



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ALCOY



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOY

TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**“Diseño de un radiador tipo panal de abeja para
una moto de competición”**

Autor:

Jaime Palos Cuesta

Tutor:

Dr. Carlos Micó Reche

Julio 2020



“A mis padres y mi hermano por ser un continuo apoyo durante esta etapa académica que termina, por ayudar a mejorar los mejores momentos y ser un pilar donde apoyarse en los peores. A mis amigos por poder compartir los cientos de experiencias juntos. A mi tutor, Carlos, por dar lo mejor de sí para obtener el mejor resultado posible con este proyecto”





Resumen

“Diseño de un radiador tipo panal de abeja para una moto de competición”

El presente trabajo tiene como objetivo el diseño y dimensionamiento de un radiador para el sistema de refrigeración de una moto de competición. El trabajo aborda el diseño desde el punto de vista tanto de la aerodinámica exterior como de la conducción interior del refrigerante. El objetivo es conseguir un radiador que ofrezca las prestaciones requeridas, lo más pequeño y ligero posible puesto que éstos son parámetros determinantes en competición. Además, este trabajo también va a evaluar el proceso de fabricación más adecuado y los costes asociados.





Summary

“Design of a honeycomb radiator for a racing bike”

The present work aims at designing and sizing a radiator for the cooling system of a racing bike. The work addresses the design from the point of view of both the external aerodynamics and the internal handling of the coolant. The aim is to achieve a radiator that offers the required performance, as small and light as possible, since these are determining parameters in competition. In addition, this work will also evaluate the most suitable manufacturing process and the associated costs.





Resum

“Disseny d’un radiador tipus bresca d’abella per a una moto de competició”

El present treball té com a objectiu el disseny i dimensionament d’un radiador per al sistema de refrigeració d’una moto de competició. El treball aborda el disseny des del punt de vista tant de l’aerodinàmica exterior com de la conducció interior del refrigerant. L’objectiu és aconseguir un radiador que ofereixi les prestacions requerides, el més petit i lleuger possible ja que aquests són paràmetres determinants en competició. A més, aquest treball també va a avaluar el procés de fabricació més adequat i els costos associats.





Contenidos

1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodología	3
1.4 Competición.....	3
1.4.1 MS1	4
1.4.2 MS2	5
1.4.3 Normativa relativa a los sistemas de refrigeración.....	5
2. Sistemas de refrigeración	7
2.1 Sistemas de refrigeración	8
3. Fundamentos Teóricos	13
3.1 Funcionamiento de los MCIA.....	14
3.1.1 Tipos de MCIA.....	15
3.2 Procesos termodinámicos	15
3.2.1 Transmisión de calor.....	15
3.2.2 Transferencia de calor en el sistema de refrigeración	17
4. Cálculos.....	19
4.1 Cálculos.....	20



4.2 Velocidad aproximada del vehículo.....	20
4.3 Prediseño	21
4.3.1 Calor disipado al sistema de refrigeración	22
4.3.2 Caudal de aire que pasa a través del radiador	23
4.3.3 Gasto volumétrico y gasto másico de refrigerante	23
4.2.4 Temperaturas medias alcanzadas	24
4.3.5 Superficie total de intercambio de calor	25
4.3.6 Superficie frontal del radiador	25
4.3.7 Profundidad del radiador	26
5. Diseño	27
5.1 Diseños preliminares	28
5.2 Diseño final	29
6. Simulaciones.....	31
6.1 Tipos de simulaciones.....	32
6.2 Simulaciones para cálculos térmicos.....	32
6.2.1 Condiciones de contorno.....	33
6.2.2 Mallado	34
6.2.3 Resultados	34
6.3 Coeficiente de convección.....	35
6.4 Simulaciones térmicas.....	37



6.4.1 Condiciones de contorno.....	37
6.4.2 Mallado	38
6.4.3 Set - up.....	38
6.4.3.1 Ecuaciones	39
6.4.3.2 Parámetros de contorno	39
6.4.3.3 Renderizado.....	41
6.4.4 Resultados de la simulación	41
7. Proyecto de fabricación.....	44
7.1 Proyecto de fabricación.....	45
7.2 Selección de material.....	45
7.3 Proceso de fabricación	47
7.3.1 Diseño para fabricación	48
7.4 Presupuesto	49
8. Conclusiones.....	50
9. Referencias	51
9.1 Temario.....	51
9.2 Proyectos y trabajos	51
9.3 Libros	51
9.4 Normativa.....	51
10. Anejos.....	52



10.1 Tablas.....	52
10.2 Diseños.....	52
10.3 Simulaciones realizadas.....	52
10.4 Planos.....	53





SÍMBOLOS

Vd	Cilindrada del motor
n	Régimen de revoluciones del motor
Mt	Par motor
Ne	Potencia específica
Q	Calor cedido/absorbido
C	Calor específico
ρ	Densidad
T	Temperatura
\dot{V}	Caudal
v	Velocidad
\dot{m}	Gasto másico
U	Coefficiente transferencia de calor
F_{rad}	Superficie total de refrigeración
F_{fr}	Superficie frontal radiador
Dh	Diámetro hidráulico
ν	Viscosidad
P	Perímetro
Re	Número de Reynolds
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
l_{rad}	Profundidad del radiador
ϕ_{rad}	Coefficiente de compacidad volumétrica





ILUSTRACIONES

Ilustración 1:Sistema de refrigeración de un automóvil	8
Ilustración 2: Intercambio de calor en flujo cruzado.....	9
Ilustración 3: Tipos de conductos en radiadores.....	9
Ilustración 4: Radiador tubular de aletas planas.....	10
Ilustración 5: Radiador tubular de aletas onduladas.....	11
Ilustración 6: Radiador panel de abeja	12
Ilustración 7: MCIa con configuración en V	14
Ilustración 8: MCIa con configuración en línea.....	14
Ilustración 9: Motor de combustión externa	14
Ilustración 10: Mecanismos de transmisión de calor.....	16
Ilustración 11: Transmisión de calor por conducción.....	16
Ilustración 12: Flujos de aire y refrigerante en un radiador.....	18
Ilustración 13:Velocidades a lo largo del trazado de MotorLand	20
Ilustración 14:Velocidad - distancia.....	21
Ilustración 15:Primer diseño conducto refrigerante	28
Ilustración 16:Primer diseño panel de abeja.....	28
Ilustración 17:Evolución diseño.....	28
Ilustración 18:Diseño incorporando conductos en cuerpo de radiador	29
Ilustración 19: Detalle diseño final	30
Ilustración 20: Diseño final	30
Ilustración 21:En orden, Inlet, Outet, Wall y Opening	33
Ilustración 22:Mallado volumen de control	34



Ilustración 23:Sección de la simulación aerodinámica.....	35
Ilustración 24:Inlet, Outlet y superficie de convección	37
Ilustración 25:Mallado para simulación térmica	38
Ilustración 26:Ecuaciones simulación térmica	39
Ilustración 27:Set-up Inlet y Outlet	40
Ilustración 28:Set-up Convección Paralela y Perpendicular.....	41
Ilustración 29:Resultado simulación térmica	42
Ilustración 30: Vista lateral resultados.....	42
Ilustración 31: Temperatura media en salida.....	43
Ilustración 32:Filtro de búsqueda de propiedades.....	45
Ilustración 33:Resultado búsqueda CES Edupack.....	46
Ilustración 34: Impresora 3D de materiales metálicos.....	48
Ilustración 35: Diseño a fabricar.....	48
Ilustración 36: Evolución primer diseño	52
Ilustración 37: Diseño de múltiples conductos	52
Ilustración 38: Simulación aerodinámica 1.....	52
Ilustración 39: Simulación aerodinámica 2.....	53
Ilustración 40: Simulaciones térmicas de evoluciones en el diseño	53





ECUACIONES

Ecuación 1: Calor disipado al sistema de refrigeración.....	22
Ecuación 2: Calor disipado al sistema de refrigeración con factor de seguridad.....	22
Ecuación 3: Gasto volumétrico de aire.....	23
Ecuación 4: Gasto volumétrico de refrigerante	24
Ecuación 5: Gasto másico de refrigerante.....	24
Ecuación 6: Temperatura media de refrigerante	24
Ecuación 7: Temperatura media de aire	25
Ecuación 8: Superficie total de intercambio de calor.....	25
Ecuación 9: Superficie frontal del radiador	26
Ecuación 10: Profundidad del radiador	26
Ecuación 11: Diámetro Hidráulico	35
Ecuación 12: Viscosidad del aire.....	35
Ecuación 13: Número de Reynolds.....	36
Ecuación 14: Coeficiente de transmisión de calor por convección.....	36





TABLAS

Tabla 1: Distancia según rango de velocidades.....	21
Tabla 2: Datos motor “Kit MotoStudent”.....	22
Tabla 3: Datos aire en condiciones ambientales.....	23
Tabla 4: Datos refrigerante.....	24
Tabla 5: Propiedades materiales	47
Tabla 6: Coste final de fabricación.....	49





1. Introducción

1.1 Antecedentes

El motor térmico se trata de una máquina térmica en la cual se produce la conversión de energía química en energía térmica y esta en mecánica, la cual puede ser usada para mover las ruedas de un vehículo, para actuar una máquina o incluso para generar electricidad.

Cuando estos motores adquieren unas dimensiones y prestaciones considerables, como las necesarias para mover un automóvil, una motocicleta o un barco se generan grandes cantidades de calor, producto de la combustión necesaria para mover grandes masas o hacerlo a gran velocidad. Si este calor no se disipa de forma correcta del bloque motor, las dilataciones en los componentes metálicos de este pueden hacer que dejen de moverse correctamente o incluso bloquearlas de forma que en el peor de los casos puede ocurrir la rotura de partes críticas como bielas o válvulas quedando todo el bloque inservible.

Para evitar que estos sucesos ocurran es necesaria la refrigeración del motor, bien mediante refrigeración líquida o por aire, esta última, fue la más usada en los inicios del automóvil en los que las potencias de los propulsores eran pequeñas, así como las exigencias de los consumidores. El principal baluarte de esta tecnología era la simpleza técnica y el bajo coste económico, algo fundamental en tiempos donde poca gente podía permitirse la compra de un coche.

El funcionamiento es bastante simple, los cilindros están en contacto directo con el exterior mediante unas aletas que los recubren, aumentando así la superficie de transmisión de calor. Uno de los mayores problemas que acarrea este tipo de refrigeración es que depende exclusivamente de la temperatura ambiente, de manera que en un clima muy cálido los problemas de sobrecalentamiento son notables, además de que en parado al no existir corriente de aire la temperatura asciende con facilidad.

A pesar de que la refrigeración por aire era la más usada en el siglo XX, la refrigeración líquida usada hoy en día parte de la invención de Karl Benz en 1885, fecha en la que patenta el radiador, sistema que ha tenido que evolucionar mucho para llegar a lo que se conoce hoy en día.

Este sistema funciona de manera que el líquido refrigerante es conducido a través de las partes del motor de forma que va extrayendo el calor generado por este y más tarde pasa por el radiador donde el contacto con el aire lo enfría y vuelve a realizar todo el proceso. Es un sistema que ha pasado por notables evoluciones a lo largo de su vida, tanto geométricamente como en lo que se refiere a materiales, componentes, o fluidos refrigerantes.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es el diseño de un radiador para un sistema de refrigeración de una moto que participará en la competición internacional MotoStudent, concretamente en la VI edición de la prueba.

Con el diseño del radiador se pretende recoger la geometría de panal de abeja utilizada en los radiadores de los años 30 y 40, y mejorar los puntos débiles que hicieron que su uso disminuyese hasta prácticamente la extinción, de esta forma se podría sacar beneficio de sus múltiples ventajas frente a los radiadores de aletas utilizados hoy en día.

1.3 Metodología

Este proyecto parte de la idea de querer innovar en campo de la refrigeración de motores, para ello en un primer lugar se buscó las diferentes vías a seguir y se terminó optando por la mejora de un sistema ya existente, explicado de forma más extensa en apartados posteriores, pero en el que los inconvenientes eran mayores a las ventajas.

En primer lugar, se realiza el estudio de velocidades del prototipo de competición gracias a datos recogidos de anteriores ediciones y en base al propulsor utilizado se realizan los consiguientes cálculos de temperaturas. Con estos dos datos se define la base de la geometría necesaria para cumplir los requisitos de transferencia de calor y se llevan a cabo diversos diseños de radiador. Con todos los prototipos se realizan las debidas simulaciones con el fin de observar diferencias entre ellos y de esta forma decidir el más adecuado según las pretensiones, siendo este un proceso llevado a cabo en repetidas ocasiones en el presente proyecto.

Una vez seleccionado el diseño final, se decide tanto el material como el proceso de fabricación en función de las características buscadas, así como de su geometría.

Por último, se realiza un presupuesto en el que se plasma el coste total del proyecto.

1.4 Competición

Tal y como se ha comentado anteriormente, el prototipo de radiador se ha diseñado específicamente para su uso en una moto, la cual forma parte del equipo participante "Engineering Project Alcoy" (EPA), en la competición MotoStudent. Dicho evento

consiste en la competición entre diversas universidades del mundo, las cuales tratan de construir gran parte de una motocicleta de competición y ponerla a prueba frente al resto, así como desarrollar habilidades y conocimientos adquiridos en diferentes áreas durante los años de aprendizaje académico.

La competición consta de dos variantes distintas, pero con unos mismos objetivos: Petrol y Electric

En el caso del EPA, se trata de un equipo participante en la categoría Petrol, es decir, cuyo propulsor es un motor de combustión interna alternativo y por tanto la organización ofrece su debido “Kit” de elementos necesarios para la competición que queda incluido con la inscripción a la misma. Este “Kit” incluye:

- Motor KTM 250 cc 4T monocilíndrico (MEP)
- Pinzas y bombas de freno J.Juan
- Juego de neumáticos
- ECU

La competición consta de diferentes pruebas, las cuales están englobadas dentro de dos fases diferenciadas y ambas puntuables para la clasificación general de la competición:

- Fase MS1: Documentación e informes de proyectos
- Fase MS2: Pruebas dinámicas

1.4.1 MS1

La fase MS1 consta de la realización de distintos proyectos, algunos tratan de diseño e ingeniería mientras otros pretenden darle un enfoque empresarial al proyecto.

- Capítulo A: Desarrollo Conceptual
- Capítulo B: Diseño de Producto
- Capítulo C: Prototipado y Test
- Capítulo D: Innovación
- Capítulo E: Plan de Negocio

1.4.2 MS2

Esta fase consiste en el conjunto de pruebas realizadas durante el evento final y donde será evaluado el comportamiento dinámico del prototipo, así como el estático, este último con el fin de asegurar la seguridad del vehículo mediante una serie de verificaciones técnicas que se dividen en:

- Prueba Visual
- Sistema de frenado
- Prueba estática en banco
- Prueba de Sonido

Por último, antes de dar paso al inicio de pruebas dinámicas puntuables para la competición, se realiza una prueba en pista de la moto por parte de un especialista de la organización con el fin de verificar la seguridad en una situación real.

Las pruebas dinámicas se dividen en:

- Test de frenada: Consiste en una frenada de emergencia a una velocidad mínima de 80 km/h, donde se evalúan los metros recorridos.
- Gymkhana: Circuito de habilidad contra el crono.
- Test de aceleración: Se evalúa la capacidad de aceleración desde parado en una recta de 150m.
- Carrera: Se trata de una carrera de 8 vueltas en el trazado FIM de MotorLand Aragón.

1.4.3 Normativa relativa a los sistemas de refrigeración

C.5.1 Sistemas de refrigeración

- C.5.1.1 El diseño y construcción del sistema de refrigeración exterior al bloque motor es de configuración libre.
- C.5.1.2 El número, la situación, el tamaño y la composición de los radiadores de líquido refrigerante son libres, siempre y cuando cumplan con los requerimientos dimensionales de las cotas generales del prototipo.



C.5.2 Líquidos refrigerantes

- C.5.2.1 Sólo se podrá utilizar agua destilada como líquido refrigerante.
- C.5.2.2 Está prohibida la utilización de aditivos en el agua destilada.

Asimismo, también influye la normativa referente a dimensiones, la cual dicta las siguientes normas:

B.2.1 Dimensiones

- B.2.1.6 La banda de rodadura de los neumáticos deberá presentar una distancia libre mínima de 15mm a lo largo de toda su superficie a cualquier elemento del prototipo, en cualquier posición del mismo y para cualquier reglaje de geometrías.
- B.2.1.8 La anchura máxima del carenado será de 600mm.



2. Sistemas de refrigeración

2.1 Sistemas de refrigeración

Como se ha comentado en apartados anteriores, los sistemas de refrigeración se dividen en refrigeración por aire o líquida. Para la realización del proyecto se opta por la refrigeración líquida ya que las ventajas que ofrece son imposibles de alcanzar mediante la refrigeración por aire.

El sistema de refrigeración líquida funciona gracias a una serie de elementos que trabaja conjuntamente haciendo posible el correcto funcionamiento del grupo motopropulsor. El refrigerante recorre las zonas más críticas del motor a través de conductos, mediante un conducto cerrado gracias al termostato cuando el motor alcanza la temperatura de trabajo óptima, el termostato, que es una válvula que se dilata o contrae en función de la temperatura, se abre dejando que el refrigerante salga del circuito del motor y fluya hacia el radiador, enfriándose a su paso por él. Parte de este refrigerante caliente se direcciona hacia otro intercambiador más pequeño que el radiador cuando se requiere de calefacción en el interior del vehículo, liberando este al aire y este entrando al habitáculo. Todo este sistema funciona gracias al continuo flujo de aire y de refrigerante. Es por ello que para que ninguno de los dos se detenga, hay un ventilador tras el radiador para asegurar caudal de aire cuando el vehículo está parado (vehículos de grandes dimensiones), y una bomba de agua para mantener en todo momento el refrigerante circulando por el sistema ya que de lo contrario el fluido frío no llegaría a las partes calientes y el caliente no se refrigeraría en el radiador.

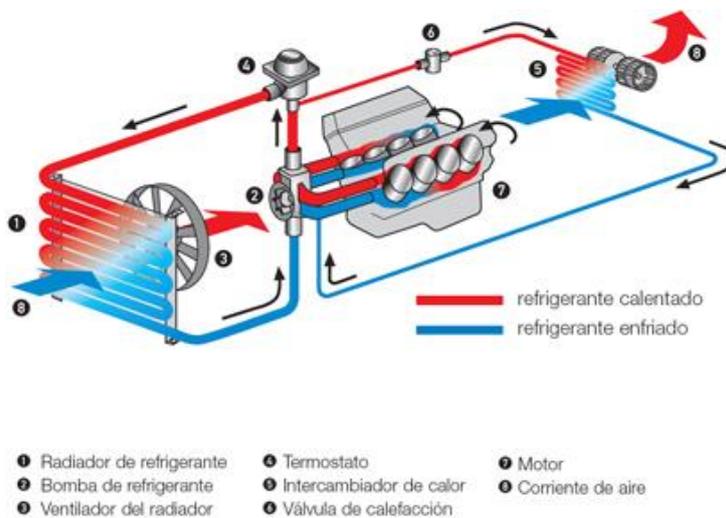


Ilustración 1: Sistema de refrigeración de un automóvil

La refrigeración utilizada en los vehículos a motor es de tipo flujo cruzado, en el cual el fluido refrigerante y el refrigerado fluyen perpendicularmente a través del radiador, es decir, el primero fluye alrededor de los conductos por los que circula el segundo. Además, es un sistema en que ambos fluidos no se mezclan entre sí en ningún momento.

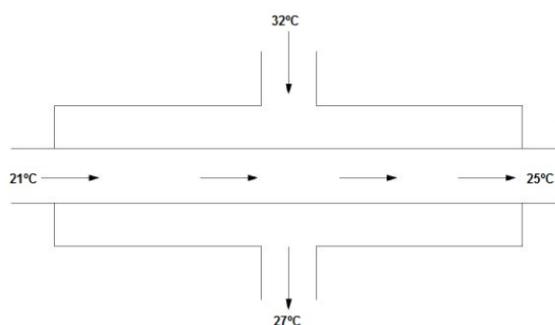


Ilustración 2: Intercambio de calor en flujo cruzado

De esta forma el aire, que circula en sentido contrario al del vehículo, pasa a través del radiador adquiriendo el calor que porta el líquido refrigerante, que circula a través de los conductos del mismo. Como resultado se obtiene un aire que ha aumentado su temperatura y que gracias a ello la del refrigerante ha bajado, pudiendo ahora retornar de vuelta al interior del motor recuperando su calor generado y realizando este proceso infinitas veces.

Dentro de los intercambiadores de flujo cruzado existen varios tipos de radiadores según la geometría de sus conductos y de sus elementos disipadores.

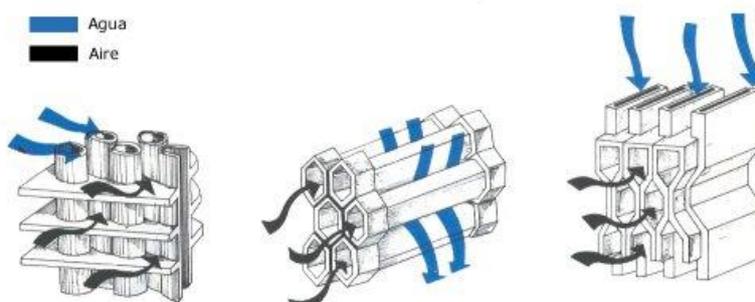


Ilustración 3: Tipos de conductos en radiadores

Los sistemas de refrigeración líquida existentes según el tipo de radiador se dividen en:

- Radiador tubular con aletas planas
- Radiador tubular con aletas onduladas
- Radiador de panal de abeja

Radiador tubular con aletas planas

Se trata de un diseño que consta de un conducto único de sección circular o bien de múltiples conductos, generalmente verticales. Soldadas a estos tubos se disponen unas aletas cuyo cometido es la disipación del calor que posee el líquido refrigerante que recorre los conductos tubulares.

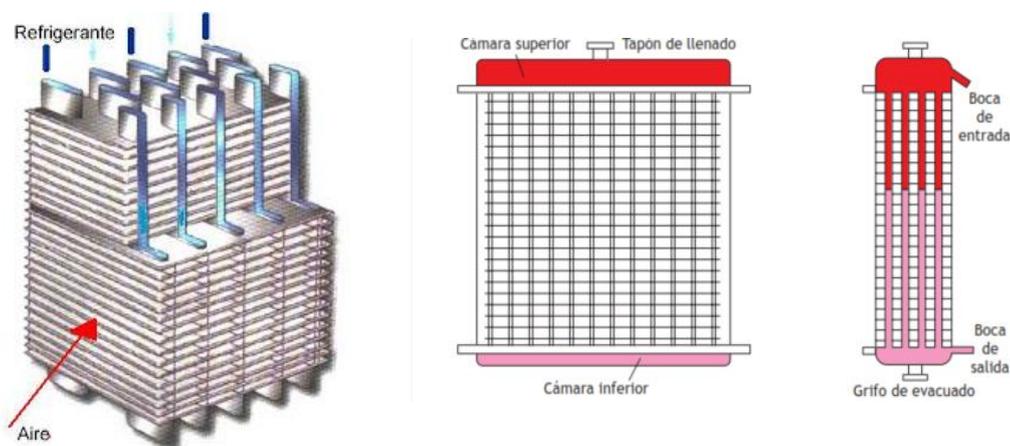


Ilustración 4: Radiador tubular de aletas planas

Como se puede observar en la “Ilustración 4” el radiador consta de dos cámaras o tanques de refrigerante, una que sirve de entrada y otra de salida si la disposición del radiador es vertical, estas estarán situadas arriba y debajo de las aletas sin embargo, si se trata de un radiador horizontal, es decir, si los conductos tubulares discurren de esta forma, las cámaras se sitúan a ambos lados del radiador.

Los tanques del radiador tienen varias funciones, una de ellas es aportar mayor facilidad al hecho de añadir refrigerante, ya que simplemente abriendo el tapón de llenado se procede a verter el líquido dentro del depósito superior y este automáticamente se reparte por el circuito del sistema. Otro de los propósitos es recoger todo el refrigerante proveniente del motor en el taque superior para después de enfriarse, aunarlo todo en el inferior, desde donde vuelve al motor.

Radiador tubular con aletas onduladas

Este tipo de radiador es hoy en día el más usual en los vehículos, su composición la forman una serie de conductos generalmente de sección rectangular y es habitual verlos posicionados tanto vertical como horizontalmente.

En este caso la superficie de disipación está formada por aletas onduladas y de un tamaño muy reducido, ciertas partes de estas aletas están en contacto directo con los tubos por lo que circula en refrigerante, de manera que se produce la transmisión de calor de estos tubos a las aletas y de estas al ambiente.



Ilustración 5: Radiador tubular de aletas onduladas

Esta disposición de aletas de la “Ilustración 5” tiene el objetivo de maximizar la superficie de intercambio de calor con el exterior y a su vez mediante su geometría, formar turbulencias en el aire que pasa a través del radiador, consiguiendo que este recorra la mayor superficie posible sobre las aletas.

Esta configuración de radiador es actualmente la óptima en cuanto a la relación peso-disipación de calor de cuantas hay, sobre todo si se tiene en cuenta la sencillez de mantenimiento y sus pocas averías y obstrucciones.

Radiador de panal de abeja

Es un diseño cuyos orígenes se remontan a los primeros años del siglo XX, también se le denomina de nido de abeja o celular debido a su característica geometría.

El radiador está formado por decenas de tubos unidos entre sí mediante soldadura en sus extremos, de manera que en la sección central de estos existe espacio libre, por el cual circula el refrigerante de manera descendente. Por tanto, es un diseño que no cuenta con conductos realizados especialmente para el trasiego del refrigerante, sino que circula por los huecos libres de soldadura entre los tubos, a través de los cuales pasa el aire perpendicularmente.

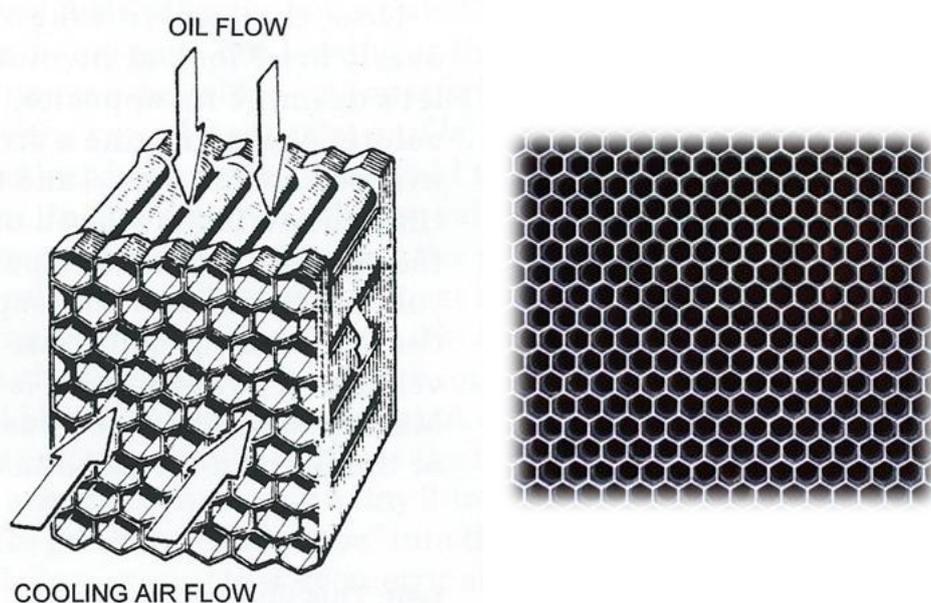


Ilustración 6: Radiador panal de abeja

Es precisamente este singular diseño el que le aporta sus ventajas e inconvenientes, por un lado, la relación volumen de líquido refrigerante-superficie de transferencia de calor es muy buena, por lo que la cantidad necesaria de refrigerante es menor que en el resto de tipos de radiador, dando como resultado la consiguiente reducción de peso, así como un tiempo de calentamiento del motor menor.

Por otro lado, sus inconvenientes radican en una gran tendencia a la obstrucción de los orificios por los que circula el refrigerante entre los tubos, debido a que los pasos son de un tamaño muy reducido. Además, los múltiples puntos de unión mediante soldadura provocaban una gran fragilidad del sistema completo.

Estas desventajas pesaban más que los beneficios que aportaba el diseño, por lo que hoy en día su uso es prácticamente anecdótico y tan solo se usa en restauraciones de coches clásicos que originalmente portaban un radiador de este tipo.



3. Fundamentos Teóricos

3.1 Funcionamiento de los MCIAs

El motor térmico es una máquina térmica que mediante la transformación de energía química en térmica por medio de la combustión de un fluido compresible produce energía mecánica.

Dentro del mundo de los motores térmicos se pueden distinguir dos grandes familias:

- Motor combustión interna alternativo
- Motor combustión externa

Motor combustión interna alternativo

Como su propio nombre indica se trata de un motor en el cual mediante el movimiento alternativo de determinados elementos se produce energía mecánica gracias a una combustión de forma interna.



Ilustración 8: MCIAs con configuración en línea



Ilustración 7: MCIAs con configuración en V

Motor de combustión externa

Consiste en la producción de energía mecánica con el objetivo de accionar un conjunto de elementos mecánicos a través de una combustión, que en lugar de realizarse internamente en el bloque del motor, prescinde de él y por tanto el proceso de combustión se realiza exteriormente.



Ilustración 9: Motor de combustión externa

3.1.1 Tipos de MCI

Los motores de combustión interna alternativos están divididos en dos variantes según la manera en la que provocan la combustión:

- Motor de encendido provocado (MEP)
- Motor de encendido por compresión (MEC)

Motor de encendido provocado

Este tipo de motores están caracterizados por la necesidad de bujías para el inicio del proceso de combustión de la mezcla aire-combustible. Las bujías realizan una chispa que prende la mezcla, la cual se realiza previamente a la admisión, e inicia el frente de llama que se propaga por la cámara de combustión del cilindro provocando el movimiento del pistón.

El combustible usado en este tipo de motores suele ser de alto octanaje, tanto derivados del petróleo como biocombustibles o combustibles ecológicos. En estos grupos se encuentran la gasolina, etanol, biogás, gas natural y GLP.

Motor de encendido por compresión

A diferencia de los motores en los que se provoca la combustión, estos motores comienzan la combustión debido a la alta compresión a la que se somete la mezcla de combustible, la cual se realiza en la cámara de combustión, donde se inyectan por separado aire y combustible, este último a una gran presión. Además, son motores muy ruidosos.

Los combustibles utilizados son los denominados pesados, gasoil o biodiesel.

Son motores en los que el bloque suele ser de fundición de hierro, material más robusto y pesado, ya que las presiones que se alcanzan son de gran magnitud.

3.2 Procesos termodinámicos

3.2.1 Transmisión de calor

La energía transferida entre dos cuerpos a diferente temperatura, siempre del más caliente al más frío, recibe el nombre de calor. Dicha energía se manifiesta en el movimiento de los átomos y moléculas que forman la materia.

El calor se puede transmitir mediante una serie de mecanismos:

- Conducción
 - Convección
 - Radiación
- Requieren de un medio material para propagarse

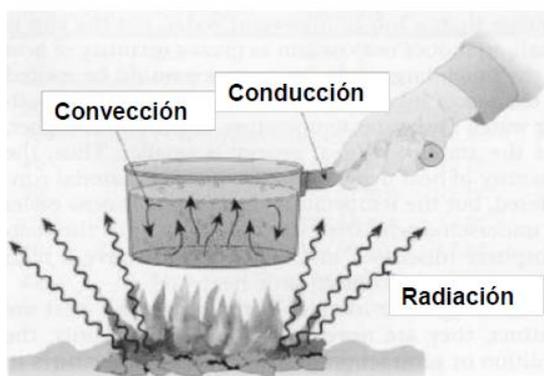


Ilustración 10: Mecanismos de transmisión de calor

Conducción

Consiste en la transmisión de calor en cuerpos sólidos, la cual se produce gracias a la vibración de moléculas y al transporte de energía por parte de los electrones libres. De manera que cuando un cuerpo se calienta, las moléculas en contacto con la fuente de calor comienzan a vibrar, y producto de ello, a chocar con las adyacentes que copian el proceso hasta que todo el cuerpo molecular está agitado en su totalidad.

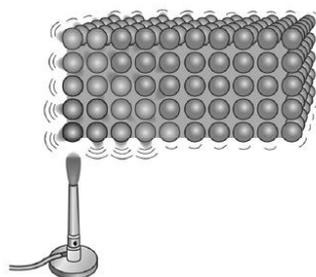


Ilustración 11: Transmisión de calor por conducción

Convección

En la convección se produce una transmisión de calor entre una superficie (sólido) y un fluido que la baña. Como resultado de los movimientos del fluido se produce una conducción y un transporte de energía, por lo que es un mecanismo de transmisión de calor en el que la velocidad es un factor de suma importancia. También influye en gran manera la distancia a la superficie, ya que cerca de la superficie la convección que se produce es especialmente importante, mientras que conforme aumenta la distancia lo que domina es el transporte de energía asociado al movimiento del fluido.

Dentro del término convección se engloban dos formas de que se produzca:

- Convección forzada: Provocada exteriormente mediante un proceso mecánico o por diferencias de presión.
- Convección natural: Provocada por la propia transmisión de calor.

Asimismo, también se puede clasificar según el tipo de flujo presente:

- Flujo externo: El fluido que intercambia calor con la superficie no está confinado.
- Flujo interno: El fluido que intercambia calor sí está confiando.
- Flujo laminar
- Flujo turbulento

Radiación

Mecanismo de transferencia de calor mediante ondas electromagnéticas emitidas por cuerpos con temperatura mayor de 0 K. Estas ondas son emitidas por todos los cuerpos con temperatura en todas direcciones no importando la existencia de materia para su propagación. Se trata del balance de energía emitida y recibida entre dos cuerpos con diferentes temperaturas. Tanto el cuerpo caliente como el frío realizan emisión y absorción recíprocamente, donde obviamente el cuerpo a mayor temperatura tendrá unos valores mayores.

Cuando se produce radiación parte de esta puede ser reflejada, absorbida o transmitida por el cuerpo receptor, manifestándose en este como calor.

3.2.2 Transferencia de calor en el sistema de refrigeración

En el sistema de refrigeración de un motor térmico se produce la transferencia de calor necesaria para el correcto funcionamiento de todo el sistema propulsor. Este intercambio de calor se lleva a cabo en diferentes puntos.

El primero de ellos se realiza en las camisas de los cilindros que hacen la función de intercambiador de calor con el líquido de refrigerante, transfiriendo el calor sobrante de

la combustión al sistema de refrigeración. Dicho refrigerante recorre zonas críticas del motor a las elevadas temperaturas como la culata para finalmente llegar al radiador, elemento clave del sistema.

La transmisión de calor en el motor es mediante convección+conducción, ya que se combinan zonas en las que el calor se transfiere desde el bloque motor a los conductos que recorre el refrigerante gracias a la conducción y de estos al propio líquido mediante convección.

Una vez en el sistema de refrigeración este proceso se repite en el radiador, donde el calor del refrigerante se transfiere a las aletas y al bloque y mediante convección se produce una transmisión al ambiente gracias al aire que circula en sentido contrario de la marcha.

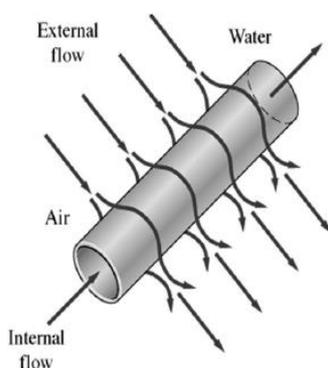


Ilustración 12: Flujos de aire y refrigerante en un radiador

La convección que ocurre en el interior de los motores térmicos se trata de una forzada. Se produce entre el radiador y el ambiente, donde el fluido, en este caso el aire, pasa a gran velocidad sobre las aletas del radiador producto del avance de la moto. Cuando el vehículo se encuentra parado para evitar el sobrecalentamiento se utiliza un ventilador para que provoque el movimiento del aire.

Por otro lado, en el interior de los conductos del sistema de refrigeración la convección se produce de manera forzada gracias a la bomba de agua del sistema, que hace circular al refrigerante con el caudal deseado para una correcta convección.

El flujo de refrigerante es turbulento en todo el sistema de refrigeración lo cual es positivo, ya que este tipo de flujo y una alta velocidad optimizan la tasa de transferencia de calor.

También se puede encontrar transferencia de calor mediante radiación en ciertas partes del bloque motor hacia otros componentes externos y hacia el ambiente dado que se alcanzan elevadas temperaturas, pero dicha transferencia es mínima y se suele despreciar.



4. Cálculos

4.1 Cálculos

Antes de comenzar el diseño del radiador se necesita realizar una serie de cálculos preliminares para determinar diferentes aspectos importantes que resultarán un punto de partida para realizar una propuesta de diseño.

Los cálculos realizados se pueden dividir de la siguiente forma:

- Velocidad aproximada del vehículo para determinar la velocidad de paso del aire por el radiador
- Estimación geometría final
- Cálculos transferencia de calor en función de la velocidad

4.2 Velocidad aproximada del vehículo

Los datos relativos al ambiente son cruciales en el diseño de un radiador, por ello es vital la velocidad del vehículo para el cálculo de esta se utilizan una serie de datos telemétricos recogidos “in situ” en el circuito de MotorLand durante la IV edición de la competición MotoStudent por el equipo ETSEIB Racing, ya que el EPA no tuvo la posibilidad de recogerlos. En estos datos se pueden ver los registros de velocidades a lo largo del trazado, y con ello poder saber las velocidades más usuales durante el recorrido. Estas velocidades son válidas para el cálculo que se pretende ya que al igual que el resto de equipos presentes en la competición, el ETSEIB Racing monta en su motocicleta un motor igual al resto que además coincide con el usado en la próxima edición, así como también lo hace el circuito.

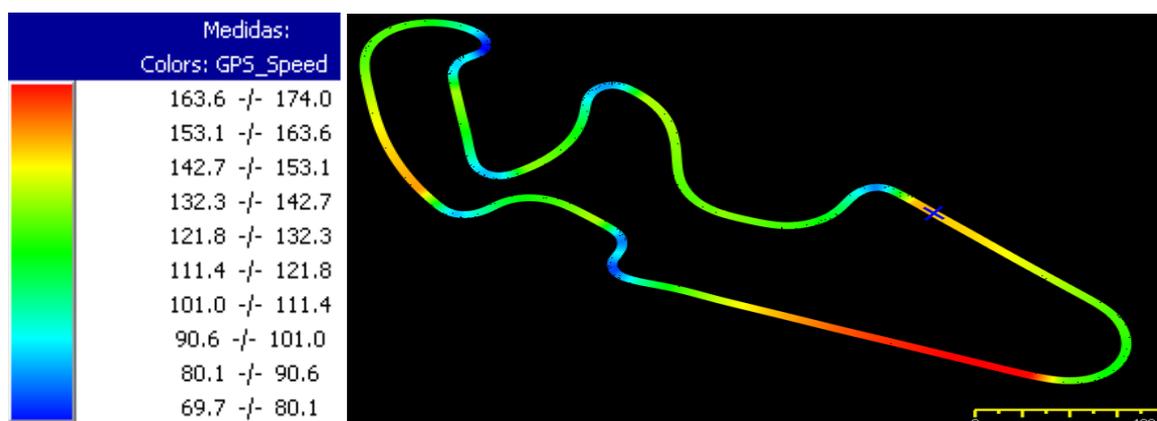


Ilustración 13: Velocidades a lo largo del trazado de MotorLand

A partir de la siguiente gráfica en la que se puede ver la velocidad en función de los metros recorridos, y apoyándose en la “Ilustración 13”, en la que están representadas las diferentes velocidades alcanzadas gracias a una escala cromática, se puede realizar una estimación de datos representativos de velocidades.

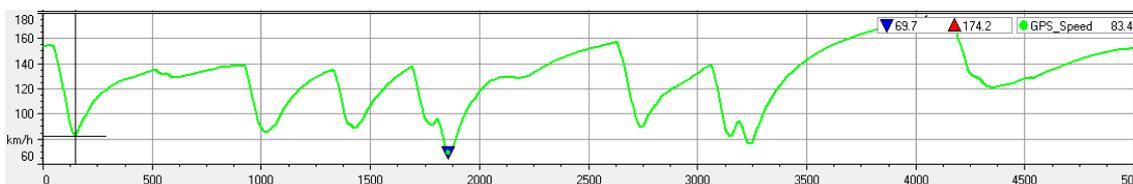


Ilustración 14: Velocidad - distancia

Velocidad (km/h)	Distancia (m)
69-80	150
80-100	730
100-120	1535
120-140	1435
140-160	840
160-Sup	650
TOTAL	5340

Tabla 1: Distancia según rango de velocidades

Una vez realizada la interpretación de los datos se obtiene que el rango de velocidades en el que más distancia se ha recorrido ha sido en de 100-120 km/h, una velocidad determinada como media para la motocicleta estudiada.

Dentro del rango que se ha determinado como el más usado, se escoge la zona más baja de él, ya que, a velocidades más bajas, menor caudal de aire pasa a través del radiador y por tanto más complicada es la refrigeración.

$$v_{aire} = 100 \frac{km}{h} = 27.78 \text{ m/s}$$

4.3 Prediseño

Para el cálculo de los valores geométricos representativos del radiador se parte de los datos anunciados por la ficha técnica del propulsor proporcionado en el “Kit MotoStudent”:

Vd (cm³)	248.8
n (rpm)	7250
Mt (Nm)	24
Ne (kW)	23

Tabla 2: Datos motor "Kit MotoStudent"

4.3.1 Calor disipado al sistema de refrigeración

La cantidad de calor que llega al sistema de refrigeración y que por tanto este debe disipar al ambiente es un parámetro de importancia ya que es la base de donde parte el diseño.

Para su cálculo se utiliza la correlación empírica de Lahvic, obtenida a partir del estudio sobre la disipación de calor en motores de encendido provocado y por compresión Ford. Esta correlación no es el único método para la obtención del calor disipado, también se puede utilizar la ecuación semiempírica de Taylor y Toong basada en ecuaciones de tipo convectivo o la correlación con fundamento físico de Parish, desarrollada para el reemplazo de la correlación de Lahvic en un trabajo encomendado por Ford. La selección de uso de la ecuación de Lahvic viene argumentada por poseer mayor facilidad que la de Taylor y Toong así como la necesidad de asumir menor número de parámetros mismo motivo por la que se sobrepone a la de Parish.

$$Q_{refr} [kW] = \frac{(8.66 \cdot V_d \cdot n + 108.93 \cdot M_T + 1119.74 \cdot N_e - 1010 \cdot V_d + 2890)}{3412.2}$$

$$Q_{refr} = 13.6687 \text{ kW}$$

Ecuación 1: Calor disipado al sistema de refrigeración

Una vez se obtiene el calor disipado al sistema de refrigeración durante el trabajo del motor, es necesaria la aplicación de un factor de seguridad del mismo por si se diera la situación en la que el radiador sufriera una obstrucción del paso de aire o por un posible deterioro:

$$Q_{refr_c} = 1.1 \cdot Q_{refr}$$

$$Q_{refr_c} = 15.0355 \text{ kW}$$

Ecuación 2: Calor disipado al sistema de refrigeración con factor de seguridad

Este calor disipado al sistema se puede asumir como igual al calor transmitido al ambiente por el sistema de refrigeración, de manera que:

$$Q_{refr_c} = Q_{aire}$$

4.3.2 Caudal de aire que pasa a través del radiador

El caudal de aire que atraviesa el radiador es un valor directamente relacionado con sus dimensiones finales ya que, dependiendo de este valor, varía la capacidad de disipación del sistema.

Para su obtención se han tenido que asumir diferentes datos, como la temperatura de entrada del aire, así como obtener algunos por medio de tablas ponderadas de elementos:

T_{en} (°C)	25
C_{aire} (J/kg*K)	1012
ρ_{aire} (kg/m³)	1.184
ΔT_{aire} (°C)	30

Tabla 3: Datos aire en condiciones ambientales

La temperatura ambiente escogida es la que se considera más usual en el periodo del año en el que se compete. Por otro lado, la diferencia de temperaturas se fija según intervalos recomendados.

Mediante la siguiente ecuación y con los datos de la “Tabla 3” se puede obtener que:

$$\dot{V}_{aire} = \frac{Q_{aire}}{C_{aire} \cdot \rho_{aire} \cdot \Delta T_{aire}}$$

$$\dot{V}_{aire} = 0.4183 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ecuación 3: Gasto volumétrico de aire

4.3.3 Gasto volumétrico y gasto másico de refrigerante

Para poder realizar las simulaciones posteriores con los diferentes diseños es necesario conocer no sólo los parámetros del aire, que son además vitales para el dimensionado, sino también los parámetros del fluido refrigerante, en este caso agua destilada y, de esta forma obtener el funcionamiento interno del sistema de refrigeración que viene marcado en gran medida en función del propulsor.

De esta manera, se procede al cálculo del gasto volumétrico con los siguientes datos:

C_{agua} (kJ/K*kg)	4.2
ρ_{agua} (kg/m³)	1000
T_{en} (°C)	90

$T_{sal} (^{\circ}C)$	78
$\Delta T_{agua} (^{\circ}C)$	12

Tabla 4: Datos refrigerante

Los datos seleccionados del agua corresponden con la situación de 90 °C, porque el termostato del motor está regulado para mantener esta temperatura de refrigerante a la salida del motor.

En cuanto a las temperaturas, la de entrada corresponde a la de llegada del refrigerante desde el bloque motor, mientras que la de salida se ha seleccionado en base a resultados de estudios experimentales en los que se sitúa la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del radiador en un rango de 6 – 12 °C. En este caso se ha optado por la máxima temperatura posible ya que sería la situación más difícil de soportar por el radiador, asegurando así su correcto funcionamiento en todos los rangos.

$$\dot{V}_{refr} = \frac{Q_{refr_c}}{C_{agua} \cdot \rho_{agua} \cdot \Delta T_{agua}}$$

$$\dot{V}_{refr} = 0.0002983 \frac{m^3}{s} = 0.2983 \text{ l/s}$$

Ecuación 4: Gasto volumétrico de refrigerante

Una vez obtenido el gasto volumétrico se puede calcular el gasto másico mediante la siguiente expresión:

$$\dot{m} = \rho_{agua} \cdot \dot{V}_{refr}$$

$$\dot{m} = 0.2983 \text{ kg/s}$$

Ecuación 5: Gasto másico de refrigerante

4.2.4 Temperaturas medias alcanzadas

Temperatura media de refrigerante durante su paso por el radiador:

$$T_{refr}^m = T_{refr}^{en} - \frac{\Delta T_{refr}}{2}$$

$$T_{refr}^m = 84 \text{ }^{\circ}C$$

Ecuación 6: Temperatura media de refrigerante

Temperatura media del aire que pasa a través del radiador:

$$T_{aire}^m = T_{aire}^{en} + \frac{\Delta T_{aire}}{2}$$

$$T_{aire}^m = 40$$

Ecuación 7: Temperatura media de aire

4.3.5 Superficie total de intercambio de calor

El principal valor para el dimensionado del radiador es la superficie total de refrigeración, gracias a la cual se produce la transmisión de calor con el ambiente, es decir, a mayor superficie mayor intercambio de calor, pero también esto significa que una geometría más grande con lo que ello repercute en el peso y la aerodinámica.

Para su cálculo se han utilizado valores obtenidos anteriormente y se ha asumido en función a un intervalo conocido gracias a estudios experimentales, el coeficiente de transferencia de calor, el cual oscila entre 140 y 180 W/m²*K para vehículos de pasajeros, obtenido de la tesis de Carlos Alberto Piedrahita, así como el resto de datos asumidos del presente capítulo. Para este determinado rango se ha optado por escoger un punto intermedio de:

$$U_{refr} = 160 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

La expresión utilizada para el cálculo de la superficie total de refrigeración es:

$$F_{rad} = \frac{10^3 \cdot Q_{refr_c}}{U_{refr} \cdot (T_{refr}^m - T_{aire}^m)}$$

$$F_{rad} = 2.1357 \text{ m}^2$$

Ecuación 8: Superficie total de intercambio de calor

4.3.6 Superficie frontal del radiador

La superficie necesaria en la parte frontal del radiador es un parámetro de importancia ya que afecta directamente a la aerodinámica del vehículo y está relacionada con la superficie total de intercambio de calor, ya que representa una parte importante de esta. Esta área frontal consiste en la superficie de los huecos por los que pasa el aire a través del radiador.

En el cálculo del área frontal se utilizan parámetros obtenidos anteriormente. Estos son el caudal de aire que pasa a través del radiador y la velocidad del vehículo en el trazado, la cual puede modificar la transmisión de calor de forma determinante.

$$F_{fr} = \frac{\dot{V}_{aire}}{v_{aire}}$$

$$F_{fr} = 0.0150 \text{ m}^2 = 150.5804 \text{ cm}^2$$

Ecuación 9: Superficie frontal del radiador

4.3.7 Profundidad del radiador

El último parámetro de dimensionado necesario antes de comenzar el diseño de la geometría es la profundidad del radiador, que al igual que la superficie frontal, es variable en función del diseño del cuerpo disipador, ya que cuanto más superficie se consiga en dicha parte, menores dimensiones generales tendrá el radiador.

$$l_{rad} = \frac{F_{rad}}{F_{fr} \cdot \varphi_{rad}}$$

Ecuación 10: Profundidad del radiador

Se encuentra en la expresión el coeficiente de compacidad volumétrica, φ_{rad} , coeficiente que varía en función de la geometría de los conductos, el cual oscila en los radiadores modernos entre 0.6 y 1.8 mm^{-1} .

$$l_{rad} = 78.7962 \text{ mm}$$



5. Diseño

5.1 Diseños preliminares

Una vez claras las dimensiones obtenidas en el pre-diseño que aproximadamente debía tener el modelo, se procede al diseño de los conductos internos de circulación de refrigerante, así como de los orificios hexagonales que forman la geometría de panel.

Con este objetivo en mente se procede a realizar diferentes posibles diseños mediante el software de diseño SolidWorks, el cual se ha seleccionado por la comodidad de cambio de parámetros en la que se puede realizar una actualización de la pieza sin hacer apenas cambios, así como con la familiaridad adquirida durante años con el software:

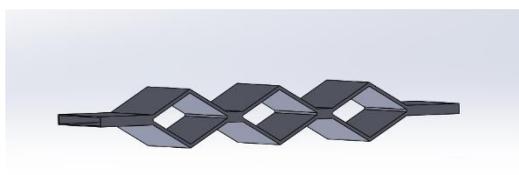


Ilustración 15: Primer diseño conducto refrigerante

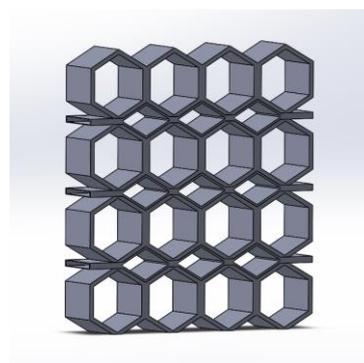


Ilustración 16: Primer diseño panel de abeja

En los primeros diseños ya se ve la idea a seguir: conducir el refrigerante mediante tubos con el fin de evitar la obstrucción entre los tubos hexagonales, ya que en los radiadores originales los espacios entre los tubos hexagonales era el lugar de paso de refrigerante.

Tras varias pruebas y cambios se determina que los conductos generados pueden no corregir el problema en su totalidad, ya que la estrecha sección de los tubos y los intrincados recodos pueden también llevar a la obstrucción de los conductos, por lo que se procede a la modificación del diseño:



Ilustración 17: Evolución diseño

En este nuevo diseño se mezcla la geometría de panal de abeja con los conductos que utilizan los radiadores de tubos y aletas onduladas, pero tras las simulaciones pertinentes se descarta ya que las no cumple los requerimientos de refrigeración pretendidos por lo que se sigue avanzando.

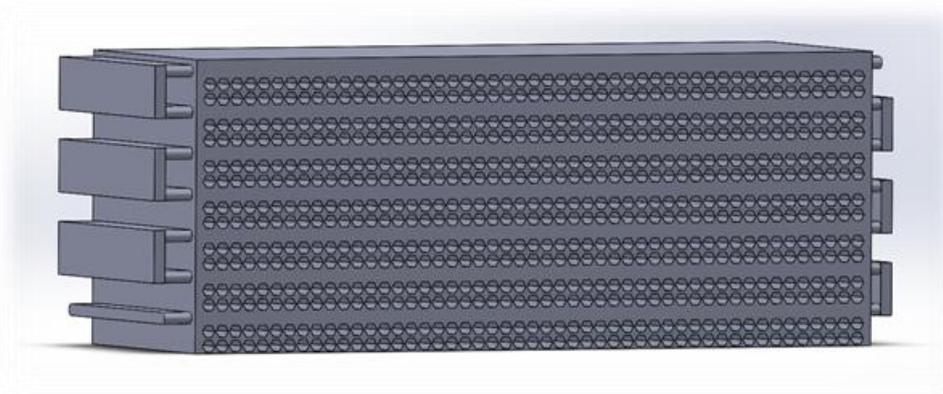


Ilustración 18: Diseño incorporando conductos en cuerpo de radiador

Como se puede observar en la “*Ilustración 18*” ahora los conductos son horizontales, ya que esto mejora la refrigeración, pues el flujo de refrigerante circula de forma más lenta y durante mayor distancia, por lo que durante mayor tiempo está transmitiendo calor.

Además, los hexágonos han sido volteados, situándose ahora las caras horizontales paralelas a la parte superior e inferior del radiador de manera que hay una mayor porción del tubo en contacto con el área de refrigeración mejorando la transferencia de calor con el ambiente.

Asimismo, los conductos se han situado dentro del propio cuerpo del radiador no sólo mejorando la transferencia de calor sino también la compactación del conjunto, reduciendo así las dimensiones requeridas para su localización en la moto.

5.2 Diseño final

Tras la prueba de cada uno de los diseños descritos anteriormente mediante software CFD, las cuales se explicarán en apartados posteriores, se hacen visibles los puntos a mejorar en cada uno de ellos, así como sus virtudes, no siendo ninguno de ellos idóneo en lo que a la transferencia de calor se refiere.

Es por ello que se realiza un diseño final aunando todo lo aprendido con el resto de modelos y simulaciones:

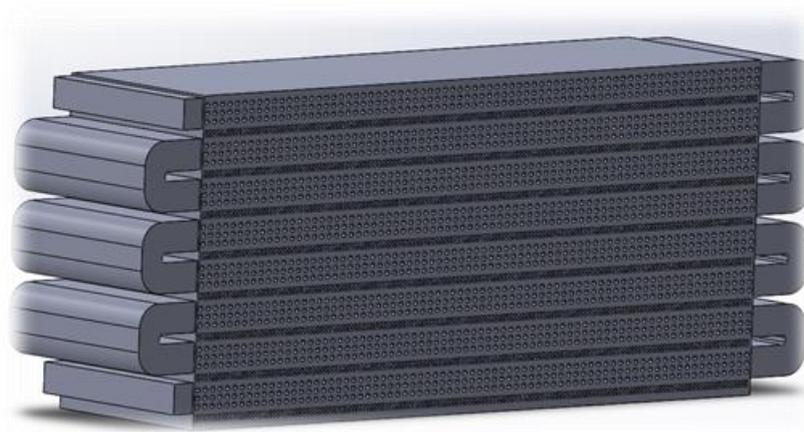


Ilustración 20: Diseño final

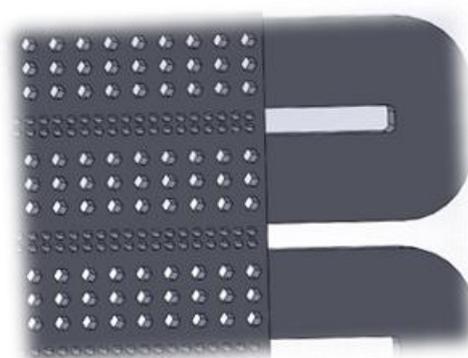


Ilustración 19: Detalle diseño final

En este diseño final se puede ver cómo se ha optado por realizar los orificios hexagonales directamente en los conductos, de manera que el líquido refrigerante baña completamente todas las caras del hexágono, maximizando la transferencia de calor.

Para minimizar los problemas de obstrucción típicos de esta geometría se ha dejado un mayor espacio entre los orificios de forma que el refrigerante pueda fluir correctamente.

Por otra parte, así como en los diseños mostrados anteriormente no se aprovechaban todos los espacios para la refrigeración, ahora, el espacio entre conductos se ha usado para crear más orificios con el mismo patrón, pero de tamaño menor. Esto no solo aumenta la superficie de intercambio de calor, sino que además mejora la aerodinámica del conjunto, al no obstruir el paso del aire.

Los tubos por donde circula el refrigerante en lugar de ser independientes tratan de un único conducto que pasa por todas las zonas de intercambio aumentando el tiempo y recorrido que realiza el refrigerante por el radiador.



6. Simulaciones

6.1 Tipos de simulaciones

El software seleccionado para la simulación del modelo es ANSYS, uno de los medios más potentes de simulación del mercado, en el que se pueden realizar todo tipo de simulaciones, alcanzando un alto grado de precisión lo que precisa un potente hardware para poder llevar a cabo los procesos de manera correcta y fluida.

Dentro del entorno de ANSYS se pueden encontrar diversos módulos de simulación según la necesidad. Los módulos más característicos y usados son en lo referente a CFD (Computation Fluid Dynamics), a pesar de que también alberga sistemas de simulación estructural y estática.

Los módulos CFD se encargan de la simulación de fluidos en movimiento y se dividen en:

- CFX: Simulaciones aerodinámicas o hidrodinámicas en las que se requiera un volumen de control y una única pieza como contorno
- Fluent: Es el módulo más versátil y complejo, se pueden realizar desde simulaciones de fluidos en conductos para ver su comportamiento su mezcla con otros o su temperatura, hasta intercambios de calor mediante varios métodos.
- Polyflow: Engloba los procesos de conformado de polímeros, el moldeo de metales y todas sus características de su movimiento cuando están en estado líquido.

6.2 Simulaciones para cálculos térmicos

Antes de realizar las simulaciones térmicas pertinentes en las que se estudia el comportamiento del flujo de refrigerante, así como la transferencia de calor con el ambiente, es necesario realizar una serie de cálculos. Estos deben permitir determinar las condiciones de contorno de dichas simulaciones, ya que ANSYS no permite la simulación de dos fluidos en movimiento. De esta forma no se obtendría el intercambio de calor de una forma realista por lo que se procede a calcular el coeficiente de convección que tendría el aire a la velocidad real que porta la moto, y una vez obtenido se define como condición de contorno en la simulación.

6.2.1 Condiciones de contorno

Para la obtención de estos parámetros previos se realiza una simulación aerodinámica que dada la limitación por hardware se utiliza un diseño simplificado, pero con las mismas dimensiones exteriores de manera que no afecta a los resultados.

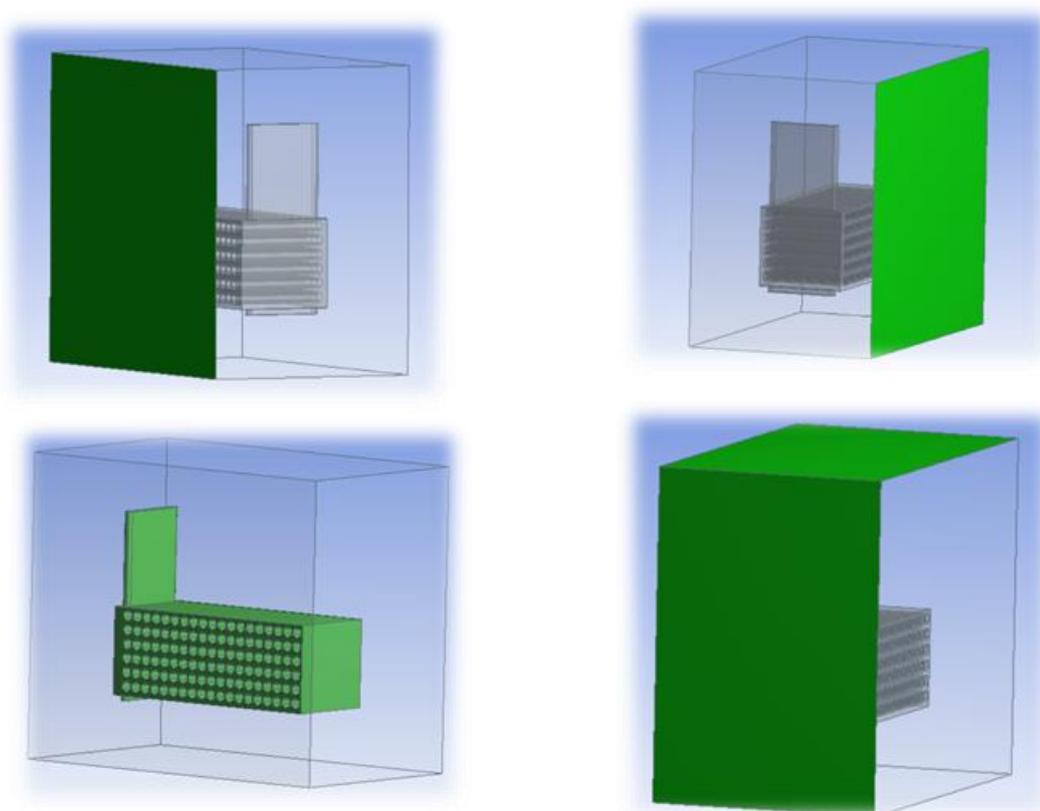


Ilustración 21: En orden, Inlet, Outlet, Wall y Opening

En primer lugar, se define el volumen de control del análisis, es decir, la zona del espacio en la que se va a llevar a cabo dicha simulación y se establece el área de entrada y salida del aire, así como las paredes del objeto a analizar, en este caso el radiador. Se nombran cada una de las caras:

- Inlet: Entrada de aire.
- Outlet: Salida de aire.
- Opening: Zona abierta al ambiente, sin aceleraciones ni presión.
- Wall: Paredes del cuerpo del radiador.

6.2.2 Mallado

El siguiente paso es realizar el mallado del conjunto radiador-volumen de control a simular. Para ello se utiliza un tamaño de grano de 52.546 mm, recomendado por el software para dicha geometría ya que no se necesita una especial precisión en esta simulación.

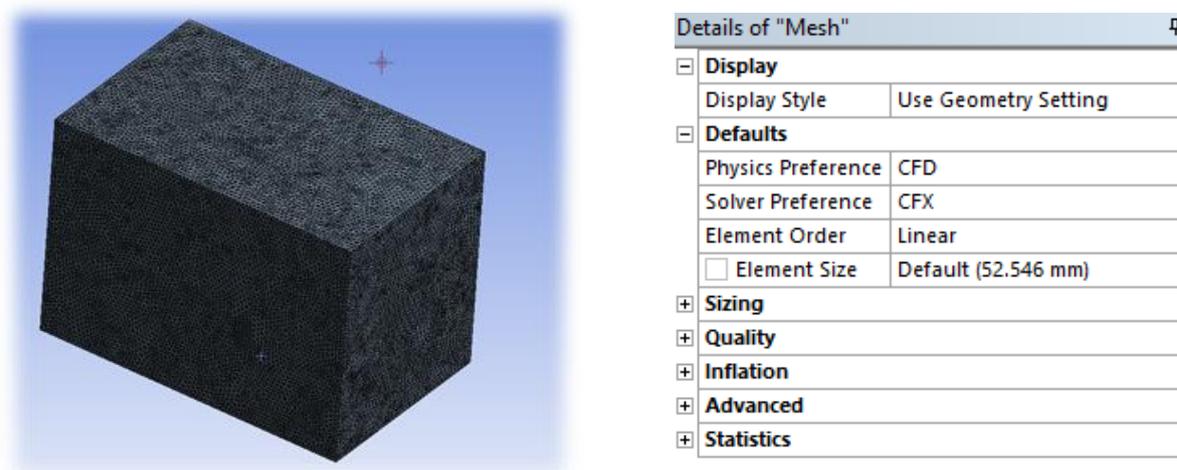


Ilustración 22: Mallado volumen de control

6.2.3 Resultados

La simulación requiere de la fijación de unos parámetros para que tras ella se muestren los parámetros requeridos, de esta forma se introduce la velocidad del aire a la entrada al radiador, que es la velocidad a la que se desplaza la moto, calculada anteriormente. También se fija la presión relativa a la salida del volumen de control, que este caso es 0 Pa, pues se trata de una abertura al ambiente, donde el aire no es conducido.

Los resultados proporcionan la velocidad de paso a lo largo de todo el volumen de control, pero únicamente se pone el objetivo en la pared frontal del radiador, donde se puede ver que la velocidad aproximada es de 20 m/s.

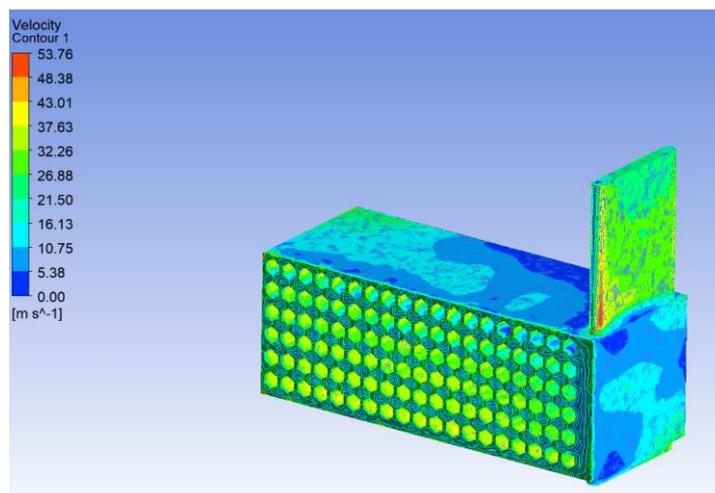


Ilustración 23: Sección de la simulación aerodinámica

6.3 Coeficiente de convección

Una vez obtenida la velocidad de paso del aire en diferentes zonas del radiador se procede al cálculo del coeficiente de convección entre las paredes del radiador y el aire en función de la velocidad de este. Para la simulación térmica es necesario el cálculo del coeficiente de convección en dos zonas: la primera de ellas la paralela al sentido del aire y por tanto este irá a una determinada velocidad; la segunda la perpendicular, es decir, con la que el aire choca y se desvía, disminuyendo por tanto su velocidad.

Para ello en primer lugar se obtiene el diámetro hidráulico:

$$Dh = \frac{4 \cdot A_c}{P}$$

$$Dh = 8 \text{ mm}$$

Ecuación 11: Diámetro Hidráulico

A continuación, obtenemos la viscosidad del aire, con los datos de las tablas de propiedades térmicas del aire a presión atmosférica:

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

$$v = 1.717 \cdot 10^{-5}$$

Ecuación 12: Viscosidad del aire

Con estos datos y habiendo asumido anteriormente la velocidad que va a llevar la moto para todos los cálculos del presente proyecto se procede al cálculo del número de

Reynolds, el cual se calcula dos veces, una para la velocidad del aire en el flujo paralelo y otra para el flujo perpendicular:

$$Re = \frac{Dh \cdot V}{\nu}$$

$$Re_1 = 12938.84$$

$$Re_2 = 9318.03$$

$$Re > 4000 \rightarrow \text{Turbulento}$$

Ecuación 13: Número de Reynolds

De esta forma se obtiene que el tipo de régimen es turbulento, y ya es posible obtener el número de Nusselt, que nos indica el coeficiente de transmisión de calor por convección, en ambos casos.

$$Pr = 0.7255$$

$$G = \frac{Pr}{\left(\frac{0.029}{Re}\right)^{1/2} \left[5Pr + 5 \ln \left[\frac{1 + 5Pr}{6}\right] - 5\right] + 1}$$

$$Nu_1 = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_2 = 0.029 Re^{0.8} G$$

$$Nu_1 = 40.25$$

$$Nu_2 = 30.95$$

Ecuación 14: Coeficiente de transmisión de calor por convección

Para el cálculo del número de Nusselt hay varias alternativas que varían en función del tipo de flujo, así como el elemento y su temperatura. Para las condiciones que ocupan el estudio, se han calculado dos coeficientes de convección, uno para flujo interno forzado ya que el aire fluye por el interior de un conducto hexagonal, y otro para flujo externo paralelo a una placa plana, pues el aire recorre las paredes frontales del radiador. Para ambos se ha seleccionado el cálculo según la expresión de McAdams. Otro de los parámetros necesarios para la selección de la ecuación ha sido el número de Prandtl del aire, obtenido de la tabla correspondiente de propiedades del aire.

6.4 Simulaciones térmicas

Una vez obtenidos los coeficientes de convección se procede a la simulación térmica del radiador en la que se obtiene las temperaturas alcanzadas en las diferentes partes de este, así como en la salida del conducto, lugar donde se pondrá especial atención.

6.4.1 Condiciones de contorno

Para la simulación térmica se utiliza el módulo CFD de ANSYS, denominado Fluent. Donde las condiciones de contorno se introducen mediante caras del modelo, es decir, nombrando las diferentes superficies. De manera que en este caso, se introducen:

- Inlet: Zona de entrada del fluido refrigerante al conducto.
- Outlet: Salida del conducto de refrigerante.
- Convección Paralela: Superficies paralelas a la dirección del aire.
- Convección Perpendicular: Superficies perpendiculares a la dirección del aire.

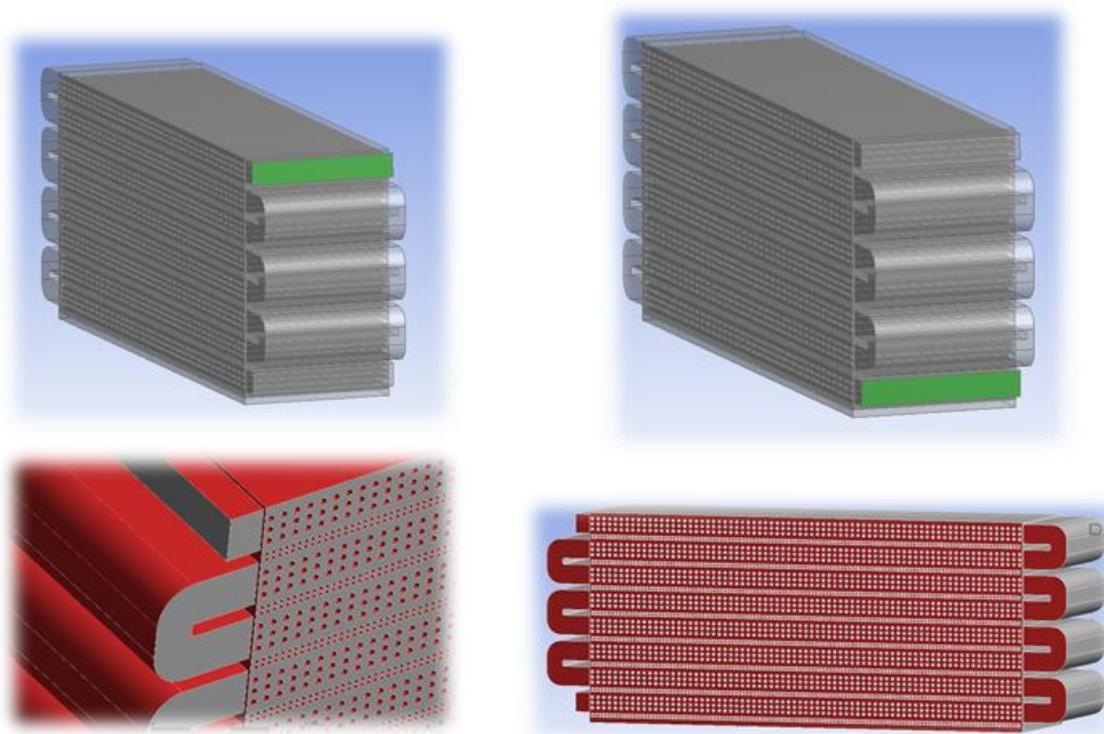


Ilustración 24: Inlet, Outlet y superficie de convección

6.4.2 Mallado

En este caso para el mallado se opta por una configuración diferente a la recomendada por el software, ya que recomienda un tamaño de grano demasiado grande para la precisión requerida, por lo que tras diversas pruebas se opta por unas dimensiones de 10 mm, asegurando una buena precisión pero sin comprometer el rendimiento, ya que si se opta por un grano menor el tiempo que se tarda en construir el mallado es excesivo y ralentizaría demasiado la simulación sin aportar un beneficio en lo que a calidad se refiere, tan sustancial.

Esta medida de mallado es realmente un punto de partida ya que el software recalcula automáticamente mediante mallado adaptativo las medidas que se ajustan mejor a cada sección del modelo en función de la complejidad de la geometría.

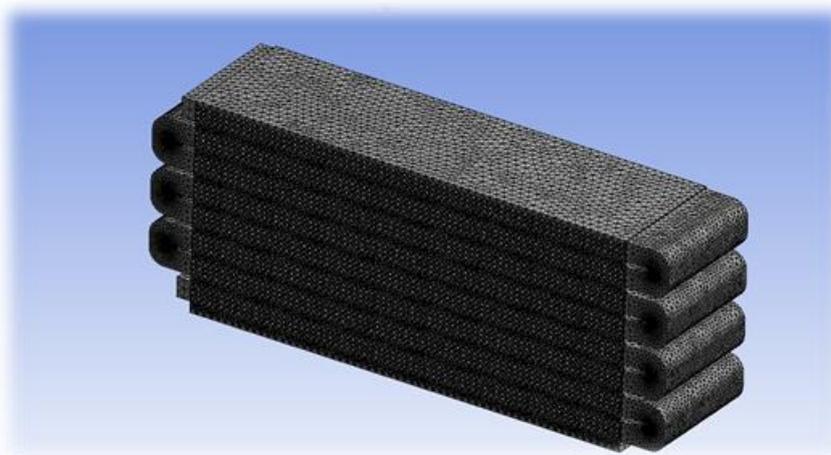


Ilustración 25: Mallado para simulación térmica

6.4.3 Set - up

Una vez realizado el mallado de la pieza se procede a programar las diferentes opciones de la simulación:

- Ecuaciones
- Parámetros de contorno
- Método de cálculo
- Renderización

6.4.3.1 Ecuaciones

Antes de comenzar se debe seleccionar las ecuaciones que el software llevará a cabo, según el tipo de simulación, condiciones, y materiales.

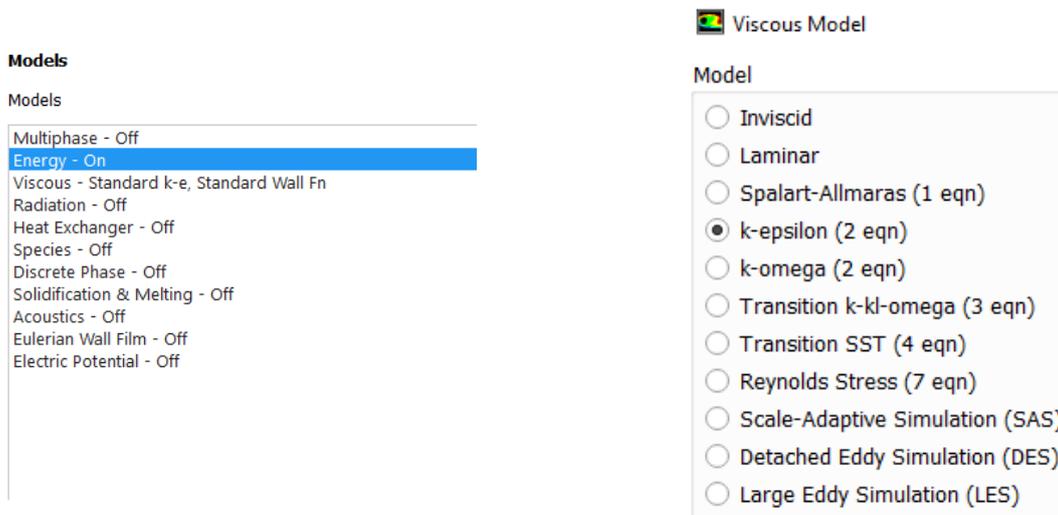


Ilustración 26: Ecuaciones simulación térmica

Se activan los modelos de energía y el modelo viscoso, donde se selecciona la correlación k-epsilon, ya que se trata de un flujo turbulento como se ha podido comprobar en apartados anteriores. Asimismo, se introduce la presencia de gravedad, así como su valor y sentido.

6.4.3.2 Parámetros de contorno

Estos parámetros son los que se incorporan a cada una de las superficies de creadas anteriormente, de forma que se pueden dividir en dos tipos bien diferenciados:

- Inlet y Outlet
- Convección Paralela y Perpendicular

Inlet y Outlet

En las zonas de entrada y salida de refrigerante se introducen los parámetros de gasto másico calculados, ya que se determinan como zonas de flujo másico. Tanto a la entrada como a la salida se introducen los mismos valores, asumiendo que no hay pérdidas de refrigerante durante el trasiego de masa. Asimismo, también determina el sentido del flujo.

Zone Name
inlet

Momentum	Thermal	Radiation	Species	DPM	Multiphase	Potential	UDS
Reference Frame							
Absolute							
Mass Flow Specification Method							
Mass Flow Rate							
Mass Flow Rate (kg/s)							
0.29							
constant							
Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)							
0							
constant							
Direction Specification Method							
Direction Vector							
Coordinate System							
Cartesian (X, Y, Z)							
X-Component of Flow Direction							
1							
constant							
Y-Component of Flow Direction							
0							
constant							
Z-Component of Flow Direction							
0							
constant							
Turbulence							
Specification Method							
Intensity and Viscosity Ratio							
Turbulent Intensity (%)							
5							
P							
Turbulent Viscosity Ratio							
10							
P							

Zone Name
outlet

Momentum	Thermal	Radiation	Species	DPM	Multiphase	Potential	UDS
Reference Frame							
Relative to Adjacent Cell Zone							
Mass Flow Specification Method							
Mass Flow Rate							
Mass Flow Rate (kg/s)							
0.29							
constant							
Direction Specification Method							
Direction Vector							
Coordinate System							
Cartesian (X, Y, Z)							
X-Component of Flow Direction							
-1							
constant							
Y-Component of Flow Direction							
0							
constant							
Z-Component of Flow Direction							
0							
constant							

Ilustración 27: Set-up Inlet y Outlet

Convección Paralela y Perpendicular

Aquí se establecen las condiciones térmicas de las zonas de intercambio de calor, de manera que, tras los cálculos de convección realizados, estos se introducen en cada una de las superficies de contorno delimitadas. Además, se determina el valor de temperatura ambiente que se ha establecido en 25 °C y el material

Zone Name
conveccionparal

Adjacent Cell Zone
solid

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Wall Film Potential

Thermal Conditions

Heat Flux
 Temperature
 Convection
 Radiation
 Mixed
 via System Coupling
 via Mapped Interface

Heat Transfer Coefficient (w/m2-k) 40.25 constant

Free Stream Temperature (c) 25 constant

Wall Thickness (m) 0

Heat Generation Rate (w/m3) 0 constant

Shell Conduction 1 Layer Edit...

Zone Name
conveccionperp

Adjacent Cell Zone
solid

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Wall Film Potential

Thermal Conditions

Heat Flux
 Temperature
 Convection
 Radiation
 Mixed
 via System Coupling
 via Mapped Interface

Heat Transfer Coefficient (w/m2-k) 30.95 constant

Free Stream Temperature (c) 25 constant

Wall Thickness (m) 0

Heat Generation Rate (w/m3) 0 constant

Shell Conduction 1 Layer Edit...

Material Name
aluminum Edit...

Ilustración 28:Set-up Convección Paralela y Perpendicular

6.4.3.3 Renderizado

El último paso antes de comenzar a simular es establecer el número de iteraciones a realizar por el software, es decir, el número de veces que calculará el mismo proceso de transmisión de calor. Según la precisión requerida en los resultados, el hardware utilizado y el sistema a simular, se decide un número determinado de iteraciones. En este caso se ha optado por 400, ya que como más tarde se verá, se considera un valor óptimo para que los valores residuales del proceso de simulado sean lo suficientemente estables.

6.4.4 Resultados de la simulación

Tras realizar el número de iteraciones establecido se procede a la visualización de los resultados, cuyo principal objetivo es alcanzar la temperatura de 78 °C ya que, de ser mayor, el motor sufriría un estrés térmico que podría llevar a un mal un funcionamiento o a la rotura del material.

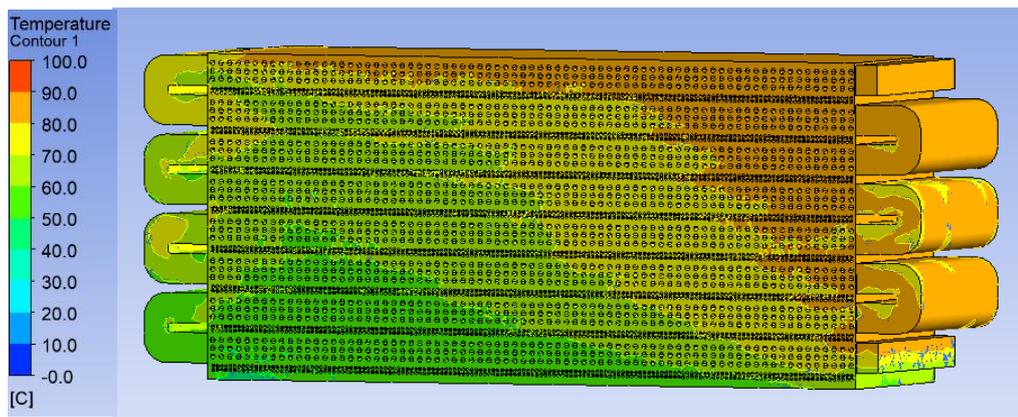


Ilustración 29: Resultado simulación térmica

Como se puede observar en la “Ilustración 30” la temperatura máxima se da en la entrada del conducto de refrigerante, y desde ese punto se distribuye por las zonas adyacentes gracias a la transmisión de calor, y al movimiento del propio fluido refrigerante.

La transmisión de calor se distribuye por tanto de la forma esperada, de manera que el calor va disminuyendo conforme el conducto llega al final y cuánto más se aleja de la entrada al mismo.

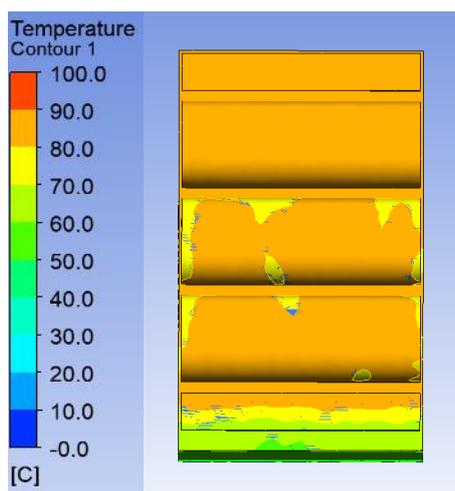


Ilustración 30: Vista lateral resultados

A la salida de la conducción se pueden ver las diferentes temperaturas a las que está el fluido refrigerante según la zona, y al igual que pasa en el resto del cuerpo del radiador, la parte más alejada de la entrada al conducto está a una menor temperatura.

Tras un estudio de temperaturas en la zona de salida del conducto mediante una función de cálculo de ANSYS se determina que la temperatura a la salida tras el proceso de intercambio de calor es de 76.779 °C (349.929 K), por lo que está dentro de los valores asumibles y en los que el motor trabajaría de forma correcta, siendo por tanto un resultado válido.

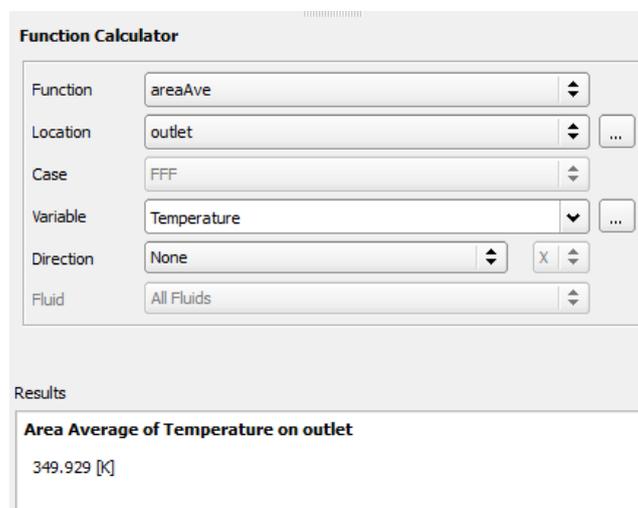


Ilustración 31: Temperatura media en salida



7. Proyecto de fabricación

7.1 Proyecto de fabricación

El proyecto de fabricación engloba diferentes aspectos del global del presente trabajo y es una parte fundamental de cualquier proyecto. Por una parte, en él se explicará el proceso de selección de material para la construcción del modelo, así como los pasos y la forma en la que se deberá fabricar.

7.2 Selección de material

La selección de material es de especial importancia ya que el intercambio de calor varía de gran manera según el que sea, pues es el medio de transporte del calor, entre el refrigerante y el ambiente. Otra faceta importante del material es el peso, ya que en competición es uno de los principales factores que marca la diferencia.

Por tanto, a la hora de elegir el material se hará teniendo en cuenta estos dos factores, así como su precio.

Para tener una ayuda y tomar una decisión lo más acertada posible se utiliza el software de materiales CES Edupack, en el cual se puede establecer una serie de características deseadas y realizar una búsqueda en base a estas. En el caso de estudio que ocupa, esto se realiza de la siguiente manera:

▼ Propiedades generales			
	Mínimo	Máximo	
Densidad	<input type="text" value="1000"/>	<input type="text" value="20000"/>	kg/m ³
Precio	<input type="text"/>	<input type="text"/>	EUR/kg
Fecha de primer uso ("-" significa AC)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
▶ Propiedades mecánicas			
▼ Propiedades térmicas			
	Mínimo	Máximo	
Punto de fusión	<input type="text"/>	<input type="text"/>	°C
Temperatura de vitrificación	<input type="text"/>	<input type="text"/>	°C
Máxima temperatura en servicio	<input type="text"/>	<input type="text"/>	°C
Mínima temperatura en servicio	<input type="text"/>	<input type="text"/>	°C
¿Conductor térmico o aislante?	Buen conductor		▼
Conductividad térmica	<input type="text" value="7"/>	<input type="text" value="200"/>	W/m.°C
Calor específico	<input type="text"/>	<input type="text"/>	J/kg.°C
Coefficiente de expansión térmica	<input type="text"/>	<input type="text"/>	µstrain/°C

Ilustración 32:Filtro de búsqueda de propiedades

Como se puede observar se establecen unos rangos bastante amplios, de forma que se maximicen las posibilidades, dando como resultado un gran número de materiales válidos.

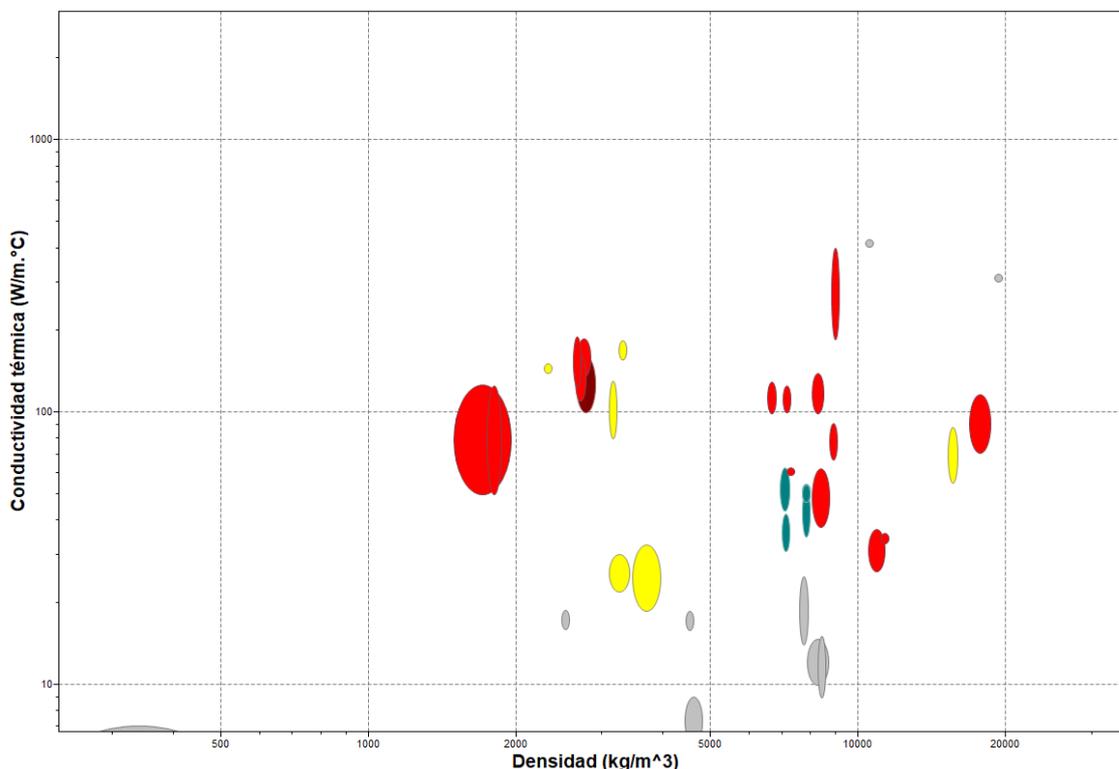


Ilustración 33: Resultado búsqueda CES Edupack

En el gráfico que devuelve el software se puede ver coloreados los materiales idóneos con el rango determinado, mientras que en gris los que serían demasiado extremos en alguna de los dos sentidos.

En cuanto a conductividad térmica, el mejor material posible es el cobre, seguido de diferentes aleaciones de aluminio y de los metales preciosos, oro y plata, los cuales se desestiman debido a su alto precio y peso, que no justificaría una conductividad térmica no tan alejada del cobre.

Por otra parte, se encuentra la densidad, siendo el que menor tiene el magnesio, seguido de otra vez del aluminio, quedando ya más alejado el cobre, cuya diferencia de peso es notoria.

Es por ello que se ha realizado una tabla comparativa de los diferentes materiales con mejores propiedades en cada caso, con la intención de poder observar mejor las diferencias.

Material	Conductividad térmica (W/m.ºC)	Densidad (kg/m ³)
Cobre	186-398	8940
Plata	415-423	10500
Magnesio	50-126	1500-1950
Aluminio	209-230	2700

Tabla 5: Propiedades materiales

Se puede ver cómo el material con mayor conductividad térmica es la plata, pero no es suficientemente alta como para compensar un elevado peso. El cuál es muy contenido en el magnesio, pero viene acompañado de una pequeña capacidad de conductividad térmica. En una posición intermedia se encuentran el aluminio y el cobre, este último con una mayor conductividad, pero también con un peso bastante superior.

Vistos las diferentes posibilidades, cada una con unas ventajas e inconvenientes, se decide que el material idóneo es el aluminio, ya que posee una conductividad correcta acompañada de un bajo peso, y precio reducido ya que es uno de los materiales más comunes en el presente.

7.3 Proceso de fabricación

Tras la evaluación de diferentes métodos de fabricación se ha optado por la impresión 3D metálica. Este proceso funciona de forma muy parecida a la impresión 3D de polímeros, ampliamente conocida.

El proceso consta de dos partes fundamentales, un rayo láser y polvo de aluminio. El polvo de aluminio está formado por pequeñas partículas de aluminio en su aleación AlSiMg0.6, la cual es usada específicamente para este proceso gracias a un punto de

fusión alto, así como, a una alta conductividad térmica. Mientras, el láser se ocupa de la fusión de este polvo creando la pieza por capas como si de una extrusora de plástico se tratara. Se trata de un proceso capaz de desarrollar piezas de elevada complejidad, motivo por el cual ha sido seleccionado.

Las impresoras 3D para metales son máquinas de grandes dimensiones y todavía muy poco extendidas, a lo que se suma que portan una avanzada tecnología que está en continuo desarrollo. Por todo ello poseen un elevado precio que puede oscilar entre 100.000 € y 1.000.000 €, lo que sumado al coste del material, da como resultado unos trabajos de altos costes.



Ilustración 34: Impresora 3D de materiales metálicos

7.3.1 Diseño para fabricación

Dado el proceso de fabricación seleccionado, el diseño no requiere de cambios ni adaptaciones ya que la impresora es capaz de realizar todo el modelo de una sola pieza ahorrando tiempo de preparación para la impresión, así como operaciones posteriores.

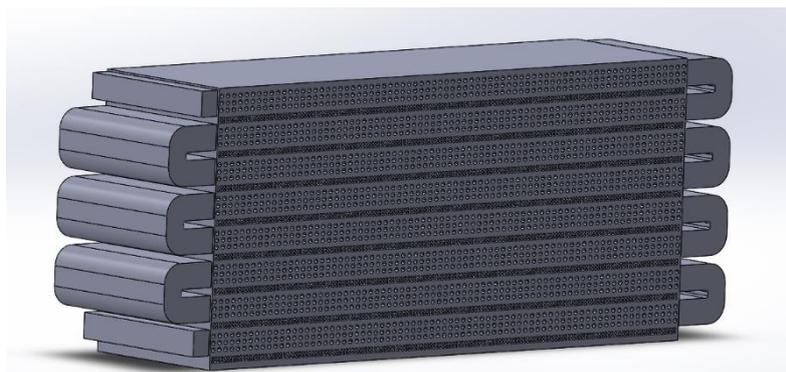


Ilustración 35: Diseño a fabricar

7.4 Presupuesto

Dada la juventud de este sistema de fabricación, el software de impresión está todavía en propiedad de las empresas fabricantes de las impresoras por lo que los costes referidos a la impresión, así como los tiempos de esta son estimados en función a datos proporcionados por las propietarias.

De esta forma se ha podido obtener el siguiente presupuesto en función a cálculos realizados en SolidWorks sobre el diseño final en los que se obtiene que el peso de la pieza es de 8.42 kg.

- Precio aleación AlSi7Mg0.6: 150 €/kg

Al coste del material se ha de sumar el coste del trabajador, el tiempo de impresión y la amortización de la máquina, ya que se trata de impresoras muy costosas que no tienen una elevada utilización.

- Coste impresora: 100.000 €
- Coste operario: 20 €/h

Según estimaciones obtenidas por fabricantes el coste final sumando todo lo añadido anteriormente es:

Tiempo aproximado de fabricación	Cantidad de material	Coste total
240 h	8.42 kg	14.631,10 €

Tabla 6: Coste final de fabricación

Se trata de una cantidad importante, pero debido a su complejidad es el método que ofrece unas mayores garantías. También se ha de tener en cuenta que se trata de una pieza única en lugar de una serie de estas y de un método novedoso, por lo que cabe la posibilidad que con el desarrollo de la tecnología los costes bajen considerablemente.

8. Conclusiones

Tras decenas de pruebas y cambios en la geometría del radiador y tras las simulaciones pertinentes se llega a un diseño final que cumple con los requisitos.

Estos requisitos son los calculados previamente en el ámbito de temperaturas, ya que, si la temperatura de salida del refrigerante no es la correcta, el motor no funcionará correctamente, provocando incluso la rotura de este de alcanzarse una temperatura elevada. El requisito primordial es que la temperatura de salida sean 78°C tal y como se ha calculado en apartados anteriores.

Además de los requisitos térmicos se selecciona dicho diseño por su forma compacta y por no albergar al paso de los conductos lugares elevadamente estrechos que dificulten el paso del refrigerante.

Tras el proyecto se encuentra un arduo trabajo de ensayos continuos y búsqueda de vías para alcanzar el objetivo propuesto, se puede ver reflejado a lo largo de la memoria la dificultad ya que se partía de un elemento existente y defectuoso con el cual se pretendía innovar llegando a un elemento actual y funcional.

Tras un trabajo en bucle de ensayo y error en el cual se ha tenido que ir aprendiendo continuamente de los errores y aciertos cometidos se puede concluir que los resultados obtenidos han sido positivos, en la línea de lo esperado, consiguiendo un buen funcionamiento teórico del producto, lo cual suele tener pequeñas diferencias con lo mostrado en la realidad, siendo interesante su fabricación y comprobación de manera experimental.

9. Referencias

9.1 Temario

- *Tema 2 Transmisión de calor.* (s.f.). Universidad Politécnica de Valencia.
- *Tema 3 Balance energético, lubricación y refrigeración.* (s.f.). Universidad Politécnica de Valencia.
- *Tema 3 Intercambiadores de calor.* (s.f.). Universidad Politécnica de Valencia.

9.2 Proyectos y trabajos

- Piedrahita, C. A. (2009). *Contribución al conocimiento del comportamiento térmico y la gestión térmica de los motores de combustión interna alternativos.* Valencia.
- ETSEIB Racing. (s.f.). *Sistema de regulación de la rigidez del chasis de una motocicleta de competición.*

9.3 Libros

- Prof. F. Payri, P. J. (2011). *Motores de combustión interna alternativos.* Universidad Politécnica de Valencia.

9.4 Normativa

- *Reglamento VI Competición Internacional MotoStudent.* (2019).

10. Anejos

10.1 Tablas

Las tablas utilizadas se pueden encontrar en el “Tema 2. Transmisión de calor”, referenciado en la bibliografía.

10.2 Diseños

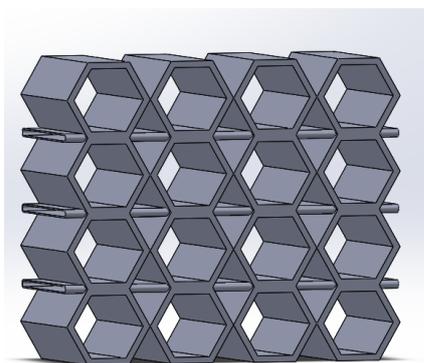


Ilustración 36: Evolución primer diseño



Ilustración 37: Diseño de múltiples conductos

10.3 Simulaciones realizadas

A continuación, se muestran todas las simulaciones realizadas tanto térmicas como aerodinámicas.

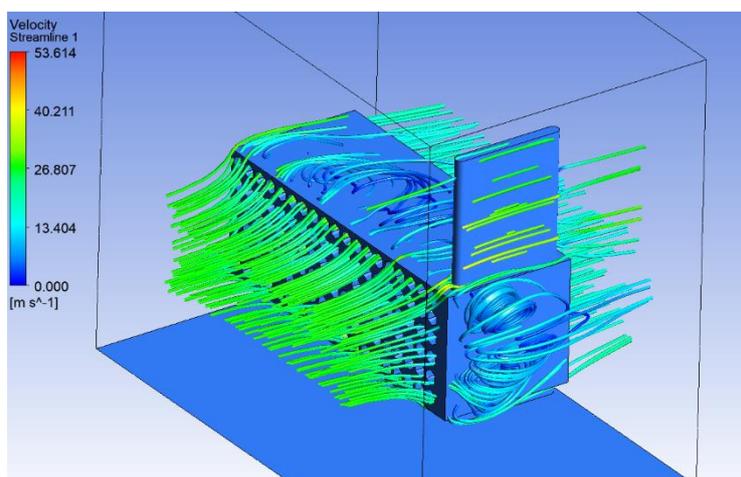


Ilustración 38: Simulación aerodinámica 1

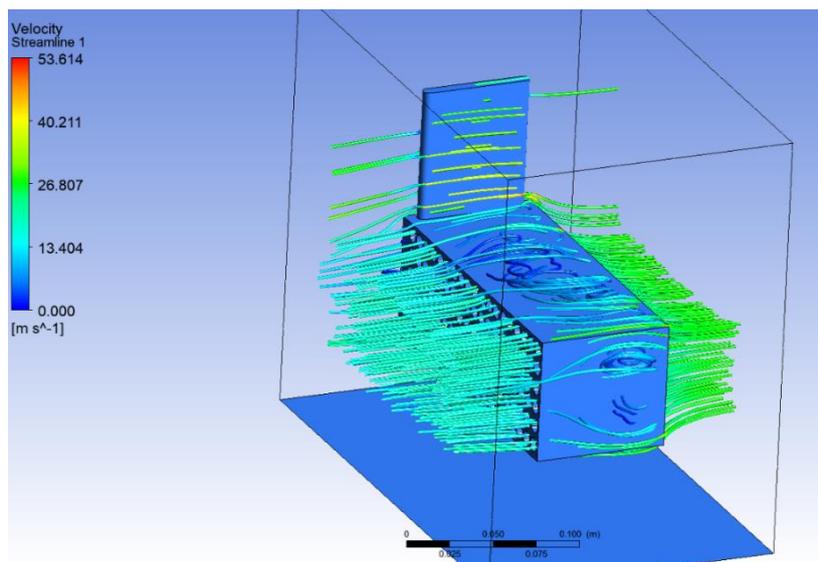


Ilustración 39: Simulación aerodinámica 2

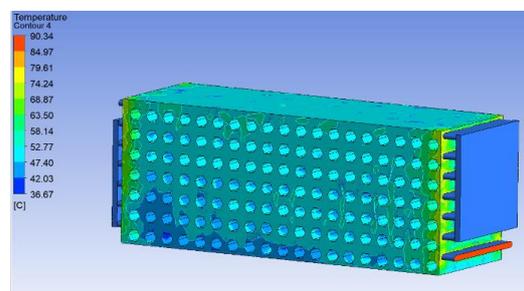
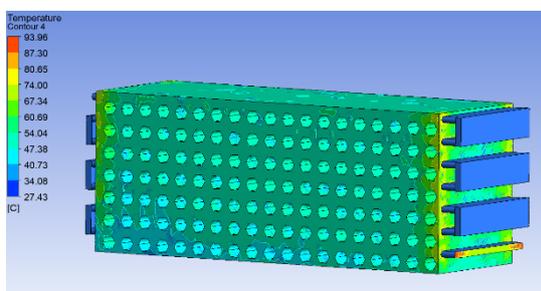
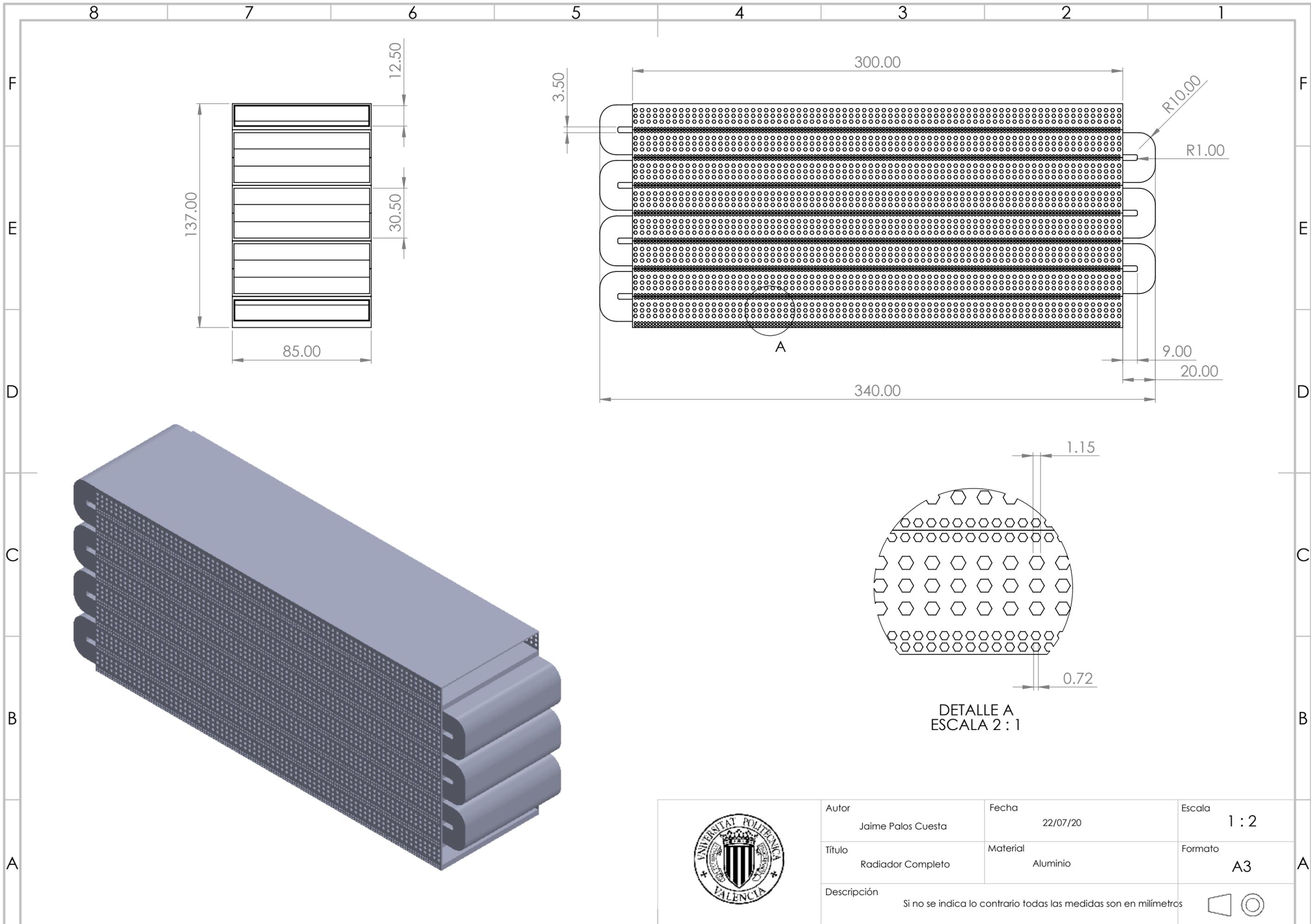


Ilustración 40: Simulaciones térmicas de evoluciones en el diseño



10.4 Planos



DETALLE A
ESCALA 2 : 1



Autor	Fecha	Escala
Jaime Palos Cuesta	22/07/20	1 : 2
Título	Material	Formato
Radiador Completo	Aluminio	A3
Descripción	Si no se indica lo contrario todas las medidas son en milímetros	