	75.449339
NET	72.911664	71.38155519	71.03546662	70.979977	69.87957252	69.73077295

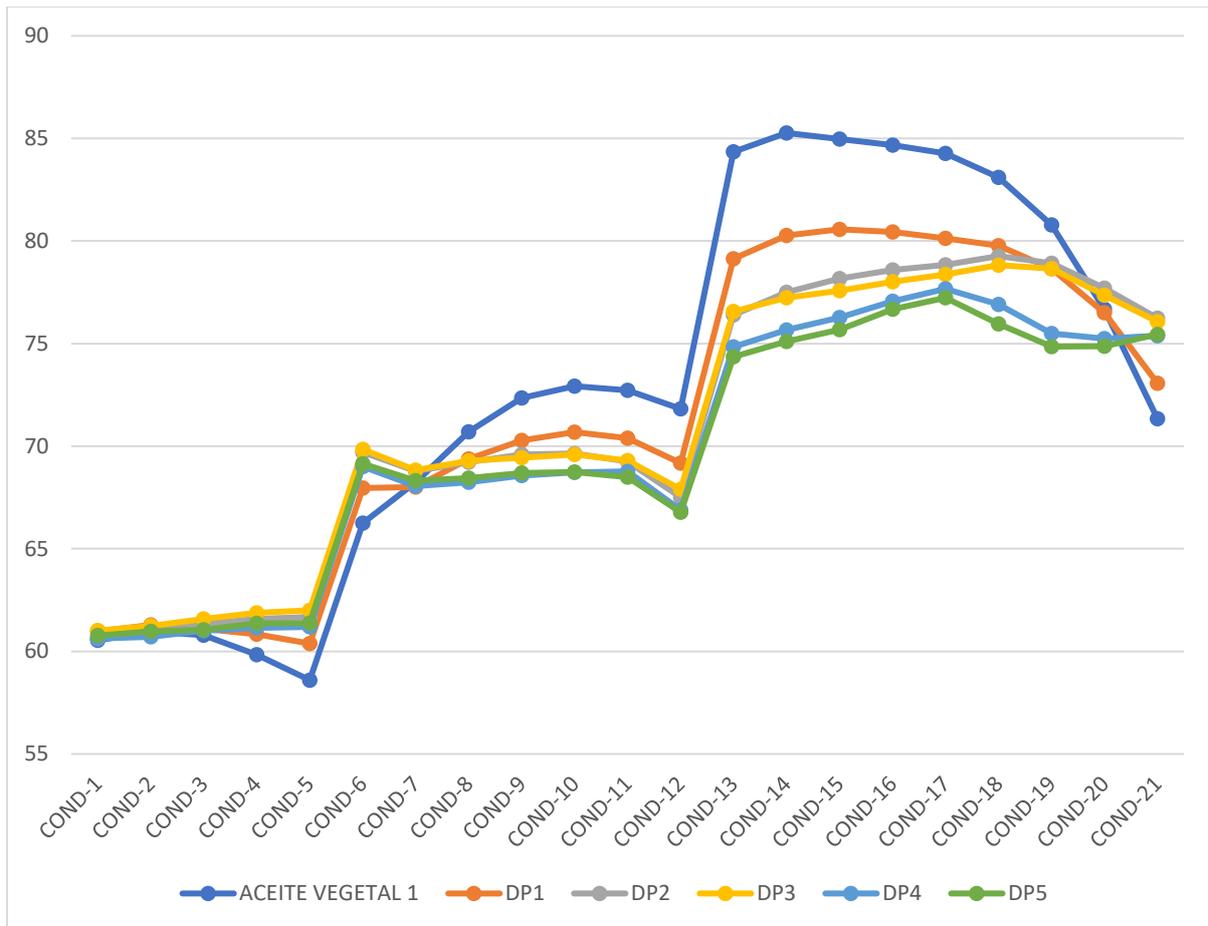


Figura 35 Comparación temperatura media [°C]

El tamaño de nuestra estructura aumenta con cada DP, siendo el menor de todo el estudio el de nuestra estructura inicial y el mayor el de DP5. Esto hace que el flujo del fluido que puede pasar por cada sección aumenta en cada una de ellas. Como ya predecimos las prestaciones son mejores cuando el flujo másico es mayor. Esto se ve reflejado en el resultado de temperatura media en cada COND (Tabla 25 y Figura 35). El peor valor de temperatura media lo obtiene la estructura inicial (72,9 °C) y el mejor la mayor estructura, DP5 (69,3 °C), el resto obtienen unos resultados en orden por tamaño.

Se puede apreciar que la distribución de temperaturas menos regular es también la de la estructura inicial (Figura 35), esto se debe a que la temperatura de entrada es la menor (37,55°C), lejos de los 41,28 °C de DP5. Su sección de entrada es la menor (el flujo de entrada también) por gran diferencia. Esto hace que obtenga la menor temperatura registrada en el COND 5 (58,6 °C), coincidiendo con el cambio de sector, pero aumente en el resto de la pieza. Obtiene también obtiene las temperaturas más altas sobre todo entre los COND 13-17 (principio del tercer sector de la pieza). Además, la temperatura de salida es la menor.

El resto de las estructuras siguen una tendencia muy parecida al tener flujos mayores, obteniendo una mejor distribución de temperatura a medida que aumentan las dimensiones.

Tabla 26 Comparación incremento de temperatura [°C]

	DP0	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5
TEMP ENTRADA	37.55	39.4	40.1	40.4	41	41.28
COND-1	22.984176	21.572542	20.523831	20.616201	19.624592	19.489155
COND-2	23.423924	21.882213	21.092246	20.837201	19.709312	19.688667
COND-3	23.244748	21.700372	21.224923	21.178549	20.008985	19.768876
COND-4	22.285401	21.434722	21.474898	21.484047	20.149153	20.084385
COND-5	21.049403	20.98078	21.574651	21.596072	20.192864	20.09908
COND-6	28.691999	28.558217	29.610059	29.436783	28.007249	27.871459
COND-7	30.69068	28.611658	28.687987	28.429818	27.06035	27.044721
COND-8	33.156119	29.978857	29.117324	28.87701	27.246887	27.164649
COND-9	34.794548	30.883979	29.495194	29.0322	27.573237	27.420285
COND-10	35.378633	31.285482	29.540028	29.19614	27.719891	27.466891
COND-11	35.167901	30.995257	29.155374	28.907168	27.762995	27.21188
COND-12	34.265146	29.772161	27.403084	27.501897	25.880313	25.493365
COND-13	46.789344	39.736424	36.301745	36.171047	33.844578	33.077735
COND-14	47.715862	40.8647	37.402053	36.841474	34.65922	33.81889
COND-15	47.425425	41.170676	38.076691	37.177265	35.269841	34.394102
COND-16	47.118399	41.048464	38.496398	37.616395	36.067541	35.401693
COND-17	46.723141	40.731206	38.73277	37.977466	36.667986	35.951194
COND-18	45.547754	40.374708	39.164766	38.425064	35.905329	34.672846
COND-19	43.233661	39.254857	38.820423	38.252231	34.491243	33.581264
COND-20	39.127041	37.111657	37.606001	36.964974	34.245536	33.595756
COND-21	33.781644	33.663727	36.144353	35.660515	34.383921	34.169339
NET	35.361664	31.98155519	30.93546662	30.579977	28.87957252	28.45077295

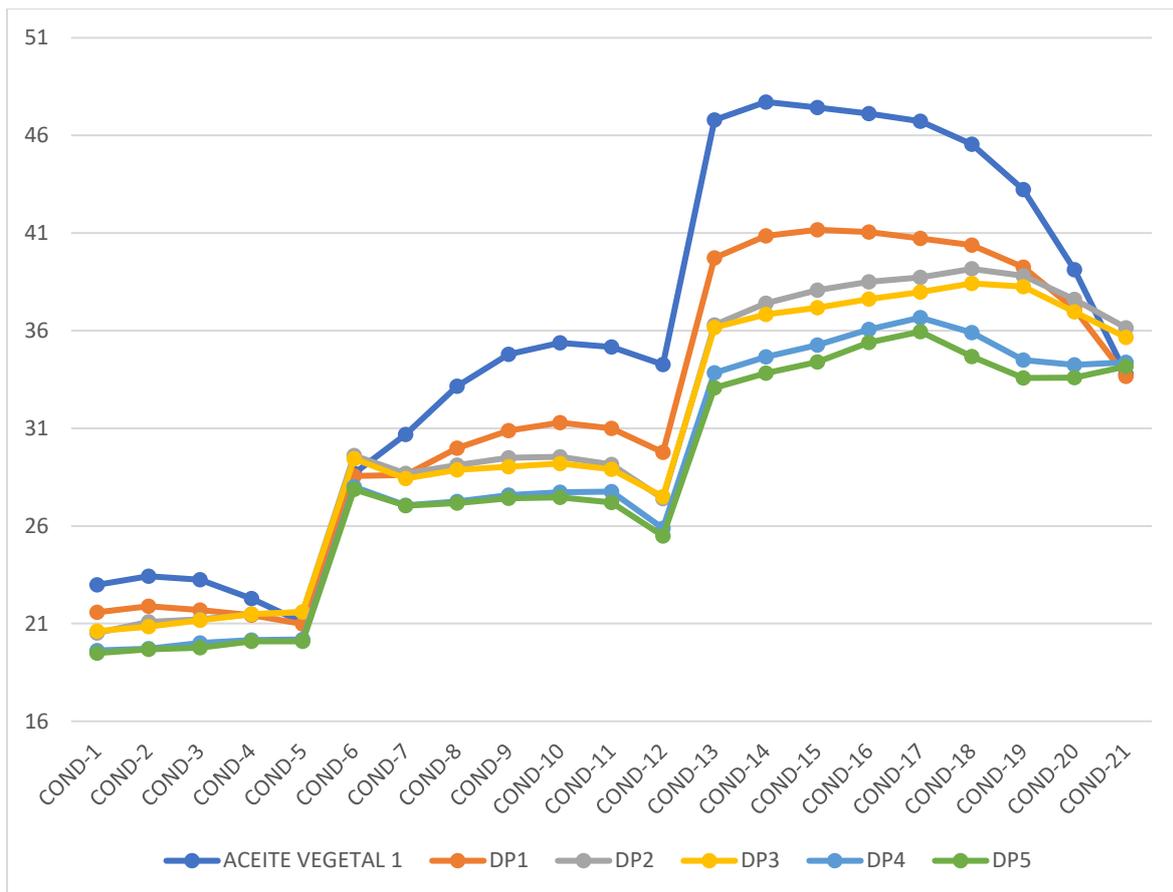


Figura 36 Comparación incremento de temperatura [°C]

Como ocurre con la temperatura media (Tabla 25 y Figura 35), el incremento de temperatura (Tabla 26 y Figura 36) disminuye cuanto mayor es la figura. Otra vez es la figura inicial la que tiene el peor resultado (35,36 °C), con una diferencia más notable esta vez. Esto se debe a que además de obtener los peores resultados en cuanto a temperaturas en la mayoría de la pieza, tiene la menor temperatura de entrada (37,55°C). Se puede apreciar en la Figura 38 que los resultados que más difieren son los de la primera estructura. El mejor resultado vuelve a ser el DP5 (28,45 °C).

Habiendo realizado ya los dos estudios correspondientes podemos ver que como suponíamos, cuanto mayores son las dimensiones de la estructura conseguimos enfriar mejor los discos y, por lo tanto, tenemos mejores prestaciones con el mismo aceite.

Tabla 27 Comparación flujo másico [Kg/s]

	ACEITE VEGETAL 1	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5
FLUJO ENTRADA	0.36	0.437	0.474	0.492	0.529	0.549
RAD-1	0.058336184	0.074557511	0.08818124	0.09002489	0.097261832	0.10040814
RAD-2	0.052498019	0.0704444030	0.082996425	0.086024405	0.09425399	0.098118404
RAD-3	0.050475861	0.0680007800	0.078113896	0.081772959	0.088410492	0.092394582
RAD-4	0.053868548	0.0688632880	0.075168151	0.078926579	0.08412287	0.087353646
RAD-5	0.063750497	0.0735097880	0.07442338	0.077767706	0.081244605	0.083610054
RAD-6	0.081006055	0.0814848890	0.075127028	0.077476208	0.083438532	0.086942989
RAD-7	0.080954523	0.0767423560	0.067767573	0.06888932	0.07634618	0.076586685
RAD-8	0.063916166	0.0687452000	0.066165022	0.068428995	0.074972856	0.075864297
RAD-9	0.050208653	0.0603802640	0.062536832	0.06562743	0.070325792	0.071122416
RAD-10	0.04046259	0.0535204200	0.059066157	0.062493082	0.066246591	0.067249184
RAD-11	0.034012608	0.0483440290	0.056373992	0.05965761	0.062312523	0.06378158
RAD-12	0.030361255	0.0447699420	0.054667579	0.057374295	0.05860183	0.064184184
RAD-13	0.029268328	0.0426485550	0.053886116	0.055634156	0.058734738	0.064898646
RAD-14	0.030757437	0.0417031430	0.053544475	0.053890902	0.061106973	0.065253512
RAD-15	0.052541003	0.0569007250	0.061601479	0.061307008	0.070579124	0.066590881
RAD-16	0.045625893	0.0547313460	0.061066775	0.061986379	0.07264772	0.072238482
RAD-17	0.038085031	0.0502526190	0.058293943	0.060348218	0.067321755	0.069026796
RAD-18	0.032212155	0.0456780850	0.054601242	0.057566145	0.061779116	0.06543675
RAD-19	0.028395626	0.0418543320	0.050468481	0.053880045	0.056103638	0.060680431
RAD-20	0.026646114	0.0390733560	0.046268926	0.049622878	0.050634575	0.054836827
RAD-21	0.026999917	0.0373416430	0.042085589	0.044963333	0.044498111	0.048436691
RAD-22	0.029695438	0.0365836410	0.037817109	0.039876701	0.03846665	0.041701388
RAD-23	0.035290139	0.0367721530	0.033366196	0.034340367	0.032923941	0.034458141
RAD-24	0.044447189	0.03763811	0.028412565	0.028095663	0.033378745	0.035819114
NET	0.044992301	0.05460586	0.05925001	0.06149897	0.06607138	0.06862474

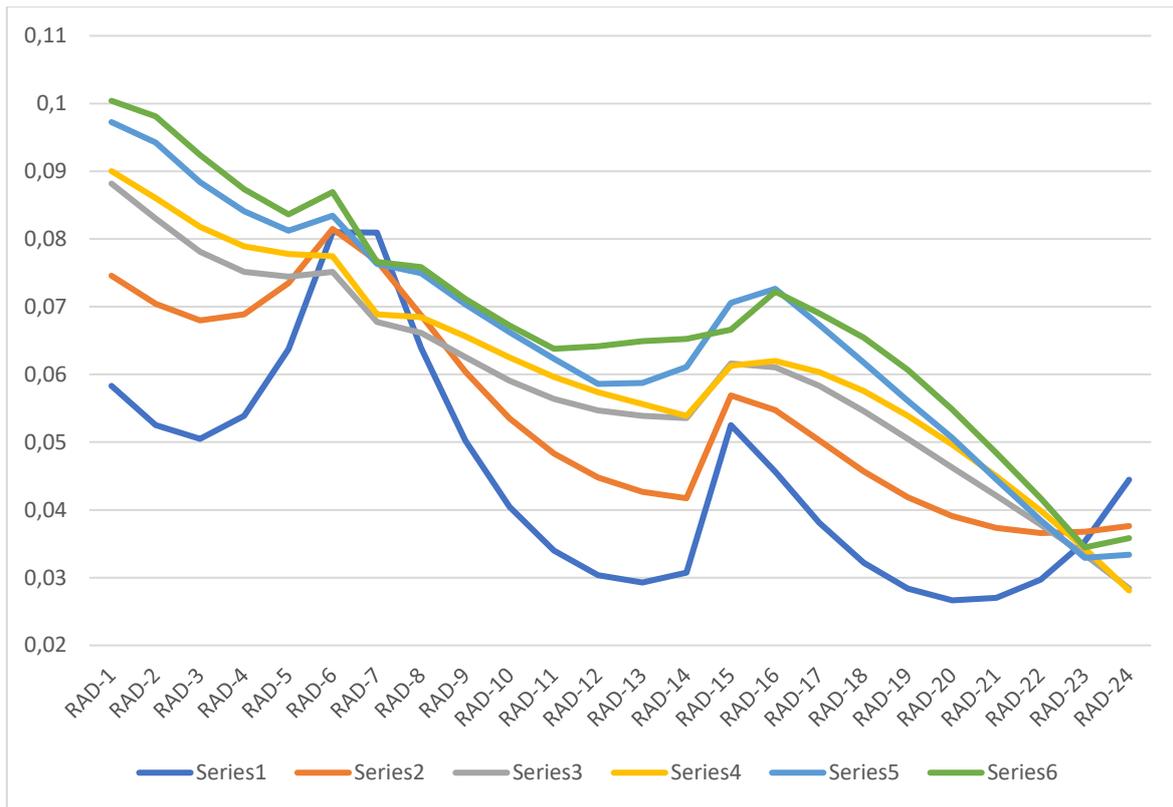


Figura 37 Comparación flujo másico cada RAD

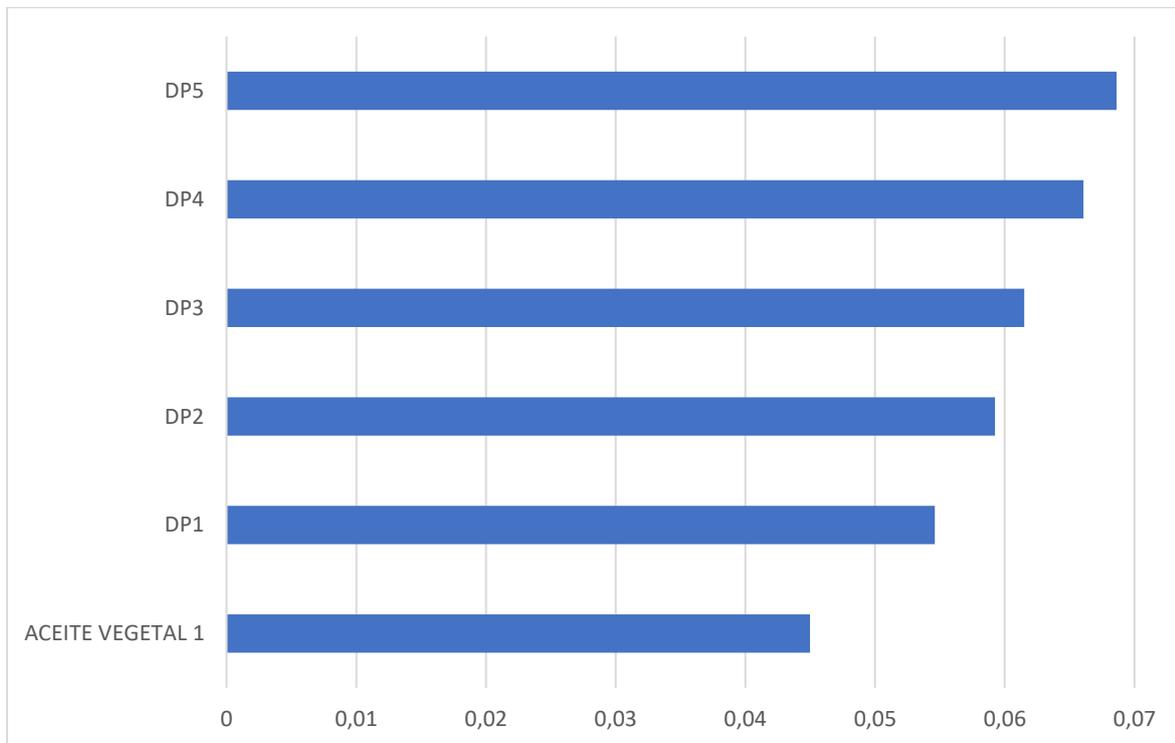


Figura 38 Comparación flujo másico [kg/s]

Tabla 28 Comparación distribución del fluido [%]

	ACEITE VEGETAL 1	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5
FLUJO ENTRADA	0.36	0.437	0.474	0.492	0.529	0.549
RAD-1	16%	17%	19%	18%	18%	18%
RAD-2	15%	16%	18%	17%	18%	18%
RAD-3	14%	16%	16%	17%	17%	17%
RAD-4	15%	16%	16%	16%	16%	16%
RAD-5	18%	17%	16%	16%	15%	15%
RAD-6	23%	19%	16%	16%	16%	16%
RAD-7	22%	18%	14%	14%	14%	14%
RAD-8	18%	16%	14%	14%	14%	14%
RAD-9	14%	14%	13%	13%	13%	13%
RAD-10	11%	12%	12%	13%	13%	12%
RAD-11	9%	11%	12%	12%	12%	12%
RAD-12	8%	10%	12%	12%	11%	12%
RAD-13	8%	10%	11%	11%	11%	12%
RAD-14	9%	10%	11%	11%	12%	12%
RAD-15	15%	13%	13%	12%	13%	12%
RAD-16	13%	13%	13%	13%	14%	13%
RAD-17	11%	11%	12%	12%	13%	13%
RAD-18	9%	10%	12%	12%	12%	12%
RAD-19	8%	10%	11%	11%	11%	11%
RAD-20	7%	9%	10%	10%	10%	10%
RAD-21	7%	9%	9%	9%	8%	9%
RAD-22	8%	8%	8%	8%	7%	8%
RAD-23	10%	8%	7%	7%	6%	6%
RAD-24	12%	9%	6%	6%	6%	7%
NET	300%	300%	300%	300%	300%	300%

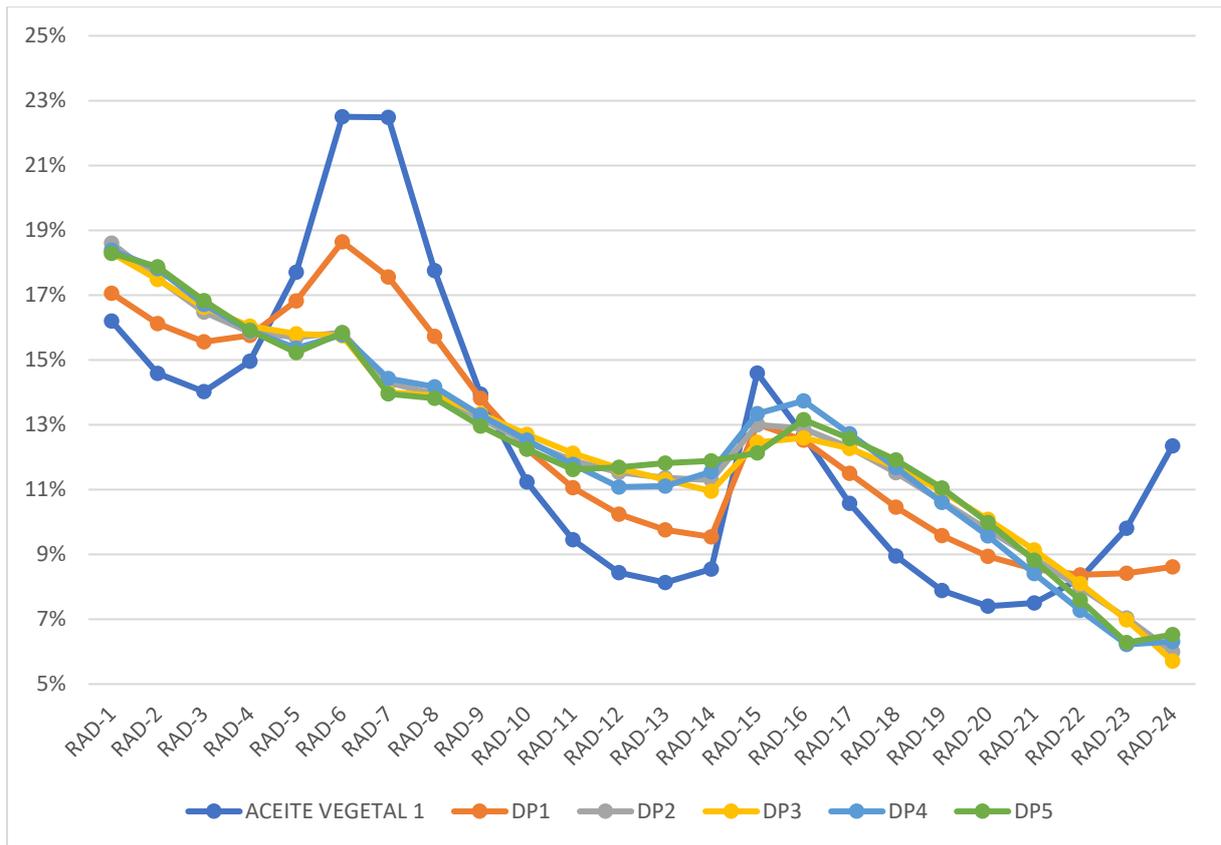


Figura 39 Comparación distribución del fluido [%]

Llevamos varios estudios de porcentaje de flujo y sabemos que las zonas donde los cambios son más bruscos son en las dos intersecciones que hay (cambios de sector) y por lo tanto los cambios más bruscos de la distribución. Las zonas que menos porcentaje de fluido tienen, son las que alcanzan mayores temperaturas y esto es lo que pretendemos evitar en este estudio. El que tiene una distribución menos uniforme es lógicamente la primera estructura (como ocurría en el estudio de refrigeración), al tener canales con una menor sección provoca que el líquido se quede estancado en dichas zonas en una mayor medida. Se ve claramente esta tendencia en la Figura 39. Tanto en los RAD 5 y 6 (primera intersección) y luego en el RAD 15 (segunda intersección) se producen los mayores cambios. Cabe destacar el gran aumento de porcentaje de flujo de la estructura inicial en el último RAD.

La segunda estructura (DP1), que es la segunda menor de todas las estructuras, obtiene una mejor distribución que la inicial, pero vuelve a ser el peor de las nuevas estructuras de este estudio.

El resto de las estructuras, de DP2 a DP5, obtienen resultados bastante parecidos teniendo una distribución del flujo másico más estable que las otras dos estructuras anteriores.

Tabla 29 Comparación temperatura máxima [° C]

	ACEITE VEGETAL 1	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5
[°C] MAX	85.585992	81.578851	86.331415	79.101984	78.000726	77.575586

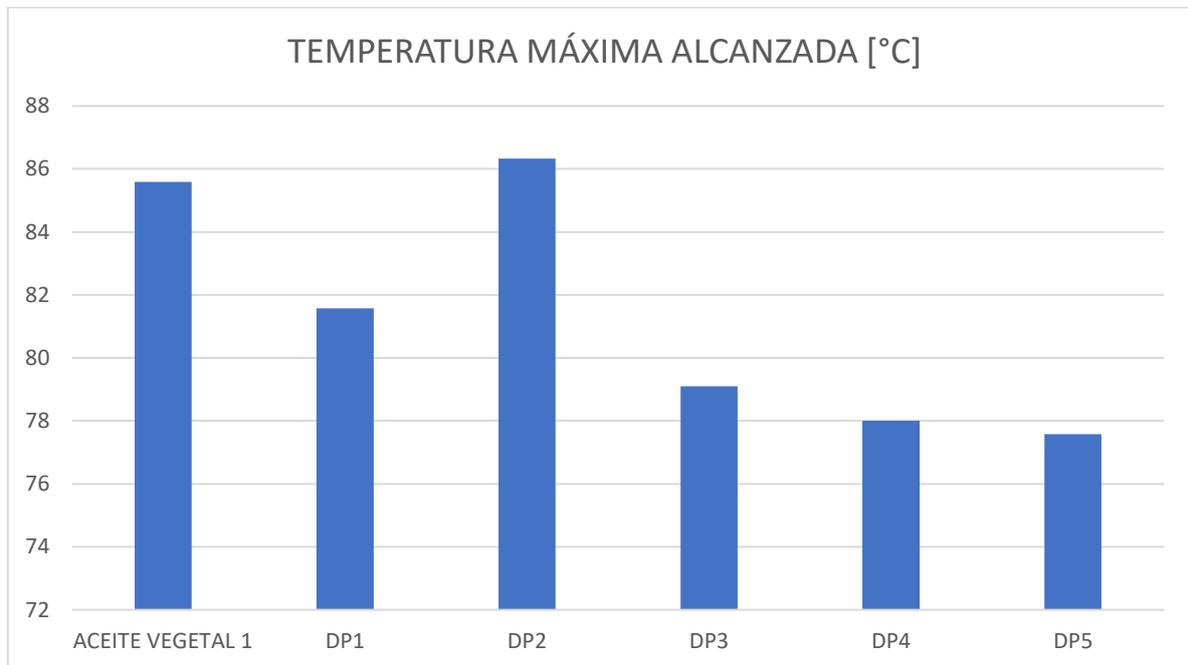


Figura 40 Comparación temperatura máxima [° C]

Repetimos la importancia de la temperatura máxima alcanzada (Tabla 29 y Figura 40). En este caso y sorprendentemente el que tiene una mayor temperatura máxima es la estructura DP2 (86,3 °C) y no la pieza original (85,6 °C). Es un resultado que no se esperaba pero que, si es de gran importancia, en contra de la estructura DP2. Esto ocurre debido a las condiciones iniciales que necesita el fluido en esta disposición. Y se trata por ello de un fallo en el diseño. Aunque en cuanto a temperatura media DP2 tiene mejores resultados que la estructura inicial (Tabla 25 y Figura 35). DP1 obtiene un resultado intermedio entre ambos (81,6 °C). Después y como ya objetivamos en el anterior estudio, se sitúan en orden de tamaño; DP3 (79,1 °C), DP4 (78 °C) Y DP3 (77,6 °C).

Hay que destacar las grandes diferencias que hay entre las temperaturas máximas, recordar que es la temperatura máxima alcanza en cualquier punto de la pieza y como vemos hay grandes saltos entre estructuras, siendo un valor de vital importancia.

9.2. RESULTADOS GRÁFICOS

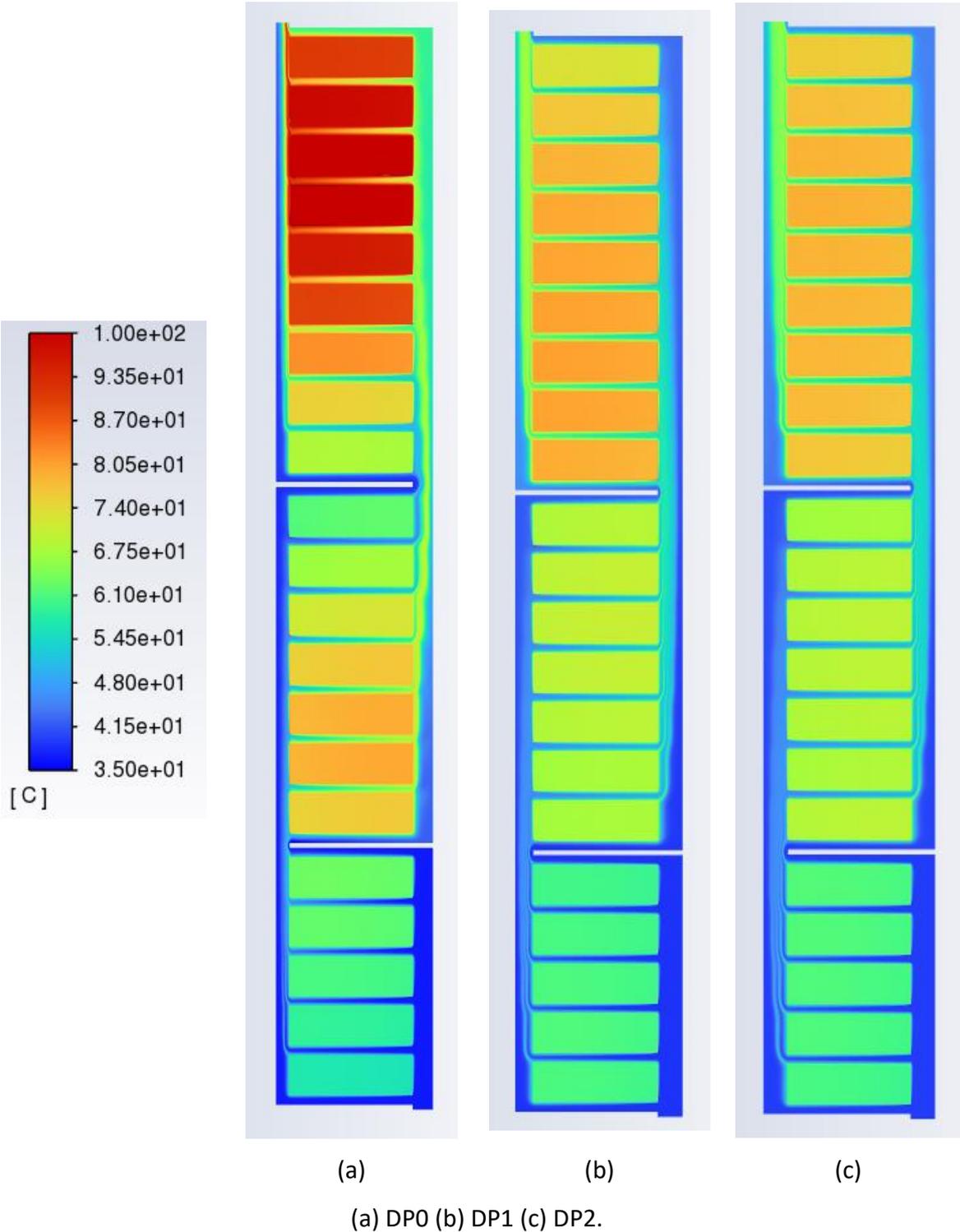


Figura 41 Distribución de temperaturas de DPO, DP1 y DP2

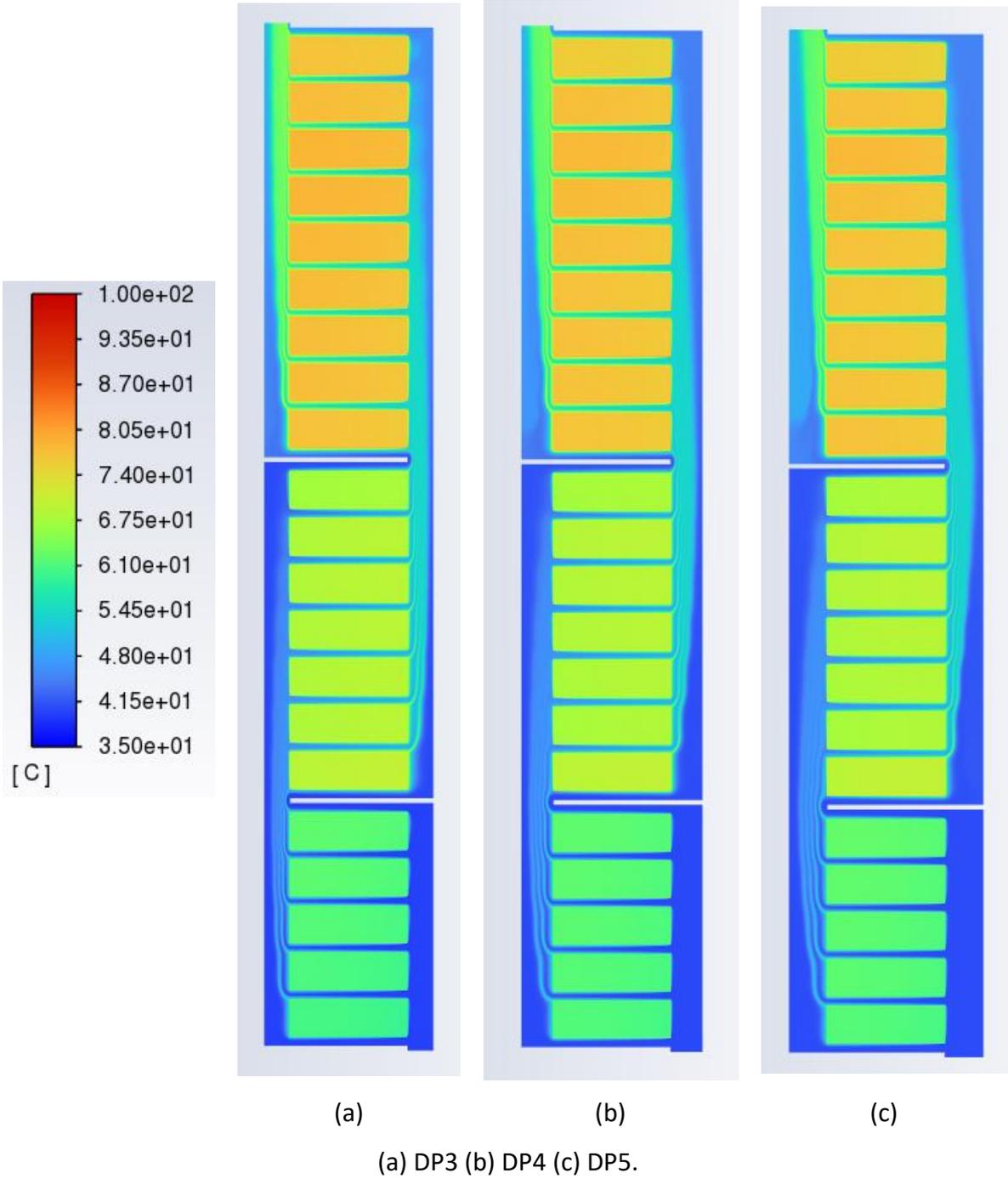


Figura 42 Distribución de temperaturas de DP3, DP4 y DP5

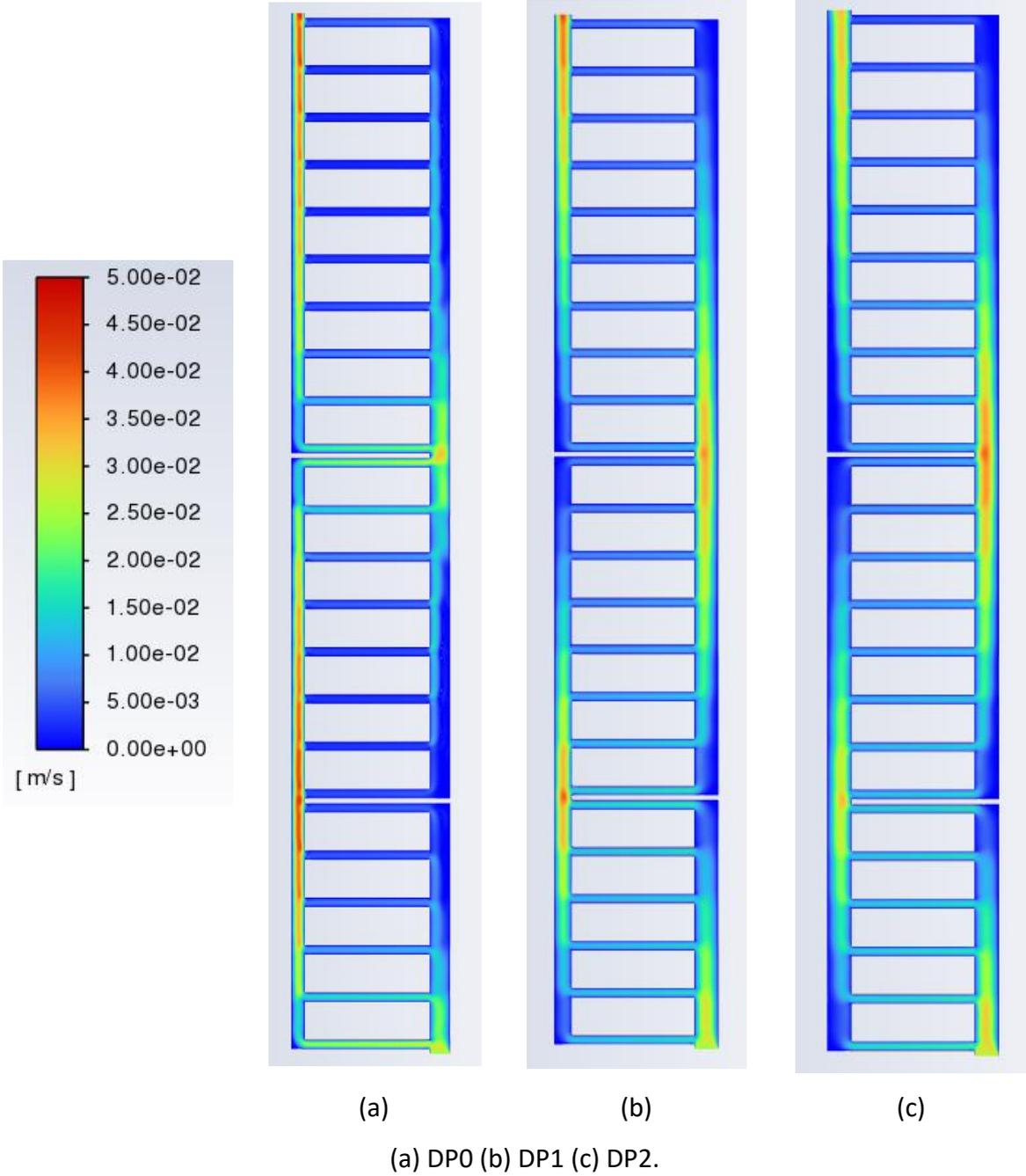


Figura 43 Distribución de velocidades de DP0, DP1 y DP2

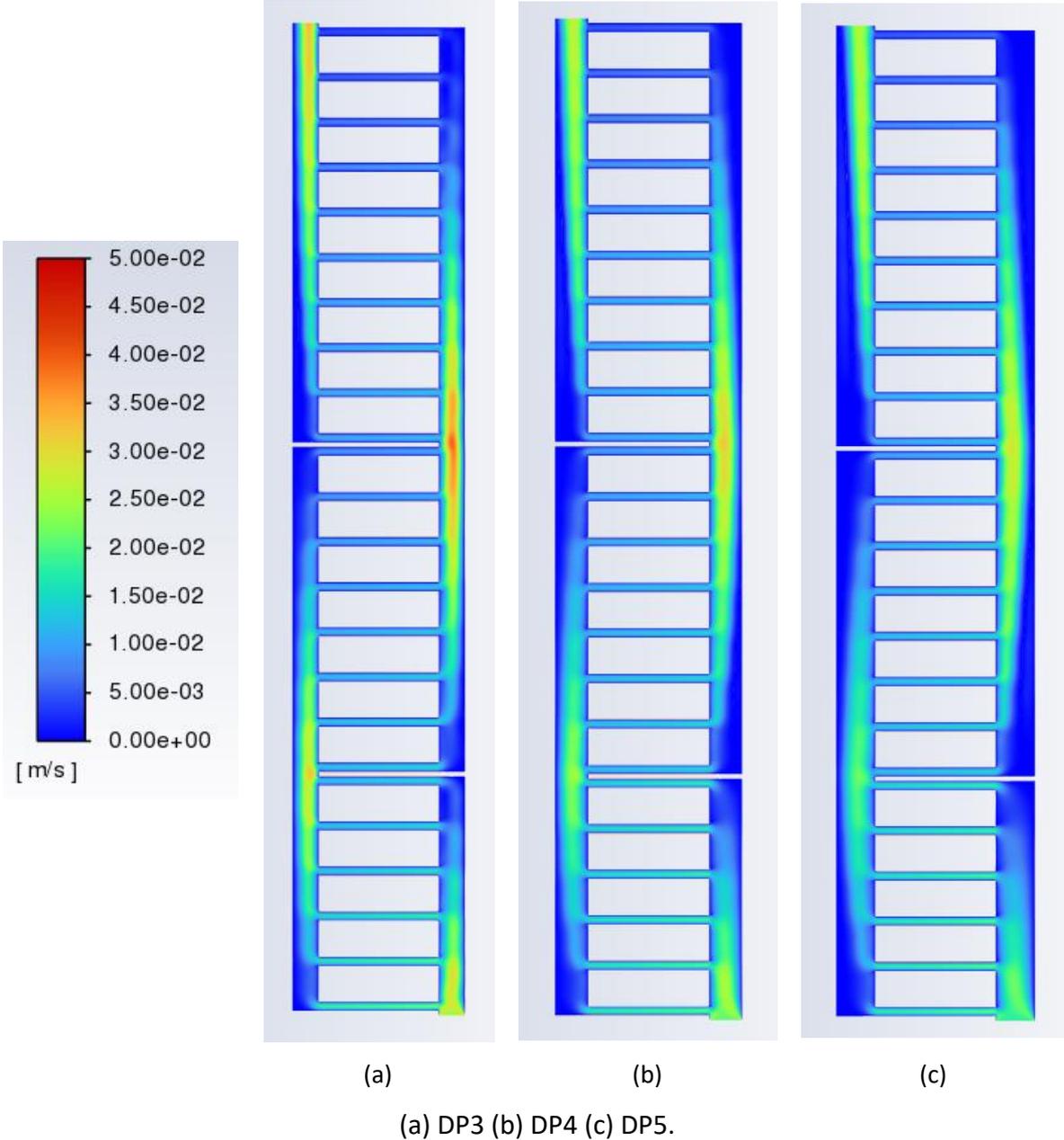


Figura 44 Distribución de velocidades de DP3, DP4 y DP5

9.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como vemos en el cómputo global de resultados y ya pudimos predecir, aumentar el tamaño de los canales seleccionados de nuestra pieza hace que obtengamos mejores prestaciones. Esto es lógico, cuanto más sección, podemos mitigar el efecto de una mayor viscosidad, más fluido puede transcurrir por los canales y refrigerar los discos. Por otro lado, una estructura más grande equivale a más costes, desde la construcción del propio sistema de refrigeración, como la cantidad de aceite y su mantenimiento etc. Como hicimos en anteriores evaluaciones nos hemos centrado solo en las prestaciones.

Tanto en temperatura media como en incremento de temperatura los resultados son mejores en cuanto mayor es la pieza. La solución que mejores datos obtiene es la DP5 y la peor la DP0 (pieza original), quedando el resto de las estructuras en orden de tamaño. Además, al aumentar el tamaño de los canales también conseguimos que la distribución de temperaturas a lo largo de la pieza sea más uniforme. En la pieza inicial existen mayores saltos de calor y diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas que en el resto de las estructuras. En los resultados gráficos (Figuras 41 y 42) se puede ver como al aumentar el ancho de los canales la temperatura del fluido se extiende por mayor superficie haciendo que reduzca su temperatura en mayor medida y como los colores amarillentos y rojizos disminuyen. En el caso de mayor temperatura máxima es sorprendentemente la estructura DP2 (86,3 °C) y no la inicial (85,6 °C). Es un resultado que no se esperaba, y que es de gran importancia en contra de la estructura DP2. Esto ocurre debido a las condiciones iniciales que necesita el fluido en esta geometría, que hace que en un determinado punto se llegue a esa temperatura lo que equivale a un error de diseño. DP1 obtiene un resultado intermedio entre ambos (81,6 °C). Después y como viene siendo tendencia en nuestro estudio, se sitúan en orden de tamaño. Hay que destacar las grandes diferencias que hay entre estas temperaturas, recordar que es la temperatura máxima alcanza en cualquier punto de la pieza y resulta un factor muy determinante a la hora de elegir la mejor solución.

Como es lógico, el que tiene una distribución menos uniforme es la primera estructura (DP0), al tener canales con una menor sección, provoca que se quede más fluido en las partes críticas. La segunda estructura (DP1) obtiene una mejor distribución del flujo, pero es el resto

de las estructuras (DP2 a DP5), las que obtienen los mejores valores. Esta tendencia donde mejor se aprecia es en las gráficas de velocidad del fluido (Figuras 43 y 44).

La capacidad de refrigeración y la distribución del fluido vemos que son proporcionales. Sumado a que una estructura mayor nos permite una mayor cantidad de líquido refrigerante provoca que cuanto mayor sea la estructura mejor para el transformador. En el siguiente estudio el objetivo será comprobar si dicha mejora hace que nuestro aceite biodegradable pueda competir con el aceite mineral.

10. ESTUDIO DE TODAS LAS OPCIONES

En este caso compararemos todas las opciones vistas hasta ahora. Como la malla óptima ya vimos que era la segunda, es la que utilizaremos, puesto que nos dará resultados más reales. En vez de hacer una comparación con todos los aceites y piezas, elegiremos aquellos que han obtenido mejores resultados. Por lo tanto, compararemos el aceite mineral con el aceite vegetal 1, junto con las geometrías DP4 Y DP5. Estas últimas son las piezas que mejores resultados obtuvieron en el anterior estudio.

El objetivo no es otro que ver si el aceite biodegradable puede competir con los aceites minerales modificando la geometría de la pieza.

Para ello, igual que llevamos haciendo en las últimas simulaciones, evaluaremos las siguientes características:

- Temperatura media de los conductores.
- Incremento de temperatura de cada conductor respecto a la temperatura de entrada.
- Flujo másico en cada sección RAC.
- Porcentaje de flujo másico del total en cada sección RAC.
- Temperaturas máximas alcanzadas.
- Número de Reynolds a la entrada.
- Número de Grashof.
- Diferencia entre temperatura de entrada y salida.
- Diferencia de presión entre la entrada y salida.
- Relación entre el número de Reynolds y el número de Grashof.

10.1. TEMPERATURA MEDIA DE LOS CONDUCTORES

Tabla 28 Comparación temperatura media [° C]

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	DP4	DP5
COND-1	64,581549	60,534176	60,624592	60,769155
COND-2	64,827915	60,973924	60,709312	60,968667
COND-3	64,230334	60,794748	61,008985	61,048876
COND-4	62,994505	59,835401	61,149153	61,364385
COND-5	61,616054	58,599403	61,192864	61,37908
COND-6	64,258121	66,241999	69,007249	69,151459
COND-7	67,210659	68,24068	68,06035	68,324721
COND-8	69,068784	70,706119	68,246887	68,444649
COND-9	70,663236	72,344548	68,573237	68,700285
COND-10	71,544818	72,928633	68,719891	68,746891
COND-11	71,569596	72,717901	68,762995	68,49188
COND-12	70,289111	71,815146	66,880313	66,773365
COND-13	77,084312	84,339344	74,844578	74,357735
COND-14	77,881433	85,265862	75,65922	75,09889
COND-15	78,627614	84,975425	76,269841	75,674102
COND-16	78,574925	84,668399	77,067541	76,681693
COND-17	78,196769	84,273141	77,667986	77,231194
COND-18	77,328268	83,097754	76,905329	75,952846
COND-19	76,086642	80,783661	75,491243	74,861264
COND-20	73,925826	76,677041	75,245536	74,875756
COND-21	69,945164	71,331644	75,383921	75,449339
NET	70,976459	72,911664	69,87957252	69,73077295

La menor temperatura media la obtiene la geometría DP5 (69,73 °C) mejorando en 3 °C a la versión original (72,9 °C) y obteniendo un mejor resultado que el aceite mineral (70,97 °C). Por primera vez en este trabajo un aceite biodegradable consigue refrigerar mejor que uno de origen mineral. En la Figura 45 se puede apreciar que quitando el primer sector, que es condicionado en gran medida con la temperatura de entrada, el resto de la pieza sigue estos resultados.

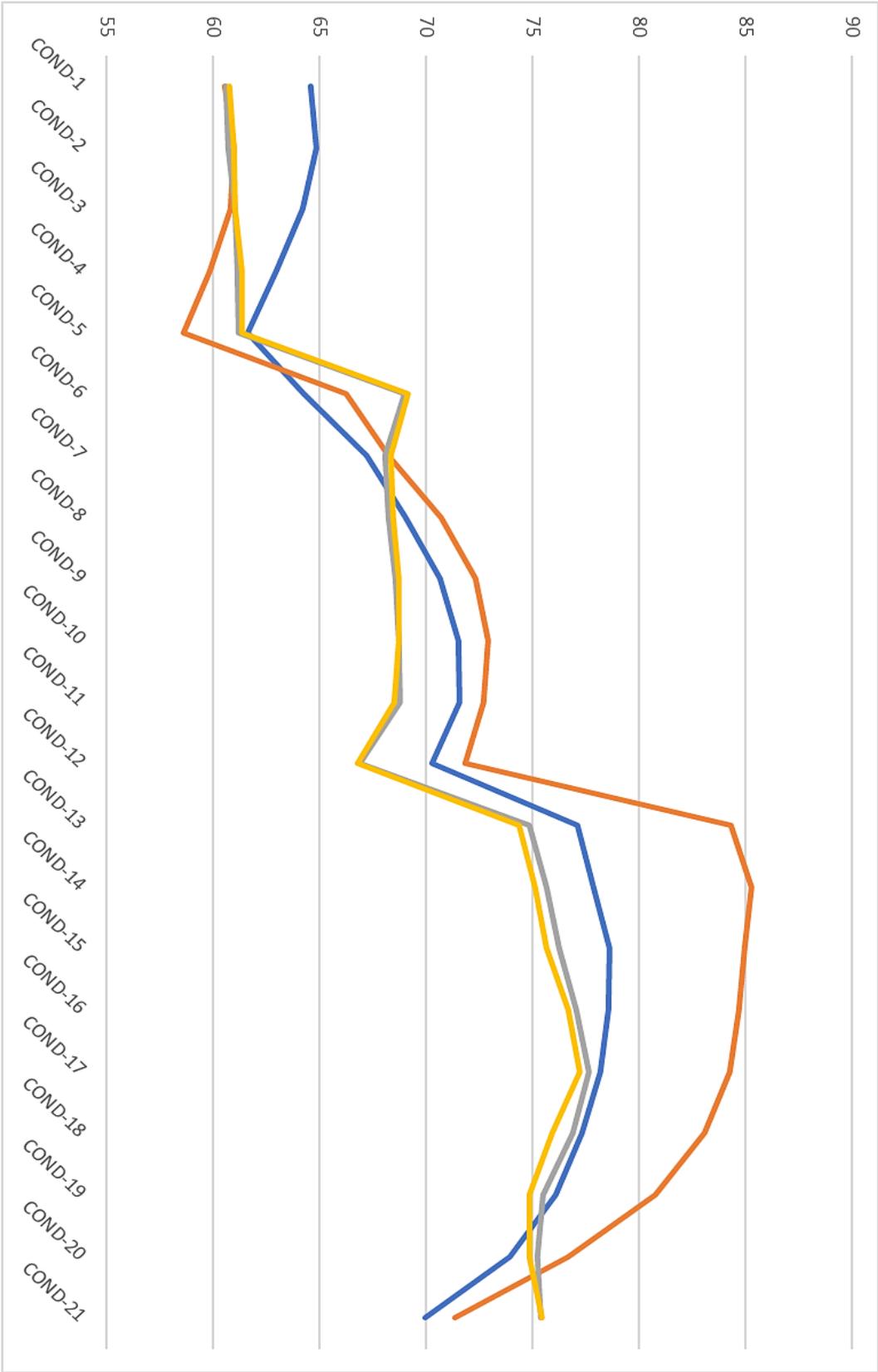


Figura 45 Comparación temperatura media [° C]

— Aceite mineral — Aceite vegetal 1 — DP4 — DP5

10.2. INCREMENTO DE TEMPERATURA RESPECTO A LA TEMPERATURA DE ENTRADA

Tabla 29 Comparación incremento temperatura [$^{\circ}$ C]

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	DP4	DP5
T $^{\circ}$ ENTRADA	42,6	37,55	41	41,28
COND-1	21,981549	22,984176	21,224592	20,669155
COND-2	22,227915	23,423924	21,309312	20,868667
COND-3	21,630334	23,244748	21,608985	20,948876
COND-4	20,394505	22,285401	21,749153	21,264385
COND-5	19,016054	21,049403	21,792864	21,27908
COND-6	21,658121	28,691999	29,607249	29,051459
COND-7	24,610659	30,69068	28,66035	28,224721
COND-8	26,468784	33,156119	28,846887	28,344649
COND-9	28,063236	34,794548	29,173237	28,600285
COND-10	28,944818	35,378633	29,319891	28,646891
COND-11	28,969596	35,167901	29,362995	28,39188
COND-12	27,689111	34,265146	27,480313	26,673365
COND-13	34,484312	46,789344	35,444578	34,257735
COND-14	35,281433	47,715862	36,25922	34,99889
COND-15	36,027614	47,425425	36,869841	35,574102
COND-16	35,974925	47,118399	37,667541	36,581693
COND-17	35,596769	46,723141	38,267986	37,131194
COND-18	34,728268	45,547754	37,505329	35,852846
COND-19	33,486642	43,233661	36,091243	34,761264
COND-20	31,325826	39,127041	35,845536	34,775756
COND-21	27,345164	33,781644	35,983921	35,349339
NET	28,376459	35,361664	30,47957252	29,63077295

En este caso y como se puede comprobar en la Tabla 29, vuelve a ser el aceite mineral el que obtiene el mejor resultado (28,37 $^{\circ}$ C), muy seguido de DP5 y DP4. Hay que recordar que esta es la diferencia de temperatura entre cada disco y la temperatura de entrada. Al ser mayor en el caso del aceite mineral, las diferencias son menores.

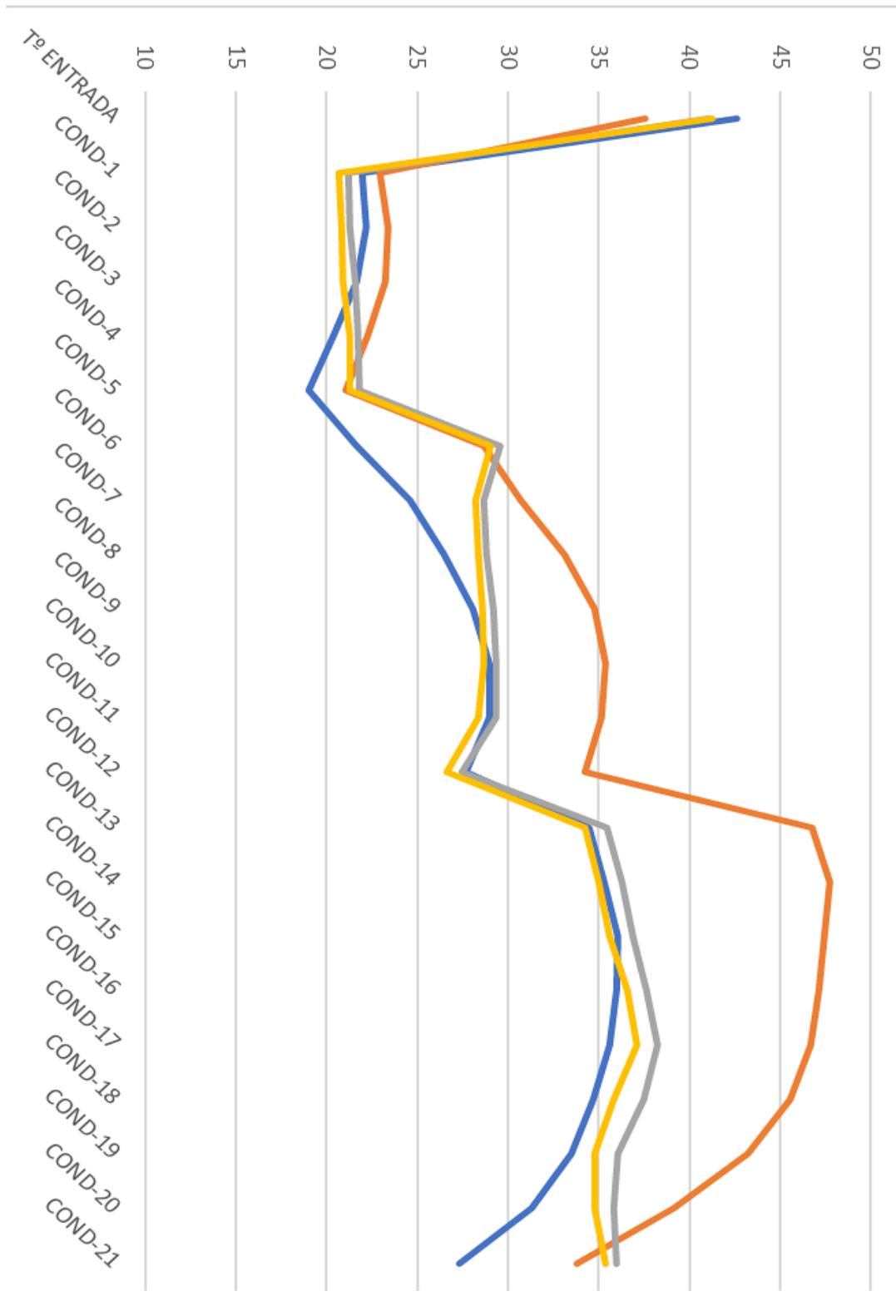


Figura 46 Comparación incremento temperatura [° C]

ACEITE MINERAL ACEITE VEGETAL 1 DP4 DP5

10.3. FLUJO MÁSSICO EN CADA SECCIÓN RAC

Tabla 30 Comparación flujo másico

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	DP4	DP5
FLUJO ENTRADA	0,695	0,36	0,529	0,549
RAD-1	0,098174647	0,05833618	0,097261832	0,10040814
RAD-2	0,089446336	0,0524980190	0,09425399	0,098118404
RAD-3	0,091537676	0,0504758610	0,088410492	0,092394582
RAD-4	0,10456043	0,0538685480	0,08412287	0,087353646
RAD-5	0,13273978	0,0637504970	0,081244605	0,083610054
RAD-6	0,18050674	0,0810060550	0,083438532	0,086942989
RAD-7	0,11768995	0,0809545230	0,07634618	0,076586685
RAD-8	0,10917809	0,0639161660	0,074972856	0,075864297
RAD-9	0,09289933	0,0502086530	0,070325792	0,071122416
RAD-10	0,081177589	0,0404625900	0,066246591	0,067249184
RAD-11	0,073549096	0,0340126080	0,062312523	0,06378158
RAD-12	0,070426135	0,0303612550	0,05860183	0,064184184
RAD-13	0,072038277	0,0292683280	0,058734738	0,064898646
RAD-14	0,080012723	0,0307574370	0,061106973	0,065253512
RAD-15	0,06836062	0,0525410030	0,070579124	0,066590881
RAD-16	0,076783469	0,0456258930	0,07264772	0,072238482
RAD-17	0,070980139	0,0380850310	0,067321755	0,069026796
RAD-18	0,064024035	0,0322121550	0,061779116	0,06543675
RAD-19	0,058514762	0,0283956260	0,056103638	0,060680431
RAD-20	0,055975508	0,0266461140	0,050634575	0,054836827
RAD-21	0,057472767	0,0269999170	0,044498111	0,048436691
RAD-22	0,064271456	0,0296954380	0,03846665	0,041701388
RAD-23	0,078351972	0,0352901390	0,032923941	0,034458141
RAD-24	0,10223221	0,04444719	0,033378745	0,035819114
NET	0,087120989	0,04499230	0,06607138	0,06862474

10.4. PORCENTAJE DE FLUJO MÁSSICO DEL TOTAL EN CADA SECCIÓN RAC

Tabla 30 Porcentaje de flujo por cada RAD (%)

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	DP4	DP5
FLUJO ENTRADA	0,695	0,36	0,529	0,549
RAD-1	14%	16%	18%	18%
RAD-2	13%	15%	18%	18%
RAD-3	13%	14%	17%	17%
RAD-4	15%	15%	16%	16%
RAD-5	19%	18%	15%	15%
RAD-6	26%	23%	16%	16%
RAD-7	17%	22%	14%	14%
RAD-8	16%	18%	14%	14%
RAD-9	13%	14%	13%	13%
RAD-10	12%	11%	13%	12%
RAD-11	11%	9%	12%	12%
RAD-12	10%	8%	11%	12%
RAD-13	10%	8%	11%	12%
RAD-14	12%	9%	12%	12%
RAD-15	10%	15%	13%	12%
RAD-16	11%	13%	14%	13%
RAD-17	10%	11%	13%	13%
RAD-18	9%	9%	12%	12%
RAD-19	8%	8%	11%	11%
RAD-20	8%	7%	10%	10%
RAD-21	8%	7%	8%	9%
RAD-22	9%	8%	7%	8%
RAD-23	11%	10%	6%	6%
RAD-24	15%	12%	6%	7%

La figura 47 nos muestra la distribución del líquido a lo largo de la pieza en los 4 ejemplos. Ya vimos que los aceites minerales se distribuían de una peor manera. Ahora con las nuevas geometrías DP4 y DP5 esta diferencia se acentúa. Ambas geometrías muestran una gran mejora respecto a la pieza inicial (aceite vegetal 1), y por lo tanto respecto al aceite mineral.

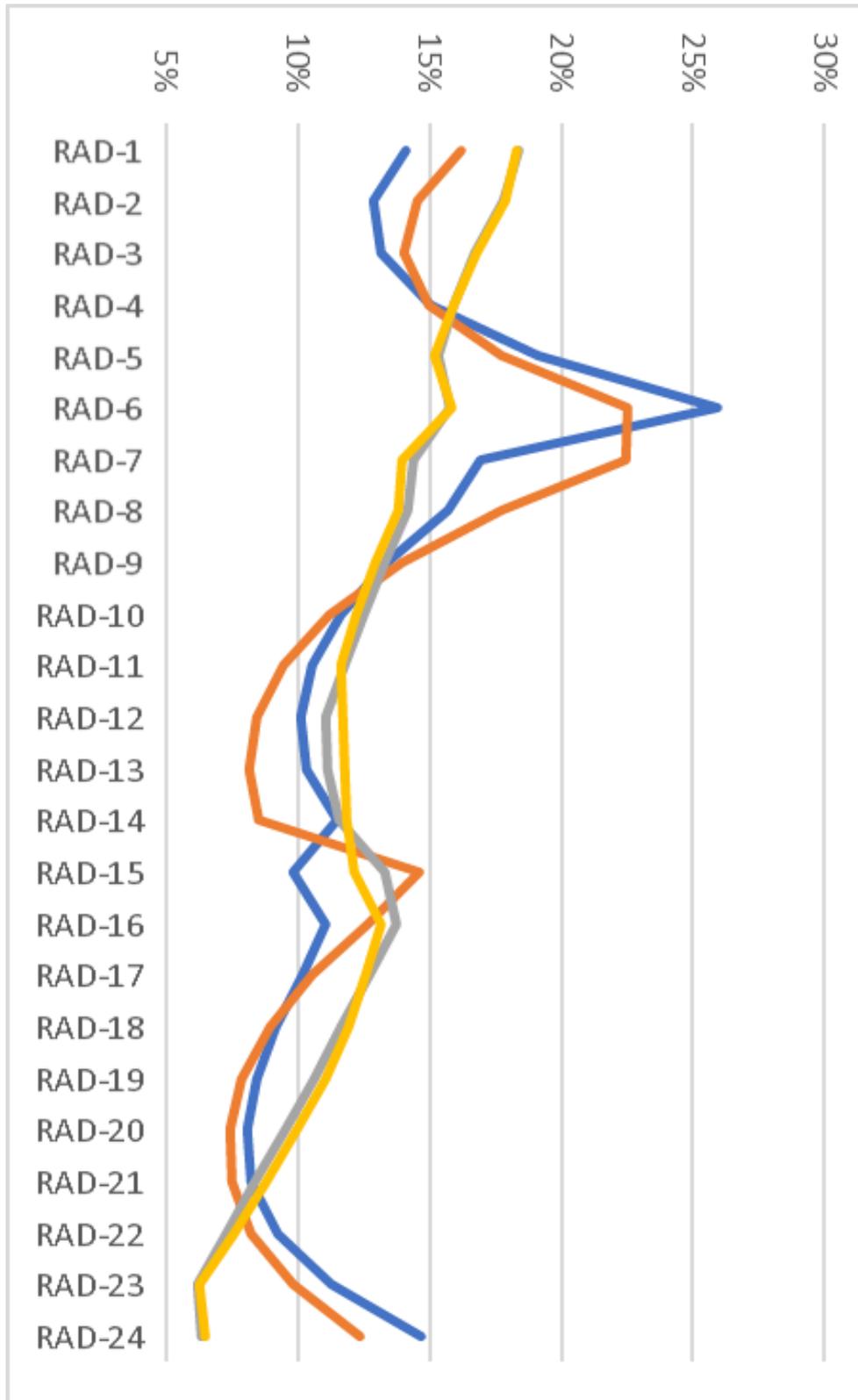


Figura 47 Comparación de distribución del flujo

— ACEITE MINERAL — ACEITE VEGETAL 1 — DP4 — DP5

10.5. TEMPERATURAS MÁXIMAS ALCANZADAS

Tabla 31 Comparación temperatura máxima [° C]

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	DP4	DP5
[° C] MAX	78,930109	85,585992	78,000726	77,575586

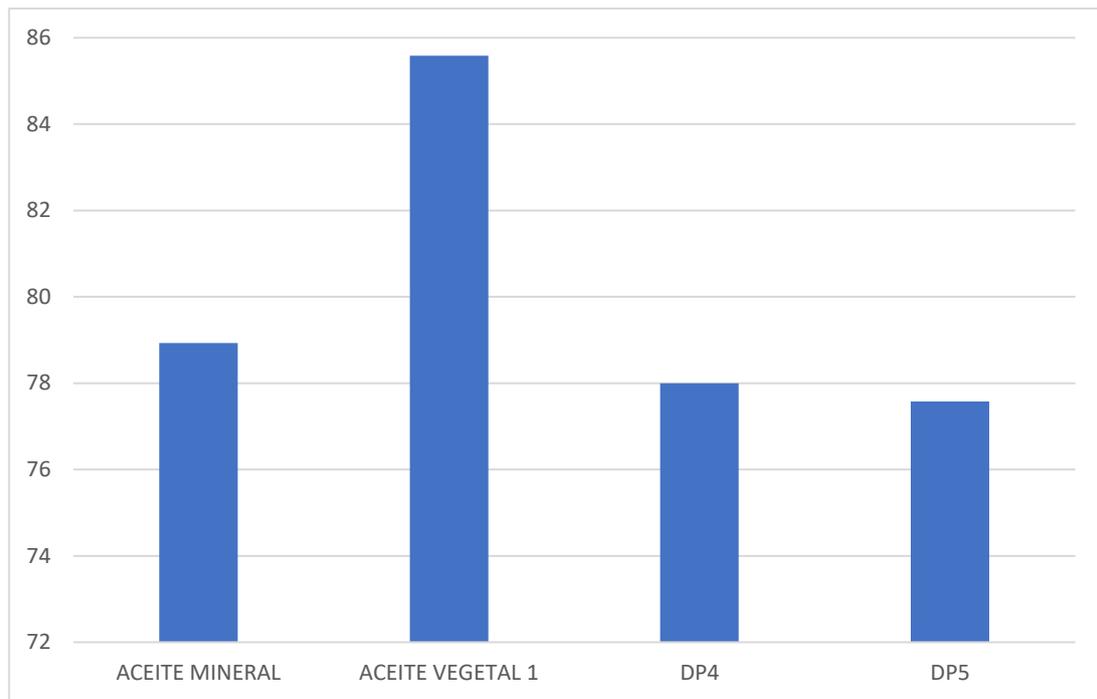


Figura 48 Comparación temperatura máxima [° C]

La Figura 48 es un gráfico de vital importancia. Las geometrías DP4 y DP5 no solo mejoran en gran medida a la pieza original, 77 °C respecto a 85°C, sino que mejoran la prestación del aceite mineral (78,93 °C). Resultado clave que nos permite ver que con la correcta geometría los aceites vegetales pueden obtener menores temperaturas. El caso que obtiene el mejor resultado es el DP5 (77,57 °C).

10.6. NÚMERO DE REYNOLDS A LA ENTRADA

El número de Reynolds es esencial en el estudio de mecánica de fluidos. Se trata de un número de carácter adimensional que establece la relación entre las fuerzas de tipo inercial y las viscosas de un fluido en constante movimiento (Pág 23). El objetivo principal de este número es concretar el comportamiento del fluido, es decir, saber con certeza si este es laminar o turbulento. Es de tipo laminar cuando las fuerzas de tipo viscoso son las dominantes y, además, el fluido se mueve a una velocidad muy pequeña y con una trayectoria rectilínea. En cambio, el fluido es turbulento cuando las fuerzas de tipo inercial son las mayoritarias, en cuyo caso el fluido tiene cambios en la velocidad y con trayectorias de tipo irregular.[15]

La transición entre el flujo de tipo laminar y el flujo de tipo turbulento sucede para valores del número de Reynolds que comprenden entre 2000 y 4000.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho \times D \times v}{\mu} = \frac{v \times D}{V} \quad (3)$$

- ρ = Densidad del fluido (kg/m^3).
- v = Velocidad del fluido (m/s).
- V = Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).
- μ = Viscosidad dinámica del fluido ($\frac{\text{kg}}{\text{m s}}$).
- D = Diámetro característico de la tubería (m^2).
- $D = \frac{\pi(\text{Re}^2 - \text{Ri}^2)}{2\pi(\text{Re} + \text{Ri})} = \frac{2(\text{Re}^2 - \text{Ri}^2)}{(\text{Re} + \text{Ri})} = 2(\text{Re} - \text{Ri}) = 2\emptyset$ $\emptyset = \text{Lint dict}$

Queremos conocer el número de Reynolds a la entrada por lo que tanto las velocidades como la secciones serán las de entrada.

Tabla 32 Comparación número de Reynolds a la entrada

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	DP4	DP5
ρ	870,97	910,59	910,59	910,59
D	0,009	0,009	0,015	0,018
ν	0,04883	0,02412	0,02105	0,01811
μ	0,0066094	0,02968	0,02968	0,02968
Número de Reynolds	115,82460	13,32000	19,37458	20,00230

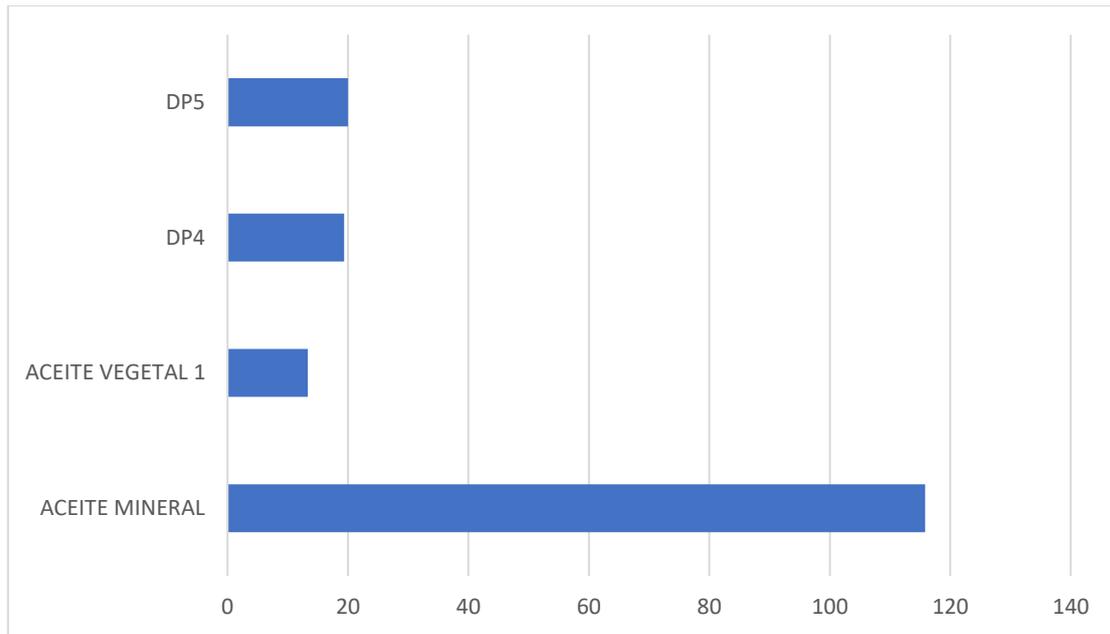


Figura 49 Comparación número de Reynolds a la entrada

Obtenemos en todos los casos flujo laminar, muy lejos del cambio a turbulento (2000-4000). Otra vez vemos la diferencia entre los aceites de origen mineral y vegetal. Dentro de la fórmula del número de Reynolds tenemos la velocidad en el numerador y la viscosidad en el denominador. Los aceites vegetales tienen un coeficiente de viscosidad mayor que los minerales. Esta viscosidad produce una resistencia al avance y por ello una menor velocidad. Dentro de los cambios de geometría, vemos que aumenta a medida que aumentamos el diámetro.

10.7. NÚMERO DE GRASHOF

El número de Grashof es un número adimensional que se define como la relación entre la fuerza de flotación y la fuerza viscosa que actúa sobre un fluido en la capa límite de velocidad.

La convección puede ser clasificada como natural o forzada, dependiendo de lo que es que esté en el origen del flujo. La convección natural ocurre cuando la velocidad del fluido es cero, como por ejemplo el aire en una habitación (Pág 23). En cambio, la convección forzada es cuando la velocidad es distinta a cero. Dentro de la convección forzada se pueden distinguir tres zonas, laminar, intermedia y turbulenta. En nuestro caso es convección natural, el fluido no es obligado a escurrirse por el interior de una tubería, por acción de elementos exteriores como un ventilador o una bomba (Pág 17). En la convección natural el movimiento observado es provocado por diferencias en las fuerzas gravitatorias.[16][17]

La convección puede también ser clasificada como externa o interna, dependiendo si el flujo ocurre en una superficie o al interior de un canal, en nuestro experimento al transcurrir el fluido por dentro de canales, se trata de tipo interna.

$$Gr = \frac{g \times \beta \times \Delta T \times l^3}{\nu^2} \quad (4)$$

- ν = Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).
- G = gravedad = 9,81 (m/s).
- ΔT = Diferencia entre la temperatura de entrada del fluido y de salida.
- l = Longitud característica. En este caso en $0,77 \times D^2$ m
 - 0,77 es la distancia entre los puntos medios del devanado y de nuestro sistema de refrigeración (radiador) del transformador.
 - D es el diámetro del flujo de entrada, en este caso 'Lint duct'.
- β = Coeficiente de expansión térmica (1/k).

Tabla 33 Comparación número de Grashof

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	DP4	DP5
T ENTRADA [° C]	42,6	37,55	41	41,28
T SALIDA [° C]	55,523	63,1	58,512	57,89
ν	7,58854E-06	3,25943E-05	3,25943E-05	3,25943E-05
ΔT [° C]	12,923	25,55	17,512	16,61
β	0,00065	0,000724	0,000724	0,000724
Número de Grashof	89249,35515	10653,49686	20283,10904	27703,2615

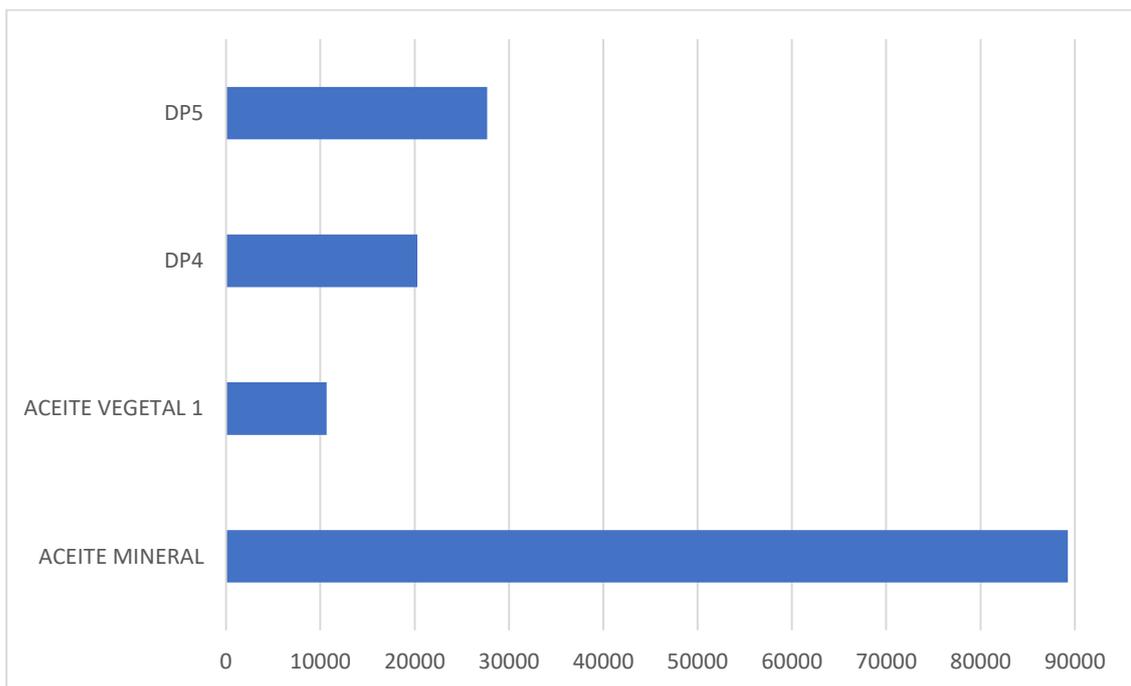


Figura 50 Comparación número de Grashof

Un mayor número de Grashof supone una mayor convección natural, que es lo que buscamos. Esto implicaría una mejor refrigeración.

10.8. DIFERENCIA DE TEMPERATURAS ENTRE LA ENTRADA Y LA SALIDA

Tabla 34 Comparación diferencia de temperaturas [° C]

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	DP4	DP5
T ENTRADA [° C]	42.6	37.55	41	41.28
T SALIDA [° C]	55.523	63.10	58.512	57.89
ΔT [° C]	12,923	25,5500000	17,512	16,61

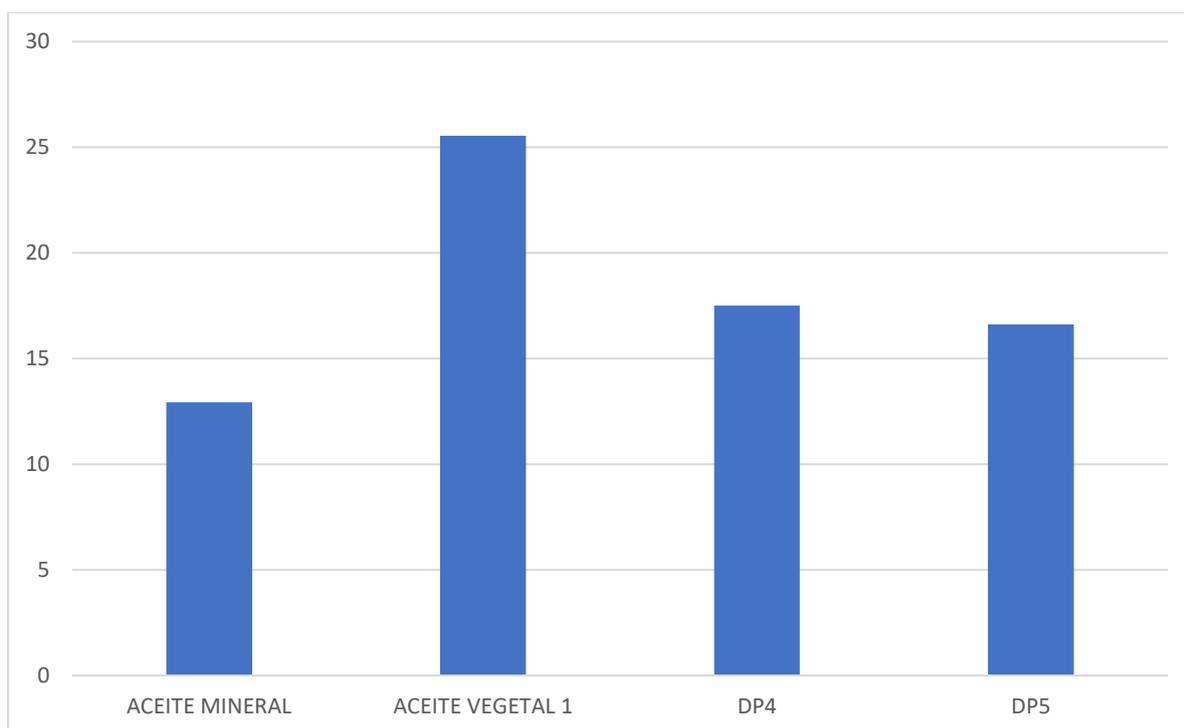


Figura 51 Comparación diferencia de temperaturas [° C]

Nuestro sistema de refrigeración es autosuficiente y no necesita de un aporte de energía exterior. Cuanto menor sea la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida, menos trabajo realizara el radiador. Su función es que el fluido pueda llegar a la entrada con su temperatura correspondiente.

El aceite mineral es que menor diferencia obtiene (12,9 °C). Dentro de los aceites biodegradables, la pieza original tiene la mayor (25,55 °C). Al aumentar el tamaño de la pieza conseguimos reducir dicha diferencia.

10.9. DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE LA ENTRADA Y LA SALIDA

Como ya dijimos, todas las simulaciones han sido realizadas con una presión de salida de 0 (Pa). Por este motivo, para calcular la diferencia de presión entre la entrada y la salida sólo hemos de obtener la presión de entrada. Las presiones altas como vimos en los apartados 4.1 y 4.2, no son beneficiosas y producen una pérdida de capacidad de refrigeración.

Tabla 35 Comparación diferencia de presiones [Pa]

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	DP4	DP5
P ENTRADA [Pa]	19,45	53,39	25,539	24,872

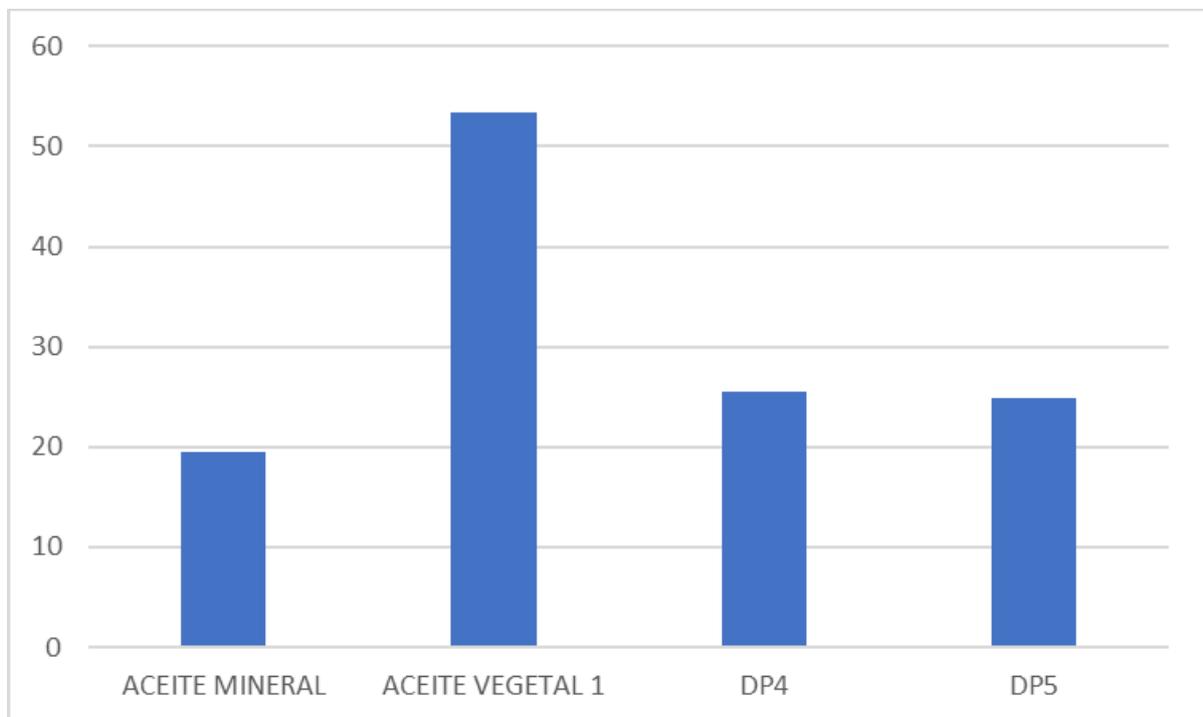


Figura 52 Comparación diferencia de presiones [Pa]

El resultado es el mismo que el obtenido para que en la Figura 51 correspondiente con la diferencia de temperaturas. El menor valor lo obtiene el aceite mineral una vez más (19,45 Pa). Al igual que ocurría en el anterior estudio, las diferencias disminuyen cuando aumentamos las dimensiones del sistema. Se puede ver una clara tendencia a una bajada del intervalo de presiones a medida que aumentan las dimensiones de la pieza, partiendo de 53,39 Pa en la disposición inicial, hasta menos de la mitad en la geometría DP5 (24,87 Pa), cerca del aceite mineral.

10.10. RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE REYNOLDS Y EL NÚMERO DE GRASHOF

Esta relación nos permite saber si el fluido trabaja en convección natural (que es lo que en un principio buscamos) o mixta (natural y forzada). En el caso de ser mixta habría también convección forzada, cosa que haría disminuir el poder de refrigeración.[17]

$$\text{Relación} = \frac{Gr}{Re^2} \quad (6)$$

Si esta relación está cerca de 1 querrá decir que es mixta. Por ello buscamos obtener valores lo más altos posibles y lejos de convección mixta.

Tabla 36 Comparación relación Reynolds y Grashof

	ACEITE MINERAL	ACEITE VEGETAL 1	DP4	DP5
Gr/(Re ²)	6,65	60,05	54,03	69,24

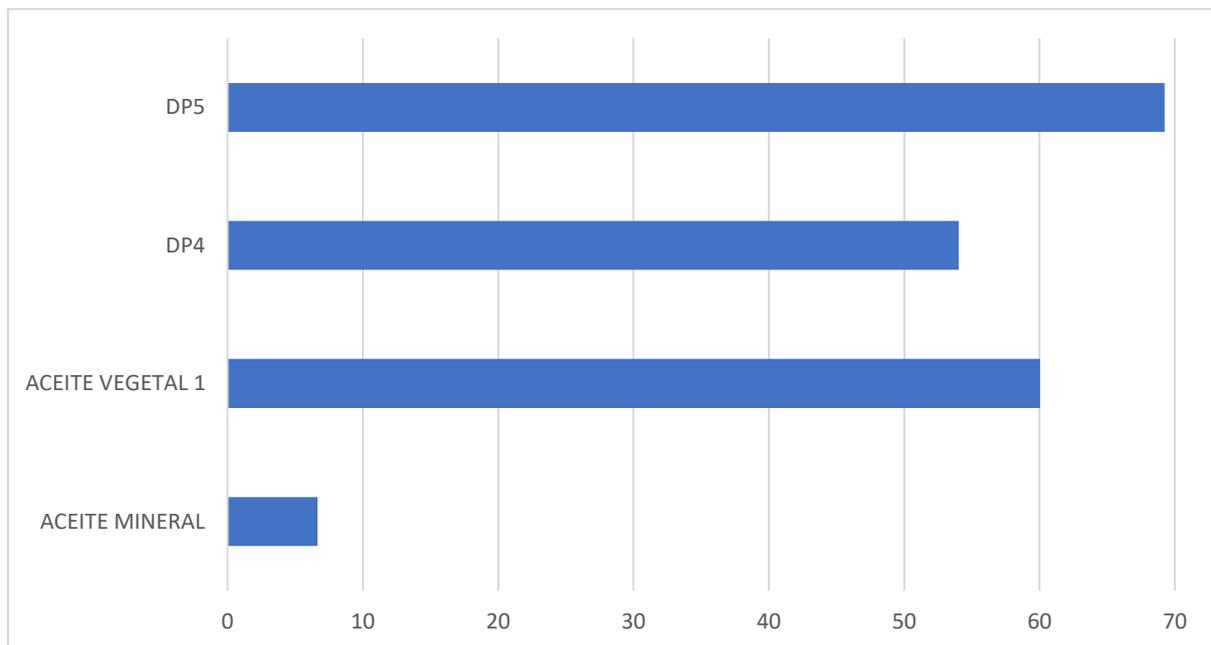


Figura 53 Comparación relación Reynolds y Grashof

Diferencias muy amplias entre tipologías, al igual que ocurría en los números de Reynolds y Grashof. Vemos que en el aceite mineral predomina en una mayor medida la convección forzada. Siendo la pieza DP5 donde menos hay.

11. EVALUACIÓN DE TODOS LOS RESULTADOS

A continuación, vamos a valorar cada uno de los apartados sometidos a estudio y veremos que aceites obtienen mejores prestaciones en cada uno.

11.1. TEMPERATURA MEDIA DE LOS CONDUCTORES

Este apartado es muy importante para poder ver que aceite y geometría es la que consigue que los devanados del transformador se mantengan a una menor temperatura promedio.

La menor temperatura media la obtiene la geometría DP5 (69,73 °C) mejorando en 3 °C a la versión original (72,9 °C) y obteniendo un mejor resultado que el aceite mineral (70,97 °C). En el apartado de cambios de geometría se ve claramente como a medida que aumentamos las dimensiones de nuestra pieza, lógicamente, obtenemos mejores resultados. Por primera vez en este trabajo el aceite biodegradable consigue refrigerar mejor que uno de origen mineral. En la Figura 45 se puede apreciar que en el primer sector el aceite mineral y DP0 obtienen temperaturas menores, que es condicionado en gran medida con la temperatura de entrada. El resto de la pieza tanto DP4 como DP5 refrigeran mejor la pieza, que es donde se alcanzan temperaturas mayores.

11.2. INCREMENTO DE TEMPERATURA RESPECTO A LA TEMPERATURA DE ENTRADA EN CADA CONDUCTOR

Estudio muy parecido al anterior, pero esta vez se evalúa la diferencia entre la temperatura media de cada conductor y la temperatura de entrada del fluido, que cambia en cada uno de los apartados a estudio.

En este caso y como se puede comprobar en la Tabla 29 y Figura 46, el aceite mineral es el que obtiene el mejor resultado (28,37 °C), muy seguido de DP5 y DP4. Hay que recordar que se estudia la diferencia de temperatura entre cada disco y la temperatura de entrada. Al ser mayor en el caso del aceite mineral (42,6 °C), las diferencias son menores. La pieza original tiene la menor temperatura de entrada (37,55°C) y la peor temperatura media, justificando así su resultado tan lejos del resto.

11.3. DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO MÁSSICO

Este aparatado nos permite saber la distribución del fluido a través de toda la pieza y ver si se esparce de manera uniforme por toda la pieza o no. Las zonas donde el porcentaje es menor se refrigeran peor, por lo que las temperaturas son mayores.

En este campo el aceite mineral sale peor parado que los vegetales. En la Figura 47 se puede ver como la línea de este aceite es el que más fluctúa. En todos los casos se aprecia una gran subida en el primer sector (rads 6-7) que coincide con el cambio al segundo sector, aumentando en gran medida sobre todo en el aceite mineral. También se aprecia la subida en el cambio al tercer sector con un notable aumento en el RAD 15.

En el estudio de cambio de dimensiones de pieza, como se podía suponer, al hacer más anchos los canales axiales el aceite se distribuye de manera más uniforme. Se diferencia un gran cambio entre la pieza original con DP4 y DP5. Las líneas correspondientes con estos apartados son la más estables, siendo una vez más DP5 el mejor resultado.

11.4. TEMPERATURAS MÁXIMAS ALCANZADAS

La temperatura máxima alcanzada es un apartado crítico. Independientemente de la temperatura media, si se alcanza una temperatura máxima en cualquier punto mayor de lo estimado, quiere decir que hay un error en la geometría o que el aceite no es lo suficientemente bueno. La temperatura máxima hay que tenerla muy en cuenta y no puede sobrepasar unos márgenes establecidos por cada fabricante. Por este motivo la Tabla 31 y la Figura 48 son de vital importancia.

Las geometrías DP4 y DP5 mejoran en gran medida a la pieza original (77 °C respecto a 85°C), y además mejoran la prestación del aceite mineral (78,93 °C). Resultado clave que nos permite ver que con la correcta geometría los aceites vegetales pueden obtener menores temperaturas. El caso que obtiene el mejor valor obtiene es el DP5 (77,57 °C) y el que peor la pieza original (85,58°C) resultado muy abultado que justifica en gran medida el aumento de tamaño de los canales.

11.5. NÚMERO DE REYNOLDS A LA ENTRADA

El objetivo principal de este número es concretar el comportamiento del fluido, es decir, saber con certeza si su comportamiento es laminar o turbulento.

Obtenemos en todos los casos flujo laminar, muy lejos del cambio a turbulento (2000-4000).

En la Tabla 32 y Figura 49 vemos la gran diferencia entre los aceites de origen mineral y vegetal. El número de Reynolds en el caso del aceite mineral (115,82) es 10 veces mayor que en el aceite vegetal 1 (13,32) y cinco veces mayor que la pieza DP5 (20). La mayor viscosidad de los aceites vegetales hace que se muevan con una menor velocidad. Estos resultados son inversamente proporcionales a los obtenidos en las temperaturas. Este fenómeno nos hace suponer que cuando más rápido se mueve el fluido, mejores prestaciones obtenemos.

Cumpliendo con esta hipótesis, al aumentar el ancho de los canales, aumenta la velocidad y así el número de Reynolds. DP4 (19,37) tiene un menor número de Reynolds a la entrada que DP5 (20).

11.6. NÚMERO DE GRASHOF

El número de Grashof es un número adimensional que se define como la relación entre la fuerza de flotación y la fuerza viscosa que actúa sobre un fluido en la capa límite de velocidad. Un mayor número de Grashof supone una mayor convección natural, que es lo que buscamos, esto repercutiría en una mejor refrigeración.

El resultado del número de Grashof proviene en una mayor medida de la viscosidad cinemática del fluido y del diámetro del canal. Por este motivo se explica la gran diferencia entre el aceite mineral (89.249) y los aceites vegetales (~10.000). Al ser de distinta tipología (vegetales más viscosos), avanzan de manera muy distinta por el interior de los canales (más lenta). Aunque, como ya hemos dicho buscamos un mayor número de Grashof, no es tanta la diferencia de poder refrigerante entre estas tipologías como lo es en cuanto al número de Grashof.

Dentro del estudio de dimensionamiento, al aumentar el tamaño de los canales aumenta el número de Grashof, reflejándose esto en la Figura 50.

11.7. DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE LA ENTRADA Y LA SALIDA

El sistema no necesita de un suministro de energía, es autosuficiente. Es capaz de enfriar el fluido con la energía que desprenden los conductores. Cuanto menor sea la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida, menor energía realizara el radiador, cuya función es que el fluido llegue a la entrada con su temperatura correspondiente. Una mayor diferencia de temperatura entre la entrada y la salida supone una mayor perdida de carga del refrigerante.

El aceite mineral es que menor diferencia obtiene (12,9 °C). Dentro de los aceites biodegradables, la pieza original (DP0) tiene la mayor (25,55 ° C).

Observamos que a medida que aumentan las dimensiones de nuestro sistema obtenemos una menor diferencia entre las temperaturas y por lo tanto un mejor rendimiento.

11.8. DIFERENCIA DE PRESIÓN ENTRE LA ENTRADA Y LA SALIDA

Las presiones altas y grandes diferencias de presión, como vimos en los apartados 4.1 y 4.2, no son beneficiosas y producen una pérdida de capacidad de refrigeración (pérdida de carga).

La menor diferencia la obtiene el aceite mineral una vez más (19,45 Pa). Al igual que ocurría en el anterior estudio, las diferencias disminuyen cuando aumentamos las dimensiones del sistema. Se puede ver una clara tendencia a una bajada del intervalo de presiones a medida que aumentan las dimensiones de la pieza, partiendo de 53,39 (Pa) en la disposición inicial, hasta menos de la mitad en la geometría DP5 (24,87 Pa), valor cerca del aceite mineral.

11.9. RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE REYNOLDS Y EL NÚMERO DE GRASHOF

Este ensayo nos permite saber si el fluido trabaja en convección natural (que es lo que en un principio buscamos) o mixta (natural y forzada). En el caso de ser mixta habría también convección forzada, cosa que haría disminuir el poder de refrigeración.

Buscamos obtener valores lo más altos posibles, si el valor es igual a 1, quiere decir que se trata de convección mixta.

El valor más alto lo obtiene la geometría DP5 (69,24). Por último, se encuentra el aceite mineral (6,65). Encontramos diferencias muy amplias entre tipologías, al igual que ocurría en los números de Reynolds y Grashof. Vemos que en el aceite mineral predomina en una mayor medida la convección forzada. Siendo la pieza DP5 donde menos hay. Esto se debe una vez más a la diferencia de velocidades entre ambas tipologías.

12. CONCLUSIÓN

El propósito de este estudio es un estudio teórico del impacto de modificar la geometría de los canales de refrigeración del transformador para el uso de esteres naturales. En este ensayo no se han tenido en cuenta las cualidades de cada tipo de aceite referidas a seguridad, mantenimiento, su facilidad de obtención etc. Estas propiedades sí se tienen en cuenta a la hora de elegir el fluido para un sistema de refrigeración. Las empresas tienen unos objetivos medioambientales y de seguridad que cumplir, motivo por el que los aceites biodegradables se están empezando a implementar en estos sistemas. El propósito de las simulaciones que hemos realizado no ha sido otro que el de ver su habilidad de mantener los devanados del transformador a una temperatura lo más baja posible, de la manera más eficiente y si las nuevas tecnologías de aceites son capaces de competir con los históricamente usados aceites minerales.

Durante todo el estudio hemos visto las claras diferencias que existen entre las dos tipologías de aceite. Entre todos ellos, el que ha sido capaz de enfriar mejor el devanado de nuestro transformador es el aceite mineral, con una gran diferencia. Además, es el que sus propiedades varían menos entre la entrada y la salida. Es el que menor diferencias de presión y temperatura tiene a lo largo de la pieza, lo que resulta en una menor pérdida de carga. A diferencia de los otros aceites, el aceite mineral tiene una menor viscosidad. Esto produce que se mueva más rápido por la pieza pero que se distribuya de una peor manera a lo largo de toda la geometría. Por estos motivos, es el que mejores prestaciones obtiene entre todos los aceites estudiados. Por otro lado, su mantenimiento es mayor, debido a su alta degradación. Pero su mayor defecto es la seguridad, su punto de inflamación es relativamente bajo (150 °C) lo que puede producir incendios. Además, tiene un bajo grado de biodegradación y requiere de un tratamiento posterior a su uso. Esto va en contra de los objetivos medioambientales que tenemos en Europa en la actualidad.

Dentro de los aceites vegetales el que mejores resultados ha obtenido es el aceite vegetal 1 o aceite de soja. Aunque en muchos aspectos obtenga resultados parecidos al aceite vegetal 3 (sintético), en general es el que obtiene los valores más fiables. El que peor consigue enfriar el devanado y obtiene los peores resultados, lejos de los otros dos, es el aceite vegetal 2, proveniente de la colza. Observando este estudio nos preguntamos porque entonces la

industria está implementando últimamente esta tipología de aceites. El motivo es que las ventajas de estos aceites son sobre todo ambientales y de seguridad. A pesar de no obtener los resultados del aceite mineral en cuanto a refrigeración, hemos demostrado que sus prestaciones no están lejos y que sí están preparados para funcionar en estos sistemas de refrigeración. Sus principales cualidades son que son fácilmente biodegradables y tienen un mayor punto de inflamación, por lo tanto, más seguros.

La última parte del ensayo ha sido ver cómo el aumento de tamaño de nuestra pieza influiría en la refrigeración. Los datos obtenidos nos muestran que, como es lógico, al aumentar nuestra geometría mejoran los resultados. Cabe destacar que no tenemos en cuenta que al aumentar la pieza los costes de construcción y mantenimiento aumentan, además de sus dimensiones. En algún caso, como en la pieza DP2, vemos como los resultados si empeoran. Al cambiar la geometría pueden aparecer vórtices que generan picos de temperatura lo que equivale a un error de diseño. La estructura que mejores resultados ha obtenido es la mayor, la DP5. En muchos casos, esta geometría consigue superar a los resultados del aceite mineral. Hay que recordar que este estudio se hizo con el aceite que mejores resultados obtuvo de entre los biodegradables, el aceite de soja. Esto es muy importante ya que hemos podido comprobar que, si se quieren cambiar los aceites de origen mineral por la nueva generación de aceites vegetales, al aumentar las dimensiones del sistema se podría igualar e incluso superar las prestaciones, contando además con las cualidades que tienen los aceites biodegradables.

13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Di Gerardo, R. Perini. “Appunti di Macchine Elettriche”. Politecnico di Milano
- [2] <https://patentados.com/2013/transformador-de-devanado-de-disco> (Mayo, 2023)
- [3] [https://www.editoressrl.com.ar/revistas/ie/304/ingenieria_mayo_potencia_nominal#:~:t=ONAN%3A%20Circulaci%C3%B3n%20del%20aceite%20en,forma%20forzada%20\(con%20ventiladores\)](https://www.editoressrl.com.ar/revistas/ie/304/ingenieria_mayo_potencia_nominal#:~:t=ONAN%3A%20Circulaci%C3%B3n%20del%20aceite%20en,forma%20forzada%20(con%20ventiladores)) (Mayo, 2023)
- [4] F. Torriano, H. Campelo, M. Quintela, P. Labbé, P. Picher. “Numerical and experimental thermofluid investigation of different disc-type power transformer winding arrangements”, *International Journal of Heat and Fluid*, vol. 69, pp. 62-72, 2018. doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.11.007.
- [5] M. Sorgic and Z. Radakovic. “Oil-forced versus oil-directed cooling of power transformers”, *IEEE Transactions on Power Delivery.*, vol. 25, no. 4, pp. 2590–2598, 2010.
- [6] F. Torriano, P. Picher, M. Chaaban. “Applied Thermal Engineering: Numerical investigation of 3D flow and thermal effects in a disc-type transformer winding.”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 40, pp. 121-131, 2012. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.02.011.
- [7] F. Torriano, M. Chaaban, P. Picher. “Applied Thermal Engineering: Numerical study of parameters affecting the temperature distribution in a disc-type transformer winding.”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, Issues 14–15, pp. 2034-2044, 2010. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.05.004.
- [8] G.R. Rodriguez, L. Garelli, M. Storti, D. Granata, M. Amadei, M. Rossetti. “Applied Thermal Engineering: Numerical and experimental thermo-fluid dynamic analysis of a power transformer working in ONAN mode.”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 112, pp. 1271-1280, 2017. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.171.

[9] <https://metode.es/revistas-metode/monograficos/equacions-navier-stokes.html>

(Mayo, 2023)

[10] M. Quintela, H. Campelo F. Torriano, P. Labbé, P. Picher. "Assumptions and Numerical Parameters Influencing the Accuracy of Thermal Models for Core-Type Power Transformer Windings.", 4th International Colloquium "Transformer Research and Asset Management", Pula, Croatia, May 10-12, 15 pp., 2017.

[11] Ansys Fluent (Fluid Simulation Software) (ANSYS, Inc) 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317

[12] <https://www.energeticahoy.com/post/2018/03/10/el-aceite-vegetal-como-diel%C3%A9ctrico-una-soluci%C3%B3n-rentable-y-ecol%C3%B3gica> (Mayo, 2023)

[13] <https://www.energeticahoy.com/post/ventajas-del-aceite-vegetal> (Mayo, 2023)

[14] W. Van der Veken, S. B. Paramane, R. Mertens, V. Chandak and J. Coddé, "Increased Efficiency of Thermal Calculations via the Development of a Full Thermohydraulic Radiator Model," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 4, pp. 1473-1481, 2016. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2501431.

[15] <https://ielogis.com/numero-reynolds-calculo/> (Mayo, 2023)

[16] https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-grashof-definicion/?utm_content=cmp-true (Mayo, 2023)

[17] <https://fisica.laguia2000.com/complementos-matematicos/numero-de-grashof>
(Mayo, 2023)

[18] <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/> (Junio, 2023)

[19] <https://lebalap.academy/f1/simulacion-cfd/> (Junio, 2023)