



**TecnoCampus**  
Escola Superior  
Politécnica

*Centre adscrit a la*



Universitat  
Pompeu Fabra  
Barcelona

**Ingeniería Mecánica**

**Estudio y dimensionado la refrigeración de un monoplaza de competición**

**Memoria final**

**Autor(s):**

Marc Ondé Soler

**Profesor:**

Klára Vékony Jarecsny

**Escola Superior Politècnica**

**Cursó 2023/2024**



**TecnoCampus**  
Mataró-Maresme

## **Resumen**

El proyecto consiste en el desarrollo y creación de un sistema de refrigeración para un vehículo diseñado para la competición Formula Student, concretamente el monoplaça de competición del equipo TCMs del Tecnocampus Mataró de la temporada 2023-2024. Consiste en un sistema de refrigeración activo de convección forzada, este sistema suple las necesidades de control de temperatura que se requieren para la batería, respetando la normativa de la competición y las necesidades del equipo.

## **Resum**

El projecte consisteix en el desenvolupament i creació d'un sistema de refrigeració per a un vehicle dissenyat per la competició de la Formula Student, concretament, aquest sistema es el que s'ha implementat al monoplaça de competició de l'equip TCMs del Tecnocampus Mataró de la temporada 2023-2024. Consisteix en un sistema de refrigeració actiu de convecció forçada, aquest sistema supleix les necessitats del control de temperatura que es requereixen en la bateria, respectant tant la normativa de competició, com suplint les necessitats de l'equip.

## **Abstract**

The project consists of the development and creation of a cooling system for a vehicle designed for the Formula Student competition, specifically the competition car of the TCMs team of the Tecnocampus Mataró for the 2023-2024 season. The system is an active forced convection cooling system. This system meets the temperature control needs required for the battery, respecting competition regulations and the needs of the team.

# Índice

Resumen .....	IV
Resum.....	VI
Abstract .....	VII
Índice .....	9
Índice de Figuras.....	9
Índice de tablas .....	9
Glosario .....	9
1. Objetivos.....	9
1.1. Propósito.....	9
1.2. Finalidad.....	10
1.3. Objeto.....	11
1.4. Abasto .....	11
1.5. Contexto en las líneas de búsqueda y transferencia de conocimientos del Tecnocampus.....	12
2. Introducción a la Formula Student y al equipo .....	14
2.1. Contexto interno del equipo .....	15
2.1.1. Restricciones y normas impuestas por el equipo .....	15
2.1.2. Objetivos y especificaciones técnicas .....	19
2.1.3. Voltcat-24 .....	20
2.2. Estudio de la normativa y patentes .....	20
2.2.1. Estudio de la normativa referente a las baterías y refrigeración.....	22
2.2.2. Patentes .....	23
2.3. Estudio y análisis de las pruebas de la competición .....	25
2.3.1. Estudio de las diferentes pruebas.....	25
2.3.2. Análisis de pruebas .....	25

2.4.	Estudio de capacidad y potencia necesarias .....	26
3.	Introducción a la Termodinámica.....	27
3.1.	Teoría de la mecánica de fluidos.....	27
3.1.1.	Introducción a la mecánica de fluidos.....	29
3.1.2.	Funcionamiento de la dinámica de fluidos computacional (CFD) .....	31
3.1.3.	Proceso de creación de una simulación de CFD.....	32
3.1.4.	Tipos de transferencia de calor y sus aplicaciones .....	32
3.2.	Estudio del funcionamiento de las baterías y sus diferentes sistemas de disipación de calor.	34
4.	Dimensionamiento electrónico del paquete de baterías .....	36
4.1.	Análisis y selección de baterías .....	37
4.1.1.	Estudio de las opciones de celda .....	39
4.1.2.	Propuestas de diseño y valoración de estas .....	39
4.1.3.	Explicación de la solución a nivel electrónico .....	40
4.2.	Cálculo de potencia a disipar.....	46
5.	Distribución geométrica y disipación de potencia .....	50
5.1.	Presentación de la distribución .....	51
5.2.	Procedimiento del cálculo teórico de la disipación de un paquete .....	52
5.3.	Cálculos realizados del sistema .....	53
6.	Comprobación mediante simulación .....	54
6.1.	Diseño de la geometría.....	55
6.2.	Simulación en Ansys.....	56
6.2.1.	Geometría .....	58
6.2.2.	Mallado de la geometría.....	59
6.2.3.	Configuración de los parámetros de la simulación.....	59
6.3.	Resultados de la simulación .....	59
6.3.1.	Análisis de resultados.....	63

7.	Modificaciones y pruebas .....	67
7.1.	Modificaciones en la geometría.....	69
7.1.1.	Primera modificación.....	69
7.1.2.	Segunda modificación.....	70
7.1.3.	Tercera modificación.....	73
7.1.4.	Resumen de modificaciones geométricas .....	78
7.2.	Modificación de velocidades .....	80
7.2.1.	Doble entrada de aire .....	83
7.2.2.	Doble salida de aire.....	84
7.2.3.	Comparativa del sistema de doble entrada con el sistema de doble salida. ....	84
7.3.	Modificación de ángulos de entrada y salida .....	86
8.	Diseño de refrigeración activa .....	86
8.1.	Requisitos de refrigeración.....	88
8.2.	Dimensionado y elección de ventiladores .....	90
9.	Diseño final y simulación numérica del sistema.....	91
9.1.	Presentación del diseño final y características de la simulación .....	96
9.2.	Resultados obtenidos y análisis de estos .....	98
9.3.	Análisis de resultados.....	98
10.	Planificación .....	100
10.1.	Desviaciones en la planificación .....	101
11.	Impacto medioambiental.....	98
12.	Perspectiva de género .....	98
13.	Conclusiones .....	100
14.	Bibliografía .....	101

## Índice de Figuras

Figura 2.1 Diseño 3D del monoplaza Voltcat-24 [3] .....	14
Figura 2.2 Esquema del circuito en ocho del Skippad. ....	21
Figura 3.1 Ecuaciones de Navier-Stokes en forma vectorial simplificada [12] .....	25
Figura 4.1 Celda INR21700-P45B [14] .....	32
Figura 4.2 Celda COSMX 95B0D0HD [15] .....	33
Figura 4.3 Celda COSMX 82D6J7 [16].....	34
Figura 4.4 Croquis con las dimensiones en cm disponibles para la caja de baterías [3] .....	34
Figura 4.5 Distribución de celdas del paquete de baterías .....	36
Figura 5.1 distancias y separaciones de las celdas.....	39
Figura 5.2 Configuración alineada [13] .....	41
Figura 5.3 Configuración escalonada [13] .....	41
Figura 5.4 Correlaciones de números de Nusselt primera condición [13] .....	43
Figura 5.5 Correlaciones de números de Nusselt segunda condición [13] .....	44
Figura 5.6 Resultados obtenidos mediante la hoja de cálculo .....	49
Figura 6.1 Vista de la geometría con un corte .....	52
Figura 6.2 Interfaz del programa Ansys Workbench .....	53
Figura 6.3 interfaz del programa Design Modeler.....	54
Figura 6.4 Interfaz del subprograma Mesh de Ansys.....	55
Figura 6.5 Gráfico con los residuales obtenidos de la simulación.....	57
Figura 6.6 Mapa de velocidades obtenidas en la simulación .....	57
Figura 6.7 Mapa de temperaturas obtenidas en la simulación.....	58
Figura 7.1 Vista lateral del corte hecho de la geometría .....	60
Figura 7.2 Medidas de la primera modificación .....	60
Figura 7.3 Vista de la geometría post modificaciones .....	61
Figura 7.4 Vista de la malla obtenida .....	61
Figura 7.5 Mapa de velocidades de la primera modificación.....	62
Figura 7.6 Mapa de temperaturas de la primera modificación .....	62
Figura 7.7 Medidas de la segunda modificación .....	64
Figura 7.8 Medidas de las oberturas de la tapa de la caja .....	64
Figura 7.9 Mapa de velocidades de la segunda modificación .....	65
Figura 7.10 Mapa de temperaturas de la segunda modificación .....	65
Figura 7.11 Mapa de velocidades de la tercera modificación .....	67

Figura 7.12 Mapa de temperaturas de la tercera modificación.....	68
Figura 7.13 Grafica con las simulaciones de la variación de velocidad con la doble entrada	70
Figura 7.14 Mapa de velocidades de la modificación 2 con 5 m/s .....	71
Figura 7.15 Mapa de velocidades de la modificación 2 con 15 m/s .....	71
Figura 7.16 Mapa de temperaturas de la modificación 2 con 5 m/s .....	72
Figura 7.17 Mapa de temperaturas de la modificación 2 con 15 m/s .....	73
Figura 7.18 Grafica con las simulaciones de la variación de velocidad con la doble entrada	74
Figura 7.19 Mapa de velocidades de la modificación 3 con 5 m/s .....	75
Figura 7.20 Mapa de velocidades de la modificación 3 con 15 m/s .....	76
Figura 7.21 Mapa de temperaturas de la modificación 3 con 5 m/s .....	77
Figura 7.22 Mapa de temperaturas de la modificación 3 con 5 m/s .....	78
Figura 7.23 Grafica comparativa con los valores de la temperatura máxima de celda.....	79
Figura 7.24 Grafica del resultado de las simulaciones con el cambio de ángulo .....	80
Figura 7.25 Mapa de velocidades internas de la simulación con un ángulo de 0°.....	81
Figura 7.26 Mapa de velocidades internas de la simulación con un ángulo de -40° .....	82
Figura 7.27 Mapa de temperaturas internas de la simulación con un ángulo de -40°.....	82
Figura 7.28 Mapa de temperaturas internas de la simulación con un ángulo de -40°.....	83
Figura 9.1 Geometría del diseño final del sistema.....	87
Figura 9.2 Posición de las dos celdas más calientes del sistema .....	88
Figura 9.3 Mapa de Temperaturas internas de la simulación .....	89
Figura 9.4 Mapa de velocidades internas de la simulación .....	89
Figura 10.1 Diagrama de Gantt de la planificación del proyecto .....	93
Figura 10.2 Continuación del diagrama de Gantt de la planificación del proyecto.....	94
Figura 10.3 Final del diagrama de Gantt de la planificación del proyecto .....	95

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Normativa referente a la refrigeración .....	18
Tabla 2.2 Consumos de los diferentes vehículos de la FSAE Spain en 2018 .....	23
Tabla 4.1 Configuraciones con sus respectivas opciones.....	34
Tabla 4.2 Datos del monoplaza.....	37
Tabla 5.1 Parámetros necesarios del sistema .....	46
Tabla 5.2 Propiedades del aire a 45 °C.....	47
Tabla 6.1 Temperaturas máxima y promedio obtenidas de la simulación.....	58
Tabla 7.1 Temperaturas máxima y promedio obtenidas de la modificación .....	63
Tabla 7.2 Temperaturas máxima y promedio obtenidas de la segunda modificación.....	66
Tabla 7.3 Temperaturas máxima y promedio obtenidas de la tercera modificación.....	68
Tabla 7.4 Resumen de los resultados obtenidos de las modificaciones geométricas.....	69
Tabla 7.5 Resultados de las simulaciones de doble entrada modificando la velocidad. ....	70
Tabla 7.6 Resultados de las simulaciones de doble salida modificando la velocidad .....	73
Tabla 7.7 Tabla con los valores de las temperaturas máximas de celda.....	79
Tabla 7.8 Resultados de las simulaciones con el sistema de doble salida y cambio de ángulo .....	80
Tabla 9.1 Tabla Resumen de las características del diseño final .....	87
Tabla 9.2 Temperaturas máximas y promedio de superficie más las temperaturas de celda más caliente.....	90
Tabla 10.1 Tabla descriptiva de tanto tiempos como precedencia de las tareas .....	92
Tabla 12.1 Peso y potencia .....	99

## Glosario

**Ángulo de incidencia:** Ángulo en el que el flujo de aire incide sobre las superficies de las celdas en el sistema de refrigeración, afectando la eficiencia de la disipación de calor.

**Ansys Workbench:** Plataforma de software utilizada para realizar simulaciones de dinámica de fluidos y análisis estructural.

**Celda:** Unidad básica de una batería que almacena y libera energía eléctrica.

**CFD (Computational Fluid Dynamics):** Técnica de simulación utilizada para analizar y resolver problemas relacionados con el flujo de fluidos y la transferencia de calor.

**Design Modeler:** Módulo de Ansys Workbench utilizado para crear y modificar geometrías en simulaciones.

**Geometría:** Diseño y disposición física de las celdas y componentes del sistema de refrigeración.

**Monoplaza:** Vehículo de carreras diseñado para una sola persona, utilizado en competiciones como la Formula Student.

**Navier-Stokes:** Conjunto de ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos, esenciales para las simulaciones de CFD.

**Normativa de competición:** Reglas y regulaciones que deben seguirse para participar en la Formula Student y otras competiciones automovilísticas.

**Nusselt:** Número adimensional utilizado en la transferencia de calor para describir la relación entre la convección térmica y la conducción térmica.

**Refrigeración:** Proceso de disipación de calor generado por las celdas del paquete de baterías para mantener una temperatura óptima de funcionamiento.

**SAE:** Society of Automotive Engineers, organización que promueve la ingeniería y la industria automotriz.

**STA:** Sociedad de Técnicos de Automoción, organizadora de la competición Formula Student en España desde 2010.

**TCM Motorsports:** Equipo de competición encargado del desarrollo del monoplaza eléctrico.

## VIII

**Voltcat-24:** Nombre del monoplaza eléctrico desarrollado por el equipo TCM Motorsports para la temporada 2023-2024.

**Velocidad de flujo:** Velocidad a la que el aire circula dentro del sistema de refrigeración, afectando la capacidad de disipación de calor.

# **1. Objetivos**

## **1.1. Propósito**

El propósito de este proyecto es realizar el diseño del sistema de refrigeración del paquete de baterías del monoplaza eléctrico de la temporada 2023-2024, del equipo TCM Motorsports.

## **1.2. Finalidad**

La finalidad es colaborar con el diseño del del monoplaza, ampliando así las bases de conocimiento técnico del equipo para futuros proyectos.

## **1.3. Objeto**

El resultado buscado es la obtención i posible implementación de una propuesta de diseño del sistema de refrigeración, que cumpla con la normativa de competición, a parte de la documentación necesaria para poder justificar el diseño realizado.

## **1.4. Abasto**

En este proyecto se realizará la refrigeración de la caja de baterías del vehículo del TCM Motorsports, no se realizará ni los materiales de la caja ni la instalación eléctrica de la batera, solamente se realizará la disposición y elección de celdas, respecto a la celda, esta no se modelará, se considerará que genera un calor constante.

## **1.5. Contexto en las líneas de búsqueda y transferencia de conocimientos del Tecnocampus.**

Este Trabajo de final de grado se centra en el diseño y desarrollo de un sistema de refrigeración destinado a una batería para el vehículo eléctrico del equipo de competición TCMS, el cual es un componente fundamental para el equipo y la competición. De forma concreta, este proyecto se centra en la creación de modelos y simulaciones para el análisis de transferencia de calor y flujos de aire. Estos métodos y técnicas pueden ser extrapolados a una amplia gama de

productos, tanto electrónicos como mecánicos, que requieran sistemas eficientes de disipación de energía.

## **2. Introducción a la Formula Student y al equipo**

Para seguir con el trabajo es fundamental conocer al motivo principal por el que se desarrolla el siguiente sistema, la famosa competición llamada Formula Student.

La competición se celebra desde de 1981 por la Society of Automotive Engineers (SAE) en la Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos. Desde su creación, en 1979, la FSAE ha crecido significativamente y ha inspirado la creación de competiciones similares en todo el mundo, incluida la Formula Student en Europa [1]. Esta, se creó con el objetivo de desarrollar habilidades en la ingeniería y el ámbito de la gestión a través del desafío de diseñar, construir y competir con un monoplaza de carreras.

Actualmente se celebran competiciones en numerosos países de todo el mundo, entre ellos España, que desde el año 2010 cuenta con su propia competición, promovida por la STA . [2]

La competición incluye pruebas estáticas y dinámicas. Las estáticas evalúan el diseño, la presentación y el plan de negocios del vehículo. Las dinámicas prueban el rendimiento del monoplaza en la pista en áreas como aceleración, manejo, eficiencia de combustible y durabilidad.

Para poder participar en dicha competición, es muy importante contar con los mejores diseños y componentes. El correcto desarrollo del monoplaza es clave para poder competir, con el objetivo de ganar y posicionarse junto a universidades de referencia en el sector de la ingeniería.

Es importante destacar que la experiencia en Formula Student tiene un impacto significativo en el crecimiento personal y profesional de los estudiantes que participan, ya que los prepara de forma excepcional para sus futuras carreras en la industria automotriz y de ingeniería en sus distintos ámbitos.

El actual representante de la competición en la universidad Tecnocampus situada en Mataró es el equipo TCM MotorSports [3]. El equipo se fundó el año 2021 y ha desarrollado el proyecto de forma exitosa con una media de avances menor que la de la mayoría. Este se compone por unos 70 estudiantes de 9 grados distintos, entre ellos, distintas ingenierías, gestión de empresa, márketing y hasta incluso grados como enfermería.

## **2.1. Contexto interno del equipo**

El equipo se enfrenta a la tarea de confeccionar un coche eléctrico para competir en la Formula Student, por lo que las baterías suponen un gran desafío, causado por las exigentes restricciones que se plantean en la normativa de la competición. Así pues, el desafío es diseñar un sistema de refrigeración lo suficientemente potente y refinado para que reduzca la temperatura del paquete de baterías del año 23-24, para que este pueda pasar la normativa y no tener ningún problema de rendimiento.

Des del punto de vista de la termodinámica plantea diferentes desafíos, el principal es el de poder disipar el calor en el tiempo requerido y de forma que no tan solo no baje el rendimiento de las baterías, sino que asegure sus funcionalidades de cara a superar distintas pruebas y revisiones en el contexto de la competición.

### **2.1.1. Restricciones y normas impuestas por el equipo**

Para abordar esta tarea, nuestro equipo ha establecido una serie de restricciones y parámetros que guiarán nuestro proceso de diseño y desarrollo. Estas restricciones se han formulado cuidadosamente para garantizar que el proyecto cumpla de forma estricta con la normativa de la competición.

- El diseño debe cumplir con la normativa de competición, que se detalla más adelante en el trabajo.
- Se tiene que realizar el diseño y la distribución de las celdas de forma que beneficie al máximo al equipo en cuanto a restricciones y ofrezca el mayor rendimiento posible desde el punto de vista de la ingeniería.
- Se debe realizar una propuesta de diseño de la refrigeración con simulaciones que verifiquen su correcto funcionamiento.
- Se busca fiabilidad antes que competitividad, dado que el objetivo principal del equipo es poder puntuar en todas las pruebas de la competición.
- La batería ha de caber en el espacio dado por el departamento de mecánica, visto en la Figura 4.4 Croquis con las dimensiones en cm disponibles para la caja de adjunta en el 4.1.2. Propuestas de diseño y valoración de estas.
- El proyecto debe tener un bajo coste económico para poder destinar recursos a otros apartados del monoplaza que los requieran. Priorizando la obtención de material mediante el patrocinio de distintas empresas.

- No se plantea el uso de frenada regenerativa, por lo que se va a tener que optar por una autonomía elevada.

### **2.1.2. Objetivos y especificaciones técnicas**

En vista de las restricciones y teniendo en cuenta tanto las necesidades del equipo como del proyecto se han definido una serie de objetivos:

- Estudiar la demanda energética de un vehículo y diseñar la distribución de celdas.

El objetivo de este estudio es dimensionar completamente el paquete de baterías, incluyendo la elección de celdas y los cálculos de potencia suministrada, voltaje, intensidad y número de celdas, finalizando con la obtención de la potencia disipada de la batería, es decir las pérdidas en forma de calor, estas se realizarán mediante cálculos teóricos.

- Estudiar y realizar una aproximación teórica de sistema de refrigeración.

Este objetivo trata sobre realizar un estudio para obtener un punto de partida desde donde empezar a diseñar la refrigeración, es decir obtener las temperaturas máximas internas sin que haya ningún sistema activo, para cumplir este objetivo, se realizará un estudio detallado de la mecánica de fluidos, posteriormente se realizarán cálculos teóricos para obtener una primera aproximación de la velocidad necesaria para refrigerar estas.

- Identificación y mejora de puntos críticos usando las simulaciones numéricas.

En este objetivo se busca corroborar los datos teóricos obtenidos y optimizar el sistema de refrigeración, para cumplir con este objetivo se realizarán diferentes iteraciones con se utilizarán programas de simulación para identificar los puntos más críticos en el sistema de refrigeración, en donde se realizarán múltiples iteraciones de diseño basadas en los resultados de las simulaciones para encontrar la solución más eficaz.

- Diseño del sistema de refrigeración activa que cumpla con las restricciones impuestas.

Se busca realizar un diseño del sistema de refrigeración activa para la batería, para que estas cumplan con la normativa, es decir que las celdas estén a una temperatura menor a 60°C, para realizar este objetivo se diseñará una distribución del flujo de aire que optimice la refrigeración sin afectar negativamente el rendimiento del coche, también se seleccionarán componentes y materiales que mantengan el peso del sistema de refrigeración al mínimo y en caso de ser

necesario, se utilizarán materiales con alta conductividad térmica para mejorar la eficiencia de la refrigeración.

### 2.1.3. Voltcat-24

El Voltcat-24, es el monoplaza eléctrico de la temporada 2023-2024, del equipo TCMs TecnoCampus Motorsports, concretamente su primer monoplaza, el cual está destinado a competir a principios de agosto en la competición Formula Student Spain [4], situada en Montmeló, Barcelona, y en septiembre, en la competición formula Student Portugal [5] situada en Castelo Branco.

Una vez introducido el monoplaza, se procede a describir sus características, como bien se ha mencionado, este es un monoplaza eléctrico con 1 motor, paquete aerodinámico completo, es decir alerón delantero, alerón trasero y pontones, Respecto al peso, este va a pesar 305 kg sin contar al piloto, siguiendo con la potencia del monoplaza, este tendrá una potencia máxima aproximada de 76 kW y una velocidad promedio de 70 km/h, finalmente este no va a llevar frenada regenerativa, es decir, que no va a recuperar energía al frenar. En la Figura 2.1, se observa el modelo en 3D del diseño del Voltcat-24.



Figura 2.1 Diseño 3D del monoplaza Voltcat-24 [3]

## **2.2. Estudio de la normativa y patentes**

En el siguiente apartado se profundiza en el estudio de la normativa marcada por la competición sobre las baterías y su refrigeración, a su vez se comentan las patentes relevantes para el diseño encontradas, su correspondiente legislación y la conclusión que se ha extraído del estudio de la normativa y las patentes.

### **2.2.1. Estudio de la normativa referente a las baterías y refrigeración**

La competición de la Formula Student, se rige por una normativa, la cual es escrita y cambiada cada año por la organización, cuyo objetivo es restringir, normalizar y proteger tanto a la competición como sus participantes.

Cada competición se tiene su propia normativa, la cual difiere un poco de las demás, aun así, la gran mayoría de estas diferencias en las normativas son mínimas y comparten gran parte de las normas.

Para poder seguir una pauta, se deberá establecer una normativa de una competición, así que, luego de haber revisado las normativas de las diferentes competiciones, se decide seguir la normativa de la competición de Alemania del año 2024 [6], dado que esta es la normativa más restrictiva que actualmente existe, se ha observado también que otras competiciones como la Formula Student de España, usan versiones anteriores de esta.

Es decir, se prefiere basar el proyecto en la normativa más exigente para poder cumplir todas las otras, ya que como se ha visto en otros países, suelen ser más laxas y cumpliendo la más restrictiva que es la de Alemania el equipo será competitivo en todas las competiciones en las que participe.

Una vez establecida la versión a seguir, se procederá a observar cuales son las normas que afectan directamente a este proyecto, viendo como hay un apartado entero enfocado al almacenamiento de energía del Sistema de Tracción, es decir a las baterías y su paquete, concretamente el conjunto de normas EV.5.

No sin antes mencionar las normas que no están comprendidas en la EV5. Siendo estas las siguientes:

## EV 2.2 Limitación de potencia:

- EV 2.2.1 La potencia del sistema de tracción de la salida del TSAC no debe superar los 80 KW.
- EV 2.2.2 La regeneración de energía está permitida y sin restricciones.

## EV 4 Sistema de tracción:

- EV 4.1.1 La tensión máxima permitida entre dos conexiones eléctricas cualesquiera son de 600 VCC y, para las señales de control internas de baja potencia del controlador/inversor del motor, de 630 VCC.

Donde en el primer subapartado, el EV 5.1 se basa en definir los conceptos siguientes:

- Celda: es una celda de Batería o un supercondensador.
- Energía de la celda: es el voltaje máximo de la celda multiplicado por la capacidad nominal de esta.
- Acumulador del Sistema de Tracción (TSA): es el conjunto de celdas que almacenan la energía del sistema de tracción.
- Caja del acumulador del Sistema de Tracción (TSAC): es el contenedor que contiene el Acumulador del sistema de Tracción.
- Segmentos del Acumulador del Sistema de Tracción: son las Subdivisiones del TSA.

En el Apartado EV.2 Dictamina que tipo de celdas se pueden usar, permitiendo el uso de todo tipo de celdas exceptuando las celdas de sales fundidas y las térmicas, así como las de combustible.

A continuación, se estudiará y presentará en una tabla, las diferentes normas que afectan al proyecto, de los apartados EV 5.3, EV 5.4 y EV 5.5

Norma	Descripción
EV 5.3.1	Todas las celdas que almacenan la energía TS deben estar encerradas en el TSAC(s).
EV 5.3.2	Cada segmento del acumulador TS no debe superar una tensión estática máxima de 120 VCC, una energía máxima de 6 MJ, y una masa máxima de 12 kg.
EV 5.3.4	Las células de repuesto deben almacenarse en un contenedor aislado eléctricamente y fabricado con material ignífugo.

EV 5.3.6	Debe ser posible abrir el TSAC para la inspección técnica.
EV 5.4.1	Si el TSAC está fabricado con un material conductor de la electricidad, la barrera aislante debe estar adecuadamente protegida contra las penetraciones conductoras.
EV 5.4.5	Los tapones de mantenimiento deben: No requiere herramientas para separar los segmentos del acumulador TS. Ser no conductor en superficies que no proporcionen ninguna conexión eléctrica. Estar diseñados de forma que sea físicamente imposible conectarlos eléctricamente de otra manera que no sea la configuración prevista en el diseño. Estar protegido contra la reconexión accidental. Estar diseñados de forma que sea claramente visible si la conexión está abierta o cerrada. No deben utilizarse interruptores controlados eléctricamente.
EV 5.4.6	Cada segmento del TSAC debe aislarse eléctricamente mediante el uso de material rígido e ignífugo adecuado, entre los segmentos y en la parte superior del segmento para evitar los relámpagos de arco causados por el contacto entre segmentos o por piezas/herramientas que caigan accidentalmente en el TSAC durante el mantenimiento.
EV 5.5.1	Todos los TSAC deberán estar situados y fijados a la estructura principal o a cualquier estructura adicional fijada a la estructura principal que cumpla las especificaciones mínimas para estructuras de impacto, a una altura no superior a la parte superior de la estructura de impacto.
EV 5.5.2	El (los) TSAC debe(n) estar protegido(s) contra impactos, y debe(n) seguir T3.16 cuando tenga(n) fijaciones atornilladas. El TSAC no debe formar parte de esta estructura.
EV 5.5.4	El (los) TSAC debe(n) estar construido(s) en acero o aluminio. Con los siguientes requisitos: El fondo del TSAC debe tener un grosor mínimo de 1,25 mm si es de acero o de 3,2 mm si es de aluminio. Las paredes verticales internas y externas, las cubiertas y las tapas deben tener un grosor mínimo de 0,9 mm si son de acero o de 2,3 mm si son de aluminio.

EV 5.5.6	El TSAC debe constar de paredes verticales internas eléctricamente aislantes con un mínimo del 75 % de la altura de las paredes verticales externas, que dividan el TSAC en secciones de un máximo de 12 kg. Estas paredes no deben dividir ningún segmento del acumulador.
EV 5.5.14	Los orificios, tanto internos como externos, en el TSAC, sólo están permitidos para el mazo de cables, la ventilación, la refrigeración o las fijaciones. El TSAC debe seguir cumpliendo todas las demás normas, especialmente las relativas a sus requisitos estructurales. El área total de recorte debe ser inferior al 25 % de la pared individual respectiva.
EV 5.5.15	Las aberturas exteriores del TSAC o de los conductos montados no deben apuntar hacia el conductor o el operador del carro de mano del acumulador, aunque haya un cortafuegos, véase T4.8, entre ambos. Los conductos y su montaje deben ser ignífugos, véase T1.2.1, y estar debidamente sellados.
EV 5.5.17	Todo TSAC que pueda evacuar un gas explosivo debe disponer de un sistema de ventilación que impida que el gas evacuado alcance una concentración explosiva.
EV 5.5.18	Todo TSAC que esté completamente sellado debe disponer también de una válvula de alivio de presión para evitar una presión elevada en el TSAC.

Tabla 2.1 Normativa referente a la refrigeración

Teniendo en cuenta que la EV 5.3 trata sobre los requisitos Generales del TSA y el TSAC, el EV 5.4 trata sobre la configuración eléctrica, y finalmente la EV 5.5 trata sobre las características y configuración mecánica del TSAC.

### **2.2.2. Patentes**

Empezando el apartado con las patentes ya existentes, se ha realizado una búsqueda de patentes similares al objetivo del proyecto, para ver si estas pueden ayudar en el desarrollo del diseño de la refrigeración, se ha encontrado que en gran parte estas hacen referencia al uso de PCM (Phase change materials) en el sistema de refrigeración, como las patentes KR102120157B1 [7] y CN111312954A [8].

También se han encontrado algunas que proponen el uso de grafito como material conductor para mejorar la conducción térmica del sistema de refrigeración, como la patente US9196939B2 [9] la cual propone el uso de un sustrato flexible y una o más capas de grafeno dispuestas en la sustrato como material para el intercambiador de calor, construyendo el sustrato y la capa de grafeno de tal manera que se establecen múltiples rutas de transferencia de calor, cada una de las cuales define diferentes niveles de conductividad térmica pudiendo regular la temperatura de las celdas.

Una vez vistas las patentes existentes, se realiza un análisis legislativo de las patentes, estas forman parte de la Propiedad Industrial, que incluyen tanto las patentes, como Marcas, diseños industriales, Nombres comerciales y otros conceptos. Esta propiedad, es muy importante dado que estas están contempladas por la legislación, teniendo esta diferentes derechos y restricciones.

Respecto al concepto de que es una patente, una patente es un título que aporta al propietario los derechos de poder explotar exclusivamente una determinada invención, ya sea un método de producción o un producto, impidiendo así la fabricación o una venta sin el consentimiento del propietario de esa patente.

Cabe mencionar que una patente solamente autoriza al usuario a fabricar o vender su producto, si este respeta las normas legales pertinentes, es decir, no exime de cumplir con las leyes de fabricación u comercialización del país o región en la que se esté produciendo o comercializando este.

Concluyendo que, aún que, en este proyecto, al ser un producto no comercial, puede usar patentes ya existentes, estas no acaban de resultar útiles debido a su complejidad y coste, así que no se usará ninguna patente ya existente para desarrollar el sistema de refrigeración.

## **2.3. Estudio y análisis de las pruebas de la competición**

En el siguiente apartado se detallan y analizan en profundidad las diferentes pruebas que conforman la competición, abarcando desde las pruebas estáticas, como el Business Plan, hasta las pruebas dinámicas, como la Endurance.

### **2.3.1. Estudio de las diferentes pruebas**

Todas las competiciones de Formula Student se basan en dos tipos diferentes de pruebas, los eventos estáticos y los eventos dinámicos.

Los eventos estáticos se dividen en tres acontecimientos diferentes: El evento de presentación del plan de empresa, donde se expone tanto el Business Plan como el Marketing Plan, el Cost and Manufacturing, un evento que se basa en el análisis de costes del proyecto, donde valoran el coste y la fabricación del monoplaça, beneficiando los equipos que fabriquen su monoplaça, y finalmente el evento de diseño de ingeniería, donde se analiza el diseño, teniendo en cuenta sus especificaciones y rendimiento.

Los eventos dinámicos, por su parte se dividen en cuatro eventos distintos descritos a continuación.

Primeramente, el Skippad una prueba que se basa en un circuito en forma de 8 en el cual el monoplaça realizará el recorrido mencionado en la norma D 4.2.5 [6] la cual dice lo siguiente: el vehículo entrará perpendicular a la figura de ocho y dará una vuelta completa en el círculo derecho para establecer el giro. La vuelta siguiente se efectuará en el círculo derecho y será cronometrada. Inmediatamente después de la segunda vuelta, el vehículo entrará en el círculo de la izquierda para dar la tercera vuelta. La cuarta vuelta se efectuará en el círculo de la izquierda y será cronometrada. Inmediatamente después de terminar la cuarta vuelta, el vehículo saldrá de la pista perpendicular a la figura de ocho y moviéndose en la misma dirección en la que entró. Esta prueba tiene dos intentos hechos por el mismo conductor, y se puntuará en función del tiempo en que se tarde en realizar esta prueba.

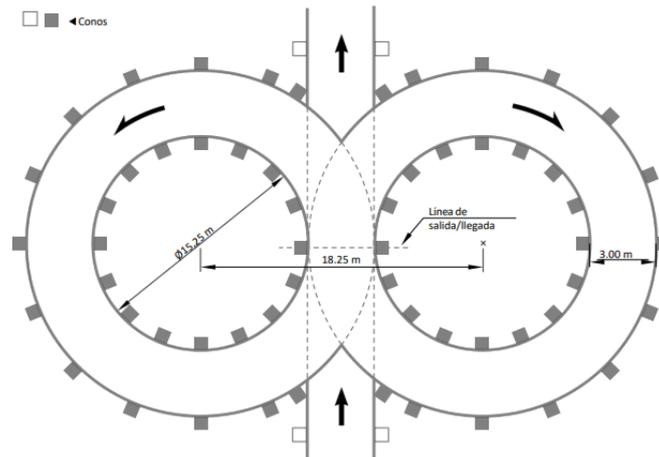


Figura 2.2 Esquema del circuito en ocho del Skippad.

Fuente: [6]

La siguiente prueba es la prueba de aceleración, la cual consiste en una recta de 75 metros donde el vehículo va a acelerar constantemente hasta llegar a la meta, es decir, hasta la línea de los 75 metros, cada equipo tendrá 2 intentos, y los podrá hacer uno detrás de otro, y solamente la va a poder realizar un piloto, respecto a la puntuación, esta irá en función del tiempo de prueba, que será el mejor tiempo que el equipo haya conseguido en los 2 intentos.

Continuando con el Autocross, el cual consiste en un circuito con diferentes secciones, como slaloms, curvas muy cerradas y curvas rápidas, de aproximadamente 1,51km. El objetivo de esta prueba es probar la habilidad del piloto junto con las especificaciones del vehículo, buscando el límite de ambos. Respecto al procedimiento de esta, cada equipo cuenta con dos pilotos y cuatro intentos, dos intentos por piloto, y el puntaje se determina en función del mejor tiempo que hagan entre los 4 intentos.

Finalmente, se encuentra la Endurance y Efficiency, una prueba similar al autocross con el objetivo de puntuar la autonomía i eficiencia del vehículo, esta prueba consta de un circuito con unas especificaciones muy similares al autocross con la única diferencia de que el circuito mide aproximadamente 1km y la prueba se completa al haber hecho 22km es decir 22 vueltas al circuito. En este caso, solo hay un intento para cada equipo, y este intento se realizará con 2 conductores distintos, el primero hará 11km y cuando acaben estos 11km, este se dirigirá al área de cambio de piloto, para que este segundo cambie, este cambio tiene una duración máxima de 3 minutos, en los cuales se deberán acomodar los pedales para el segundo conductor, desconectar y conectar el vehículo y si es necesario, cambiar de neumáticos.

Una vez realizado el cambio, el piloto seguirá con la prueba 11km y al finalizar, se desconectará el vehículo y se medirá la energía restante. De esta manera, mientras en la Endurance se puntuará en función del tiempo de prueba, en la Efficiency se puntuará en función de la energía usada.

### **2.3.2. Análisis de pruebas**

En lo referente a las pruebas estáticas, aunque son importantes para el equipo, no se van a tener en cuenta, debido a que estas no son tan relevantes para el desarrollo del trabajo. La única de estas pruebas estáticas que se podrían considerar para el estudio sería el Cost and Manufacturing, en dónde el diseño propio de la refrigeración podría añadir un valor añadido al proyecto y conseguiría una buena puntuación para el equipo debido a su bajo coste de producción.

Respecto a las pruebas dinámicas, el circuito va a permitir que el monoplaza ofrezca el mayor rendimiento posible, colaborando con todas las otras partes de este. Tendrá un impacto mayor en dos de las pruebas, que son las que más carga van a generar en las baterías, estas pruebas van a ser, la prueba de aceleración, en la cual se está acelerando constantemente teniendo un consumo máximo y fijo y la otra será la Endurance, donde al ser una prueba de resistencia, las baterías al tener un consumo constante, estas producen calor.

Respecto a los datos importantes, estos van a ser:

- Prueba de aceleración
  - 75 m
  - Potencia máxima permitida
- Prueba de Endurance
  - 1 km
  - 22 km en total
  - 2 arrancadas en frío

## 2.4. Estudio de capacidad y potencia necesarias

Para realizar el siguiente estudio, se va a usar el repositorio del equipo de Formula Student TCMS en el que se dispone del diseño anterior de las baterías, en donde se realizan los cálculos de capacidad y potencia requeridas.

Respecto a la potencia requerida, esta viene determinada por la normativa de la Formula Student Germany [6], la cual restringe la potencia máxima que salga de la batería en 80kW concretamente, es la norma EV 2.2.1 La potencia del sistema de tracción de la salida del TSAC no debe superar los 80 kW.

Respecto a la capacidad demandada, para calcular esta se deberá saber qué tipo de celda se va a utilizar, aun así, se va a utilizar el repositorio del equipo, concretamente el TFG del integrante Gabriel de la Ossa Vila, con su proyecto “Disseny d'un BMS per a un monoplaça elèctric de FSAE” [10], en el que realiza un estudio basado en el Trabajo “Design of a Battery Pack for a Formula SAE Racing Car” [11], el cual estudia las baterías del equipo “Squadra Course Polito”, presentando un estudio del consumo de varios equipos durante la prueba de la Endurance en 2018, siendo el consumo medio por vuelta de este equipo de 269 Wh con un máximo de 321,4 Wh en la vuelta rápida.

También se ha realizado una tabla con los datos de los mejores equipos, junto con el de Squadra Course Pollito, la cual es la siguiente:

Nombre del equipo	Resultado de competición	Tiempo medio de vuelta (s)	Consumo medio por vuelta (Wh)	Consumo total 22 vueltas (Wh)
Universitat Stuttgart	1	65,80	402	8844
DHDW Stuttgart	2	68,20	410	9020
NTNU Trondheim	3	68,61	428	9416
OTH Amberg-Weiden	4	68,67	426	9372
DHBW Ravensburg	5	69,28	380	8360
TU Bergakademie Freiberg	6	70,98	362	7964
TU Eindhoven TU	7	71,98	393	8646
TU Chalmers	8	72,88	433	9526
Squadra corse polito	13	77,24	269	5918

Tabla 2.2 Consumos de los diferentes vehículos de la FSAE Spain en 2018

Fuente: Elaboración propia modificada de [10]

Como se puede observar en la Tabla 2.2 , los consumos de los diferentes equipos, se ha determinado que se debería buscar una capacidad máxima de 8870 Wh, que es la media de potencias usadas por los diferentes equipos sin contar con el equipo de Squadra corse polito, el cual es un valor que se aleja mucho de las capacidades de los otros equipos.

### 3. Introducción a la Termodinámica

En este apartado se profundiza en la teoría de la termodinámica y la mecánica de fluidos, a su vez se estudia el funcionamiento de la dinámica de fluidos computacional para introducir la temática para el siguiente apartado del estudio de los diferentes sistemas de disipación de calor.

#### 3.1. Teoría de la mecánica de fluidos

Empezando por la Teoría de la mecánica de fluidos, donde se trata de las ecuaciones de Navier-Stokes, tipos de transferencia de calor y el funcionamiento de la dinámica de fluidos computacional

##### 3.1.1. Introducción a la mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos es un ámbito fundamental de la física y la ingeniería que se centra en el estudio del comportamiento de los fluidos, que incluyen líquidos, gases y plasmas. Esta disciplina examina cómo los fluidos se comportan bajo la influencia de fuerzas externas, cómo fluyen y cómo interactúan con su entorno. Para entender estos fenómenos, la mecánica de fluidos se basa en principios físicos y matemáticos, utilizando ecuaciones diferenciales para describir y predecir el comportamiento de los fluidos en diversas situaciones.

Las ecuaciones fundamentales en mecánica de fluidos, conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes, establecen la relación entre las fuerzas que actúan sobre un fluido y los cambios resultantes en sus propiedades, como la velocidad, la presión, la densidad y la temperatura. Estas ecuaciones son la base para el análisis de una amplia gama de fenómenos, desde el flujo de aire alrededor de un avión hasta el movimiento de los océanos y la atmósfera terrestre.

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) &= 0 \\ \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla (\rho \mathbf{u}) &= \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{f} \\ \frac{\partial E_t}{\partial t} + \nabla \cdot (E_t \mathbf{u}) &= \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{q}\end{aligned}$$

Figura 3.1 Ecuaciones de Navier-Stokes en forma vectorial simplificada [12]

Por otro lado, la transferencia de calor es otro campo importante de la física que se ocupa del movimiento de la energía térmica entre sistemas. La transferencia de calor abarca una variedad de procesos, incluida la conducción, la convección, la radiación y los cambios de fase. Estos procesos son fundamentales en una amplia gama de aplicaciones, desde el diseño de sistemas de calefacción y refrigeración hasta la ingeniería de dispositivos electrónicos y la comprensión de fenómenos naturales como el clima y la formación de nubes.

La conducción térmica implica la transferencia de calor a través de un medio sólido, como un material conductor. La convección térmica, por otro lado, implica el movimiento de un fluido y la transferencia de calor asociada con ese movimiento. La radiación térmica se refiere a la transferencia de calor a través de ondas electromagnéticas y es un fenómeno importante en la transferencia de calor en el espacio y en la Tierra. Los cambios de fase, como la evaporación, la condensación y la solidificación, también están involucrados en la transferencia de calor y son cruciales para comprender una variedad de procesos físicos y naturales.

### **3.1.2. Funcionamiento de la dinámica de fluidos computacional (CFD)**

Las ecuaciones de Navier-Stokes representan las leyes más generales para el flujo de fluidos. Sin embargo, debido a su complejidad, solo se pueden obtener soluciones exactas en los casos más simples.

En esta parte es donde la computación y el análisis numérico entran en escena, mediante el CFD, este realiza aproximaciones numéricas, las cuales convierten las ecuaciones diferenciales de Navier en sistemas de ecuaciones lineales, mediante las cuales se obtienen valores como las velocidades, presiones y temperaturas en un número finito de puntos.

Es cierto que los métodos numéricos para aproximar soluciones de diferentes ecuaciones diferenciales existen desde hace tiempo, gracias a los ordenadores, que pueden guardar datos y realizar operaciones rápidas, han hecho que estas sean la herramienta por excelencia para usarlos, limitada por la potencia computacional disponible.

El análisis de CFD permite modelar fluidos debido a su versatilidad para resolver numéricamente ecuaciones de estado y comportamiento físico expresadas en forma diferencial o explícita. Además, los análisis de modelado de CFD en problemas de transferencia de calor son bastante relevantes, y cualquier herramienta de simulación competente incluye módulos para calcular distribuciones de temperatura junto con presiones y velocidades. Algunas

aplicaciones también pueden incluir análisis de sólidos para deformación elástica o reacciones químicas, entre otras aplicaciones no relacionadas con fluidos.

Algunos de los usos más típicos del CFD son las simulaciones de flujo a través de tuberías y accesorios como válvulas y reducciones, para predecir caídas de presión, velocidades y formación de vórtices, o la aerodinámica de vehículos, tanto automóviles como aeronaves, prediciendo el arrastre, la sustentación y la fuerza descendente.

### **3.1.3. Proceso de creación de una simulación de CFD**

Para poder realizar una simulación mediante un programa de análisis CFD, se deben realizar las siguientes tareas:

Primeramente, se define el problema sobre una geometría cerrada, el interior de esta geometría es lo que se llama dominio, mientras las caras externas de la geometría son su límite.

Seguidamente, la geometría del dominio se divide en pequeñas formas básicas conocidas como celdas y el conjunto de estas es la malla. El tamaño de las celdas determinará la precisión de la solución, cuanto más pequeñas sean las celdas, más precisa será la solución, pero el número de celdas utilizado definirá la demanda de memoria de la computadora, haciendo como a mayor número de celdas, mayor serán los recursos que se deban invertir para calcular la solución.

Luego se determinarán los valores iniciales y los valores en los límites o superficies conocidas, que suele incluir datos como presiones, velocidades de flujo, paredes, temperaturas y fuentes de calor, incluyendo los modelos, que determinan que sistemas de ecuaciones usarán el programa.

Una vez introducidos estos valores, se deberán configurar los datos y gráficos que se quieran obtener en el programa, y determinar los parámetros temporales de la solución, para finalmente realizar la simulación y obtener los resultados.

### **3.1.4. Tipos de transferencia de calor y sus aplicaciones**

La transferencia de calor es un proceso fundamental en la ingeniería térmica, ya que involucra el intercambio de energía térmica entre diferentes sistemas o partes de un sistema. Existen tres mecanismos principales de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Cada uno de estos mecanismos tiene características y aplicaciones específicas que son cruciales para el diseño y la optimización de sistemas de refrigeración.

Empezando con la conducción, esta es el proceso de transferencia de calor a través de un material sólido o entre materiales en contacto directo, debido a la vibración y colisión de moléculas y electrones. Este tipo de transferencia de calor se rige por la Ley de Fourier, que establece que la tasa de transferencia de calor es proporcional al gradiente de temperatura y al área a través de la cual se transfiere el calor, e inversamente proporcional a la distancia de transferencia. La Ley de Fourier expresa que:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

Donde:

- $q$  es la tasa de transferencia de calor (W).
- $k$  es la conductividad térmica del material (W/m·K).
- $A$  es el área de la sección transversal (m<sup>2</sup>).
- $dT/dx$  es el gradiente de temperatura (K/m).

Este tipo de transferencias suele ser la predominante en componentes sólidos como disipadores de calor y paredes de contenedores en sistemas de refrigeración.

Continuando con la convección, la cual es la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido en movimiento (líquido o gas) que se encuentra en contacto con esa superficie. La convección puede ser natural o forzada. La convección natural ocurre debido a las diferencias de densidad dentro del fluido causadas por variaciones de temperatura, mientras que la convección forzada es inducida por medios externos, como ventiladores o bombas.

La tasa de transferencia de calor por convección se describe mediante la Ley de Enfriamiento de Newton, que dice lo siguiente:

$$q = h * A * (T_s - T_\infty) \quad (3.2)$$

Donde:

- $q$  es la tasa de transferencia de calor (W).
- $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m<sup>2</sup>·K)
- $A$  es el área de la superficie (m<sup>2</sup>).

- $T_s$  es la temperatura de la superficie (K).
- $T_\infty$  es la temperatura del fluido lejos de la superficie (K).

Este tipo de transferencia está presente en los sistemas de refrigeración activa, donde un flujo de un fluido es utilizado para disipar el calor de objetos, como componentes electrónicos o baterías.

Finalizando con la radiación, que es la transferencia de calor en forma de ondas electromagnéticas, principalmente en el rango del infrarrojo. Todos los cuerpos emiten radiación térmica en función de su temperatura. La energía radiada por un cuerpo negro (un emisor ideal) se describe mediante la Ley de Stefan-Boltzmann, la cual dice lo siguiente:

$$q = \sigma * \epsilon * A * T^4 \quad (3.3)$$

Donde:

- $q$  es la tasa de transferencia de calor por radiación (W),
- $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ),
- $\epsilon$  es la emisividad del material (adimensional, varía de 0 a 1)
- $A$  es el área de la superficie ( $\text{m}^2$ )
- $T$  es la temperatura absoluta de la superficie (K)

Este tipo de transferencia está presente en situaciones donde hay grandes diferencias de temperatura y es una consideración importante en el diseño de sistemas que operan en entornos con alta exposición solar o en el espacio.

### **3.2. Estudio del funcionamiento de las baterías y sus diferentes sistemas de disipación de calor**

Actualmente existen diversos métodos para realizar el sistema de gestión térmica de una batería, estos se pueden clasificar de varias formas, dependiendo de qué criterio se esté siguiendo.

Primeramente, para contextualizar de donde viene la pérdida de calor en una batería, esta viene dada por el efecto joule, el cual actúa mediante la siguiente fórmula:

$$P = R * I^2 \quad (3.4)$$

Donde:

- P es la potencia del componente (W)
- R es la resistencia del componente ( $\Omega$ )
- I es la Intensidad que pasa por el componente (A)

Observando como a mayor intensidad o resistencia, mayor potencia se disipa.

Se procede a estudiar cuales son los diferentes métodos para la gestión térmica de estas, los cuales en términos generales se dividen en estos tres grandes bloques:

- Sistema de refrigeración basados en el aire como fluido
- Sistemas de refrigeración basados en el líquido como fluido
- Sistemas de refrigeración basados en el cambio de fase de materiales como refrigerante

Empezando por el aire, este sistema es la vía menos compleja para realizar el sistema de refrigeración, basándose este en hacer pasar el aire del entorno dentro de las cavidades que quedan entre las celdas, haciendo que haya una transmisión de calor entre estos. Este sistema si bien es cierto que es el más sencillo de implementar, no es el más efectivo como sistema de refrigeración, dadas las propiedades térmicas del aire y su poca homogeneidad, es decir, que las celdas están temperaturas distintas, pero sí que es el sistema más ligero.

Estos sistemas se pueden dividir en dos tipos:

- Refrigeración pasiva, donde no hay ningún actuador del circuito, es decir, el aire entra directamente a velocidad y temperatura ambiente.
- Refrigeración activa, en el que se puede encontrar diversos actuadores, como ventiladores e intercambiadores de calor, que modifican tanto el caudal como la temperatura del aire para que este realice una mejor transferencia.

A continuación, se encuentra la refrigeración por líquido, la cual se basa en utilizar las propiedades térmicas de algunos líquidos, como el Agua y el aceite, las cuales son mejores que el aire para realizar el intercambio de calor. Hay diferentes métodos o implementaciones de uso de la refrigeración por líquido los cuales se dividen principalmente en dos:

- El primer método consiste en envolver los módulos con una camisa, chaqueta o envoltorio para que el fluido pueda pasar por esta, este método se suele utilizar si tu fluido conduce la electricidad, evitando así el contacto directo del fluido con los bornes de la batería, evitando así un cortocircuito.
- El segundo método consiste en inundar las baterías con un líquido dieléctrico, es decir, un líquido con una alta resistencia a la conducción, como por ejemplo el aceite, para que este realice la transferencia de calor, este método en específico es más costoso y pesado, dado que el aceite tiene una mayor viscosidad, provocando que requieras una bomba con un peso y coste mayor al anterior, la ventaja de este respecto al anterior es que este método no puede crear un cortocircuito, haciéndolo más seguro.

Respecto a los problemas que la refrigeración líquida pueda tener, estos principalmente se basan en su peso, el cual es mucho mayor al caso anterior, su coste económico, que también es mayor, y su seguridad, ya que en este tipo siempre se deberá sellar herméticamente la caja de baterías, provocando que, si en algún momento se produce una fuga, esta pueda generar un cortocircuito. De cara a los beneficios, este sistema, aun siendo más caro y pesado, es mucho más efectivo que el primero, dado que, como bien se ha mencionado anteriormente, los líquidos tienen una conductividad térmica y un calor específico mucho mayor al del aire, a parte, este sistema permite mantener una temperatura uniforme en toda la batería.

Finalmente, se encuentra el ultimo tipo de sistema, el PCM o “Phase Change Materials” estos funcionan mediante el cambio de fase de estado gaseoso a líquido, que durante este cambio el material en cuestión absorbe una gran cantidad de calor con un incremento de temperatura muy bajo, usando esta propiedad para mantener la temperatura de las baterías bajo control. El mayor problema del PCM es que estos solo pueden almacenar calor, requiriendo de otros sistemas activos como soporte para que estos puedan disipar el calor.

## **4. Dimensionamiento electrónico del paquete de baterías**

En el siguiente apartado se detallará el proceso de selección y análisis de las baterías. Este proceso incluye la identificación de las necesidades específicas del proyecto, la evaluación de las diferentes opciones disponibles en el mercado y la realización de pruebas exhaustivas para asegurar que las baterías seleccionadas cumplan con los requisitos de rendimiento, durabilidad y seguridad.

## 4.1. Análisis y selección de baterías

En este apartado se realizará un análisis y la posterior elección de una celda comercial para posteriormente realizar el diseño de la batería principal del monoplaza.

### 4.1.1. Estudio de las opciones de celda

Primeramente, para empezar con la elección de los sistemas de refrigeración, se tuvo que estudiar uno de los primeros requisitos planteados por el equipo, el patrocinio de Tesla, puesto que, sin el patrocinio de este, no había bastante capital para plantear unas baterías que aparte de ser competitivas, pudieran cumplir las demandas de rendimiento, energía y seguridad del equipo.

Para poder conseguir el patrocinio de Tesla, este organizaba un concurso, en donde se tenía que mandar el diseño completo de la configuración electrónica de un paquete de baterías. Visto lo cual, se propusieron para el concurso de Tesla, 3 propuestas de baterías diferentes:

La primera propuesta, la Molicel INR21700-P45B [14], Tiene un voltaje nominal de 3.6 V y una capacidad de 4500 mAh o 16.2 Wh, esta celda ofrece un rendimiento robusto. Con una corriente de descarga máxima de 45 A y una resistencia interna de 15 m $\Omega$ , es adecuada para aplicaciones que requieren una alta potencia. Con un diámetro de 21.55 mm y una altura de 70.15 mm, esta celda se presenta como una opción compacta y eficiente para varias aplicaciones.

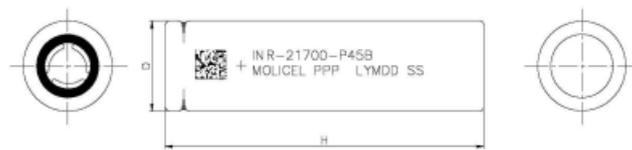


Figura 4.1 Celda INR21700-P45B [14]

La segunda propuesta, la COSMX 95B0D0HD [15], ofrece un voltaje nominal de 3.73 V y una capacidad nominal de 13000 mAh. Con una corriente de descarga máxima de 149.5A y una resistencia interna de 5 m $\Omega$ , esta celda es ideal para situaciones que requieren un alto

rendimiento y una gran capacidad. Con una altura de 130 mm, una anchura de 9.5 mm y una longitud de 110 mm, esta celda ofrece dimensiones versátiles para varias aplicaciones.

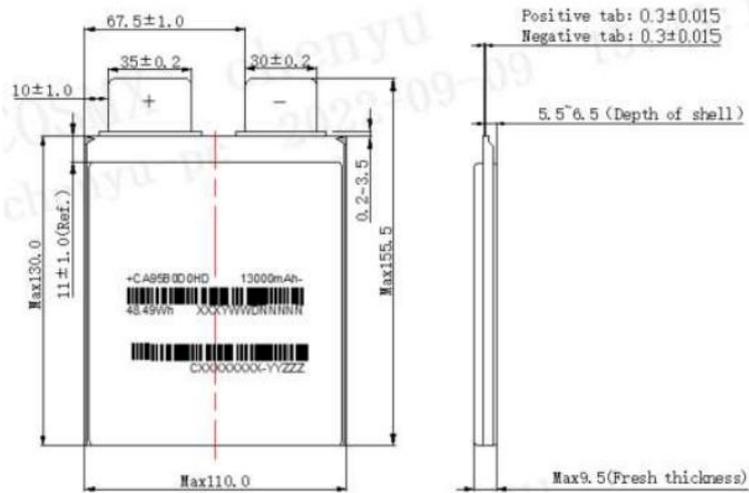


Figura 4.2 Celda COSMX 95B0D0HD [15]

La tercera propuesta, la COSMX 82D6J7 [16], ofrece un voltaje nominal de 3.7 V y una capacidad nominal impresionante de 20000 mAh. Con una corriente de descarga máxima de 400A y una resistencia interna de 5 mΩ, esta celda es perfecta para aplicaciones que requieren un gran almacenamiento de energía y una alta corriente de salida. Con una altura de 187.5 mm, una anchura de 8.2 mm y una longitud de 137 mm, esta celda ofrece un equilibrio entre dimensiones generosas y un rendimiento elevado.

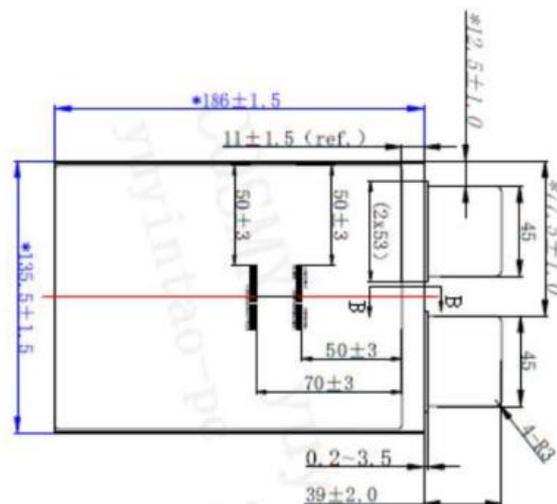


Figura 4.3 Celda COSMX 82D6J7 [16]

#### 4.1.2. Propuestas de diseño y valoración de estas

Una vez vistas las diferentes opciones dadas por Tesla, se realiza un pequeño estudio para determinar la cantidad de celdas necesarias en cada caso, y si en la disposición correspondiente, estas entrarían dentro del espacio de unas dimensiones determinadas en la Figura 4.4, es decir unos 0,035 m<sup>3</sup>, para realizar los cálculos, se ha tenido en cuenta el Voltaje máximo permitido por competición, que es un voltaje de 600V obteniendo las siguientes tres opciones que aparecen en la tabla 4-1 adjuntada en este apartado.

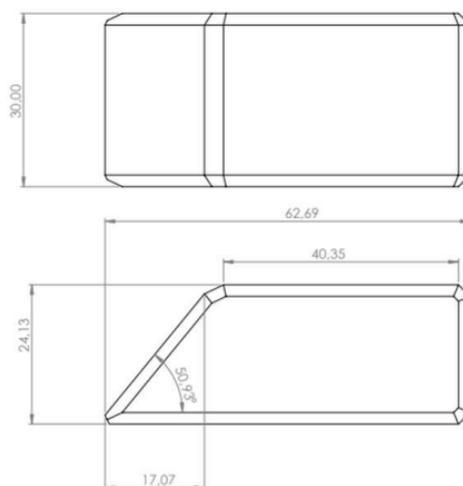


Figura 4.4 Croquis con las dimensiones en cm disponibles para la caja de baterías [3]

	Capacitat cel·la (mAh)	Capacitat cel·la (Wh)	Voltatge màxim (v)	Voltatge nominal (v)	Voltatge mínim (v)	Nombre de cel·les String	Nombre Stings per capacitat desitjada	Nombre Strings Arrodonit	Cel·les finals	Capacitat final (Wh)	Intensitat de descàrrega mínim (A) (Min V)
Opcion 1	4500	16,20	4	3,6	3	150	3,704	4	600	9720	44,444
Opcion 2	13000	46,80	4	3,6	3	150	1,282	1	150	7020	177,778
Opcion 3	20000	72,00	4	3,6	3,1	150	0,833	1	150	10800	172,043

Tabla 4.1 Configuraciones con sus respectivas opciones

En primer lugar, respecto a la primera propuesta, se necesitaría un total de 600 celdas para obtener los 80KW de potencia con una capacidad muy superior a la necesaria, concretamente de 9720 Wh, respecto al espacio, esta opción, con esta configuración, supera el espacio admisible del batería dado por el equipo.

Seguidamente, la opción 2, con un total de 150 celdas, pero en este caso, se obtiene una configuración bastante peor que la primera, puesto que no solo se queda corta con la capacidad, planteando una capacidad de 7020Wh, sino que tampoco cumple con el espacio admisible mencionado anteriormente.

Finalmente, la opción 3, con un total de 150 celdas y una capacidad total de 10800 Wh, cosa que vuelve a superar por bastante la capacidad necesaria, respecto al espacio, se vuelve a tener el mismo problema, haciendo que no sean una opción.

Cómo ninguna de las 3 opciones cumplía con el requisito del espacio, se decide reducir el número de celdas, afectando al Voltaje y capacidad para poder obtener un resultado que quepa dentro del paquete y tenga la suficiente capacidad, esto causa que tanto el rendimiento como la potencia final de la batería sea inferior a la buscada.

Finalmente, se escogió utilizar las celdas de Molicel, es decir, las celdas de la opción 1, debido a que, al ser más pequeñas y versátiles que las otras, resultaría mucho más sencillo cambiar la estructura de las baterías para obtener la mejor solución posible.

### 4.1.3. Explicación de la solución a nivel electrónico

Una vez realizadas varias iteraciones, se obtiene una solución que se adapta tanto en capacidad, como en espacio, la solución final consiste en 4 strings de 120 celdas cada uno, dando un total de 480 celdas, con un Voltaje nominal de 432V y una capacidad de 7.778Wh, como se ha reducido el voltaje, esto también afecta a la intensidad aportada para cada string, provocando que la intensidad pedida sea mayor a la intensidad máxima de la celda, implicando que se requiere de una reducción de potencia, puesto que la celda no es capaz de mantener los 80 KW.

Respecto a la distribución de estas en la caja de baterías, estas estarán distribuidas en 5 paquetes de 96 celdas, es decir, cada paquete de baterías contendrá 24 celdas de cada string, obteniendo la distribución vista en la figura siguiente.

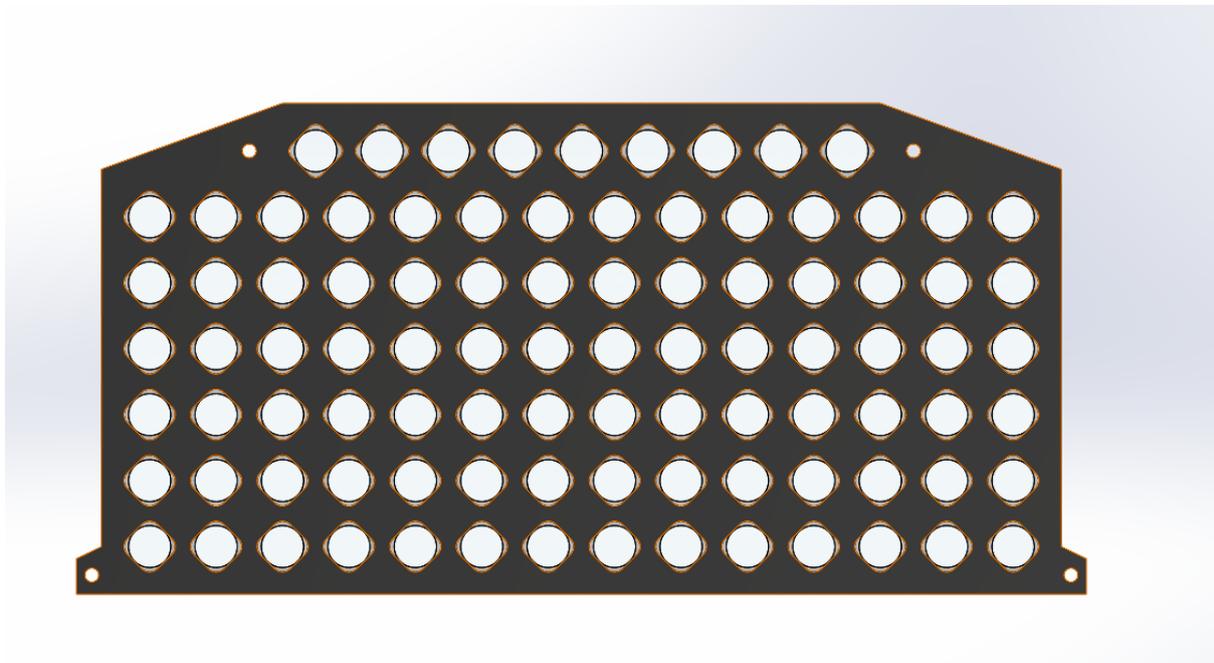


Figura 4.5 Distribución de celdas del paquete de baterías

## 4.2. Cálculo de potencia a disipar

Para empezar a realizar los primeros cálculos y dimensionados del sistema, primero se deberá tener un punto inicial para poder obtener una potencia a disipar, para realizar este punto, se deberá tener en cuenta la prueba más demandante de la competición, la Endurance, para obtener esta potencia, se obtienen los datos del monoplaza presentados en la tabla siguiente:

Concepto	Valor	Unidades
Peso del coche	365	kg
Gravedad	9.81	m/s <sup>2</sup>
Velocidad media (constante)	70	km/h
Fuerza de downforce a 70km/h ( $F_{Df}$ )	1063.67	N
Fuerza de drag a 70km/h ( $F_{Drag}$ )	344.5	N
Coefficiente de fricción de rodadura (dinámico) ( $Cf_{dinamico}$ )	0.05	
Rendimiento del motor	0.86	%
Rendimiento inversor	0.986	%

Tabla 4.2 Datos del monoplaza

Una vez obtenidos estos datos, se procederá a obtener la potencia necesaria para mantener el monoplaza a 70km/h mediante la formula siguiente:

$$P = \frac{((Peso * g) + F_{Df}) * Cf_{dinamico} + F_{Drag} * V_{media}}{R_{motor} * R_{inversor} * 3.6} \quad (4.1)$$

Donde substituyendo en la ecuación 5.6, se obtiene la potencia siguiente:

$$P = \frac{((365 * 9.81) + 1063.67) * 0.05 + 344.5}{0.86 * 0.986} * 70 = 13224.59W$$

Una vez obtenida la potencia necesaria para mantener el vehículo a 70 km/h, se procede a calcular las pérdidas de la batería, es decir la potencia que el sistema disipa en forma de calor, esta potencia se rige por la ley de ohm, la cual propone la siguiente ecuación:

$$P_{perdida} = I^2 * R_{interna} \quad (4.2)$$

Respecto a la resistencia interna de una celda, esta varía en función de la temperatura de esta, haciendo que calcularlo sea bastante complejo, aun así, esta se escogerá usando el valor medio de la diferencia de resistencias internas, provisto en el datasheet de la celda, que es de  $15\text{ m}\Omega$ .

Para poder obtener la intensidad de la batería, esta se rige por la siguiente ecuación.

$$P_{\text{útil}} = V_{\text{celda}} * I \quad (4.3)$$

Considerando que la celda disminuye su voltaje según se descarga, y siendo la batería una fuente de potencia, suministra una potencia fija, la intensidad subirá según el voltaje de la batería baje. Para poder obtener la intensidad, se deberán realizar algunas acciones, así como usar siempre el peor de los casos, en este caso, pasa cuando la batería está en su menor voltaje, donde el voltaje mínimo recomendado de una celda para la salud de esta es de 3V, para obtener el voltaje mínimo de la batería al completo, se tendrá que multiplicar el voltaje por todo el String, componiéndose este de 120 celdas, obteniendo un voltaje total de 360V.

A continuación, sabiendo que la potencia necesaria es de 13224.59W a 360V, y mediante la reorganización y el uso de la ecuación 4-2, se obtienen el siguiente resultado:

$$I = \frac{P_{\text{útil}}}{V_{\text{min}}} = \frac{13224.59\text{W}}{360\text{V}} = 36.73\text{A} \quad (4.4)$$

Obteniendo así la intensidad de la batería al completo, para poder obtener la corriente de cada celda, que asimismo será la corriente del String, se deberá dividir la corriente obtenida, es decir 36.73 A entre los 4 paralelos que tiene la batería, que, al ser los paralelos iguales entre sí, tendrán la misma corriente, resultando está en 9.183 A en cada uno.

Finalmente se realiza el cálculo de la potencia perdida mediante el uso de la ecuación 4.2.

$$P_{\text{perdidacelda}} = 9.183^2\text{A} * 0.015\Omega = 1.26\text{W}$$

Una vez obtenida la potencia disipada de la celda, se procederá a multiplicar este valor por 1.5 a modo de factor de seguridad, sobredimensionando y asegurando el correcto funcionamiento de este, la nueva potencia que se requiere disipar es de 1.89W por cada celda.

A continuación, se multiplicará esta potencia por la cantidad de celdas totales en un paquete, es decir 96 celdas, y las celdas de la batería en su totalidad, siendo estas 480, obteniendo así la

potencia a disipar de cada paquete y de la batería al completo, obteniendo 181 W en cada paquete, y 905 W en toda la batería.

## 5. Distribución geométrica y disipación de potencia

En el siguiente apartado, se llevará a cabo un análisis detallado del cálculo teórico de la disipación de potencia. Además, se presentará de manera exhaustiva la distribución de dicha disipación, proporcionando una comprensión integral de cómo se dispersa la potencia en el sistema.

### 5.1. Presentación de la distribución

Como se ha visto anteriormente en la Figura 4.5 del apartado 4.1.3, la distribución consiste en 14 columnas de 6 filas cada una, finalizando con una fila superior de 9 celdas, la matriz de 6 por 14 colocadas de manera alineada, la cual está representada en la Figura 5.2, vista en el apartado 5.2, mientras que la fila superior, están colocadas de manera escalonada respecto a la matriz anterior. Las dimensiones se pueden observar en la Figura 5.1.

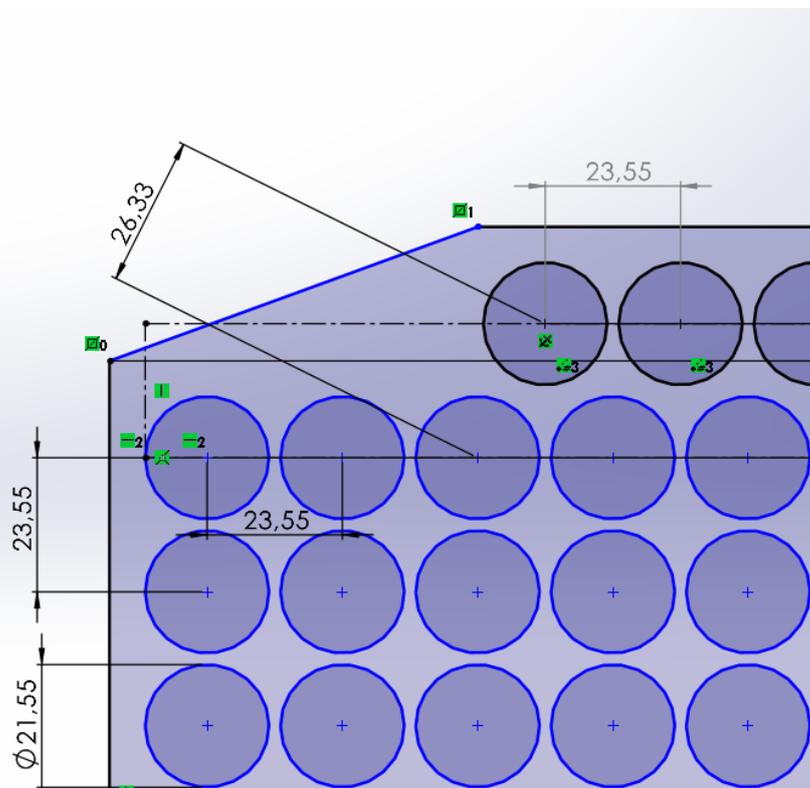


Figura 5.1 distancias y separaciones de las celdas

Donde se obtienen tanto el diámetro de la celda, como la separación de centros, tanto en la matriz, como de la matriz respecto a las celdas superiores, siendo el diámetro de 21,55 mm, la separación entre celdas dentro de la matriz de 23,55 mm tanto vertical como horizontal, y 26,33 la separación del centro de la celda de la matriz respecto al centro de la celda de la fila superior.

## **5.2. Procedimiento del cálculo teórico de la disipación de un paquete**

Para realizar el cálculo de la potencia disipada por el sistema, primero se deberán determinar diferentes factores, el primero de todos es entender si hay algún modelo similar en alguno de los libros de referencia, viendo como realmente, un paquete de baterías, se puede equivaler a un conjunto de tubos refrigerados por convección externa, así que mediante los apuntes del libro Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones [13], se realiza el método de cálculo para estos.

Primeramente, se procede a determinar si el sistema está dispuesto de manera escalonada o alineada, en este caso, será alienada, seguidamente, se procede a obtener los valores del diámetro de la celda (D) el paso transversal ( $S_t$ ) el paso longitudinal ( $S_l$ ) y el paso diagonal ( $S_D$ ), este último se usa solamente en el sistema escalonado, el cual se calculará mediante la siguiente ecuación.

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2}\right)^2} \quad (5.1)$$

En las siguientes dos figuras se pueden observar los dos modelos, el alineado en la Figura 5.2 Configuración alineada, Figura 5.2 Configuración alineada y el escalonado en la Figura 5.3 Configuración escalonada.

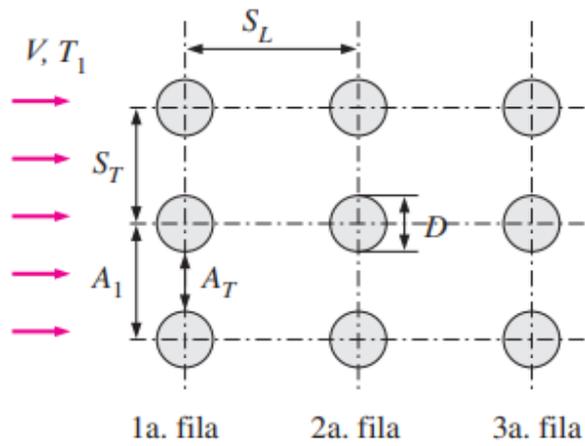


Figura 5.2 Configuración alineada [13]

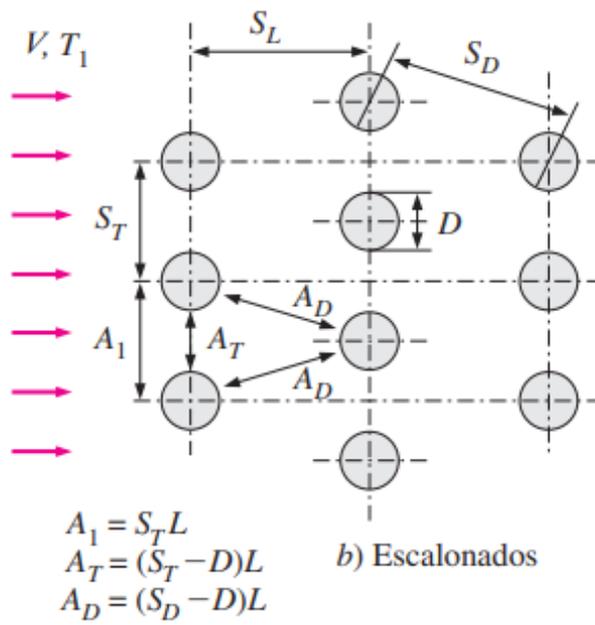


Figura 5.3 Configuración escalonada [13]

Como se puede comprobar también se deben calcular las distancias  $A_1$  y  $A_t$  en los dos casos, y  $A_D$  solamente en el escalonado. Siendo las fórmulas las siguientes.

$$A_1 = S_T * L \quad (5.2)$$

$$A_t = (S_T - D) * L \quad (5.3)$$

$$A_D = (S_D - D) * L \quad (5.4)$$

También se va a necesitar determinar los valores de temperatura en la superficie de la celda ( $T_{sup}$ ), la temperatura del aire de entrada ( $T_{in}$ ) y la temperatura de salida ( $T_{salida}$ ), la cual se va a suponer, la velocidad de entrada del aire ( $V_{in}$ ), la altura de las celdas ( $L$ ), el número de columnas y el número de filas.

Una vez determinadas las temperaturas de entrada y superficie, se deberán buscar las propiedades del aire a las temperaturas tanto, de entrada, como de superficie, concretamente, se van a obtener: densidad ( $\rho$ ), el calor específico ( $C_p$ ), la conductividad térmica ( $K_t$ ), la difusividad térmica ( $\alpha$ ), la viscosidad cinemática ( $\gamma$ ) y el número de Prandtl ( $Pr$ ).

Ahora se deberá calcular la velocidad máxima, la cual se determina de manera diferente en las dos configuraciones, para la configuración alineada, la formula será la siguiente.

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} * V_{in} \quad (5.5)$$

Para la configuración escalonada, se utilizarán dos fórmulas distintas, en caso de que  $2A_D > A_t$ , se utilizará la misma fórmula que la configuración alineada, en caso contrario, se utilizará la siguiente formula.

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} * V \tag{5.6}$$

Seguidamente se calculará el número de Reynolds, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$Re_D = \frac{V_{m\acute{a}x} * D}{\gamma} \tag{5.7}$$

Una vez obtenido el número de Reynolds, se usarán las siguientes tablas para sacar la ecuación para calcular el número de Nusselt promedio para el flujo cruzado sobre bancos de tubos.

**Correlaciones del número de Nusselt para flujo cruzado sobre bancos de tubos, para  $N_L > 16$  y  $0.7 < Pr < 500$  (tomado de Zukauskas, 1987)\***

Configuración	Rango de $Re_D$	Correlación
Alineados	0-100	$Nu_D = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	100-1 000	$Nu_D = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1 000- $2 \times 10^5$	$Nu_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ - $2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Escalonados	0-500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	500-1 000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1 000- $2 \times 10^5$	$Nu_D = 0.35 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ - $2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.031 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$

\*Todas las propiedades, excepto  $Pr_s$ , se deben evaluar a la media aritmética de las temperaturas de admisión y de salida del fluido ( $Pr_s$  se debe evaluar a  $T_s$ ).

Figura 5.4 Correlaciones de números de Nusselt primera condición [13]

**TABLA 7-3**

Factor de corrección  $F$  que debe usarse en  $Nu_D, N_{L < 16} = F Nu_D$  para  $N_L > 16$  y  $Re_D > 1\,000$  (tomado de Zukauskas, 1987)

$N_L$	1	2	3	4	5	7	10	13
Alineados	0.70	0.80	0.86	0.90	0.93	0.96	0.98	0.99
Escalonados	0.64	0.76	0.84	0.89	0.93	0.96	0.98	0.99

Figura 5.5 Correlaciones de números de Nusselt segunda condición [13]

A continuación, al obtener el número de Nusselt mediante la ecuación que se obtenga de las tablas, se procederá a obtener el coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ), mediante la fórmula siguiente.

$$h = \frac{Nu * K}{D} \quad (5.8)$$

Procediendo con el cálculo del área total de disipación ( $A$ ), que es el área de las celdas en contacto con el aire, rigiéndose por la siguiente ecuación.

$$A = N^{\circ}celdas * Perimetro * L \quad (5.9)$$

Seguidamente, se obtendrán los cálculos de temperatura media, y la diferencia de temperatura, mediante las siguientes cuatro ecuaciones.

$$T_m = \frac{T_{\infty} - T_{salida}}{2} \quad (5.10)$$

$$\Delta T_{em} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (5.11)$$

$$\Delta T_1 = T_s - T_{salidareal} \quad (5.12)$$

$$\Delta T_2 = T_s - T_{\infty} \quad (5.13)$$

Para calcular la  $T_{salida\ real}$ , se usará las siguientes dos ecuaciones, donde se va a necesitar el caudal del aire que entra ( $\dot{m}$ ), el calor específico de la temperatura intermedia, y el área de entrada de aire ( $A_{aire}$ ).

$$T_{salidareal} = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_{in}) * \exp\left(\frac{-A * h}{\dot{m} * Cp}\right) \quad (5.14)$$

$$\dot{m} = \rho * v_{in} * A_{aire} \quad (5.15)$$

Una vez obtenida la temperatura real de salida, se repiten los cálculos del número de Nusselt, el coeficiente de transferencia de calor, y la  $\Delta T_{em}$ , para finalmente obtener la razón de transferencia de calor (Q), rigiéndose por la formula siguiente.

$$\dot{Q} = h * A * \Delta temp \quad (5.16)$$

### 5.3. Cálculos realizados del sistema

Una vez vista la teoría, se procederá a realizar un cálculo de ejemplo, luego, se introducirán las fórmulas en una hoja de cálculo y se realizaran iteraciones hasta conseguir un buen resultado.

Para empezar a realizar cálculos, primero se deben obtener y determinar algunos parámetros, estos son los siguientes:

Temperatura de superficie	50	°C
Velocidad aire	54	km/h
Potencia necesaria para disipar	181	W
St	23,5	mm
D	21	mm
Número de filas	14	
Longitud	70	mm
Número de columnas	6	

Tabla 5.1 Parámetros necesarios del sistema

Empezando con la temperatura de superficie, esta se determinará mediante una suposición, para determinar correctamente esta, se va a usar la formula siguiente.

$$Q = m * Cp * (T_{salida} - T_{entrada}) \quad (5.17)$$

Operando esta para calcular la T de salida, la cual dará información de que como mínimo la Temperatura de superficie será igual que la Temperatura de salida del aire, considerando la Q como la potencia necesaria a disipar, obtenida en el apartado 4.2, y el Cp de la temperatura de entrada, obtenido en la tabla de características del aire en temperaturas específicas [13].

Prosiguiendo con el St y el D, siendo estos el St la distancia entre centros de dos celdas, y el D, el diámetro de las celdas.

También se obtendrán las características del aire sacadas de la tabla con las propiedades del aire.

Tº aire entrada	45	ºC
K	0,02699	W/m*K
Pr	0,741	
densidad	1	Kg/m <sup>3</sup>
alpha	0,0000246	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
CP	1007	J/Kg*K
γ	0,0000175	m <sup>2</sup> /s

Tabla 5.2 Propiedades del aire a 45 ºC

Primeramente, hace falta saber qué tipo de configuración está usando el sistema de refrigeración, en el caso de este proyecto, las celdas están alineadas. Una vez obtenido el tipo de sistema, se procede a realizar los cálculos, empezando con la velocidad máxima  $U_{max}$ , vista en la ecuación 5.5.

$$V_{max} = \frac{23,5}{23,5 - 21} * 54 = 16,79 \text{ m/s}$$

Una vez obtenida, se procede a obtener el número de Reynolds mediante la ecuación 5.7.

$$Re_D = \frac{16,79 * 21}{0,0000175} = 20142$$

Procediendo a calcular el número de Nusselt  $Nu_D$ , y como se ha obtenido un numero de Reynolds superior a 1000 e inferior a 200.000, se va a usar la segunda ecuación de la Figura 5.4, multiplicando por el factor de corrección de 0.99, dado que el sistema tiene 14 columnas, y al ser menor que 16, se debe aplicar el factor de corrección, que se obtiene de la Figura 5.5.

$$Nu_D = 0.99 * 0.27 * 20142^{0.5} * 0,741^{0,36} * (1)^{0,25} = 124,88$$

Una vez obtenido el número de Nusselt, se procede a calcular el coeficiente de calor mediante la fórmula 5-8.

$$h = \frac{124,88 * 0,02699}{21 * 10^{-3}} = 161,87 \frac{W}{m^2 * K}$$

Siguiendo con el área total de disipación  $A$  con la fórmula 5.9.

$$A = 6 * 14 * \pi * 21 * 10^{-3} m * 70 * 10^{-3} m = 0,3879 m^2$$

Procediendo a calcular la diferencia de temperatura mediante las tres ecuaciones 5.11, 5.12 y 5.13.

Pero como no se ha obtenido la temperatura real de la salida, calculando primero el caudal y luego la temperatura de la salida real, se realiza mediante las ecuaciones 5.12 y 5.3.

$$\dot{m} = 1,109 * 15 * 0,3879m^2 = 0,1649$$

$$T_{salidareal} = 50 - (5) * \exp\left(\frac{-0,3879 * 161,87}{0,1649 * 1007}\right) = 46,58^{\circ}C$$

Una vez obtenida la temperatura en la salida real, se vuelve a realizar todo el cálculo con la nueva temperatura de salida, empezando en el cálculo del número de Nusselt. Una vez se ha recalculado todo, se prosigue con el cálculo la diferencia de temperatura mediante las fórmulas 5.11, 5.12, 5.13.

$$\Delta T_1 = 50^{\circ}C - 46,58^{\circ}C = 3,42^{\circ}C$$

$$\Delta T_2 = 50^{\circ}C - 25^{\circ}C = 5^{\circ}C$$

$$\Delta Tem = \frac{3,42^{\circ}C - 5^{\circ}C}{\ln\left(\frac{3,42^{\circ}C}{5^{\circ}C}\right)} = 4,16$$

Finalmente, se calcula la transferencia de calor del sistema mediante la fórmula 5.16.

$$\dot{Q} = 161,87 \frac{W}{m^2 * K} * 0,3879m^2 * 4,16 = 261,229W$$

Se introducen las ecuaciones en una hoja de cálculo para poder iterar de manera más eficiente, obteniendo los cálculos siguientes, presentado en la Figura 5.6

Tº superficie	51	°C	<b>Calculos</b>	
Velocidad aire	36	km/h		
Potencia a disipa	181	W	ReD	13457,1429
St	23,55	mm	NuD	96,769528
D	21,55	mm	h	121,197659 w/m <sup>2</sup> * K
At	2	mm	A	0,45495288 m <sup>2</sup>
Celdas	96		ΔT2	6 °C
Longitud h	70	mm	m	0,04267932
NI	14		Tsal	49,3367096 °C
Tº aire entrada	45	°C	ΔT1	1,66329042 °C
K	0,02699	W/m*K	Δtem	3,38023322
Pr	0,741		Q	186,383438 W
densidad	1	Kg/m <sup>3</sup>	<b>Calculos con Tsal</b>	<b>49,3367096 °C</b>
alpha	0,0000246	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	NuD	97,291875
CP	1007	J/Kg*K	h	123,261551 w/m <sup>2</sup> * K
Y	0,0000175	m <sup>2</sup> /s	A	0,45495288 m <sup>2</sup>
Tº aire entrada	45	°C	ΔT2	6 °C
K	0,02699	W/m*K	m	0,04211187
Pr	0,741		Tsal	49,4010165 °C
densidad	1	Kg/m <sup>3</sup>	ΔT1	1,66329042 °C
alpha	0,0000246	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Δtem	3,38023322
CP	1007	J/Kg*K	Q	189,557387 W
Y	0,0000175	m <sup>2</sup> /s		
Tº aire salida	50	°C		
K	0,02735	W/m*K		
Pr	0,7228			
densidad	1,092	Kg/m <sup>3</sup>		
alpha	0,0000249	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>		
CP	1007	J/Kg*K		
Y	0,00001798	m <sup>2</sup> /s		
Tsal datos	49,3367	°C		
K	0,0273	W/m*K		
Pr	0,7252			
densidad	1,0943	Kg/m <sup>3</sup>		
alpha	0,0000248	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>		
Cp	1007,0000	J/Kg*K		
Y	0,0000	m <sup>2</sup> /s		

Figura 5.6 Resultados obtenidos mediante la hoja de cálculo

En esta figura se pueden observar recuadros de diferentes colores, siendo el amarillo para introducir los datos de tu sistema, el naranja para introducir los datos obtenidos en las tablas de las propiedades del aire a distintas temperaturas y el azul donde se realizan los cálculos del sistema.

en esta imagen hay dos entradas repetidas de aire de entrada y aire de salida, esto es debido a que en el último recuadro se calcula las características del aire de la temperatura de salida encontrada realizando una media si esta no se encuentra en la tabla de propiedades, introduciendo en el segundo apartado  $T_{entrada}$  la temperatura menor, y el  $T_{salida}$  la temperatura mayor.

Finalizando las iteraciones, habiendo obtenido que con una temperatura de superficie de  $51\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una velocidad del aire de entrada de  $36\text{ km/h}$ , o  $10\text{ m/s}$  el sistema tendría una  $Q$  de  $189\text{ W}$ , que es mayor a la necesaria para refrigerar las baterías, es decir  $181\text{ W}$ .

Respecto al modelo teórico, este es solamente un modelo, y se espera que, en la realidad, el sistema funcione diferente, dado que, en este modelo, todas las celdas tienen una temperatura fija de  $51\text{ }^{\circ}\text{C}$  en toda su superficie, así que, una vez obtenidos los resultados, se realizará una simulación numérica para poder corroborar que tan fiel a la realidad es el modelo teórico, a continuación, se presenta una tabla con los distintos resultados obtenidos de las iteraciones con la temperatura de  $51\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Tabla con iteraciones $T_{sup}\text{ }51\text{ }^{\circ}\text{C}$		
Iteración	Velocidad (m/s)	Q final (W)
1	1	25,06
2	5	106,36
3	10	189,557
4	15	262,66
5	20	329,43

Tabla 5.3 Resultados obtenidos en las iteraciones de los cálculos con  $T_{sup}$  de  $51\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 6. Comprobación mediante simulación

Una vez obtenida una primera aproximación teórica, se procede a realizar una simulación para poder observar de forma más realista la refrigeración del paquete, para realizar la simulación, se va a usar Ansys, un paquete de programas de simulación numérica, junto con SolidWorks, un programa de diseño 3D, realizando primero el diseño de la pieza a simular en SolidWorks, exportando así el resultado en Ansys para la simulación, cabe mencionar que tanto en SolidWorks como en Ansys solo se tienen licencias de estudiante, y estas, sobre todo en Ansys limitan bastante la potencia de la simulación.

## 6.1. Diseño de la geometría

Antes de empezar con el diseño, se necesita destacar como se van a realizar las simulaciones en Ansys, dado que este repercute directamente en el diseño de la geometría a simular, la simulación concretamente va a simular el aire que está dentro de un paquete, es decir el espacio que no esté ocupado por o bien las celdas, o los soportes, considerando las celdas como paredes que emiten calor.

Partiendo de lo mencionado en el párrafo anterior, la geometría seleccionada, será el negativo restante del espacio que hay en un paquete de la batería respecto a un paquete completamente ensamblado.

Respecto al CAD del paquete completamente ensamblado, como la caja de baterías, han sido proporcionados por el departamento de mecánica del equipo de Formula Student TCMs.

Pasando al diseño del negativo, este se ha realizado con la herramienta de vaciado que proporciona el propio SolidWorks, obteniendo así la geometría vista en la Figura 6.1

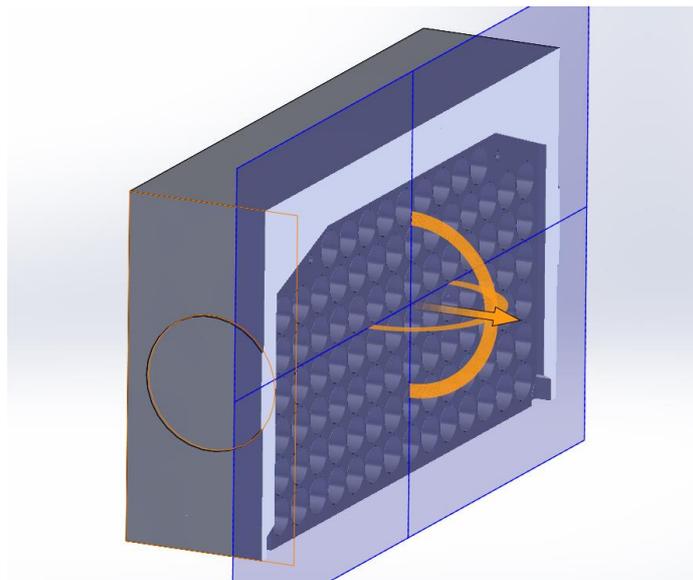


Figura 6.1.

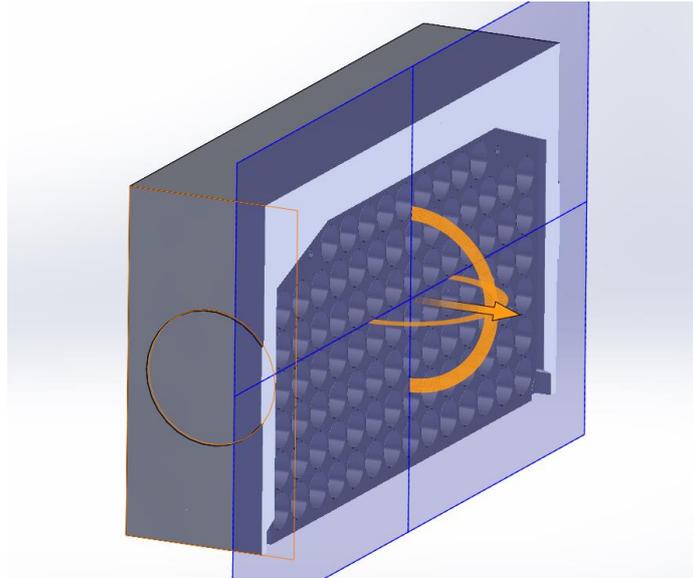


Figura 6.1 Vista de la geometría con un corte

## 6.2. Simulación en Ansys

Una vez se ha obtenido la geometría, se procede a introducir está en Ansys, para hacer esto primero se abre la aplicación Workbench de Ansys, como se ve en la

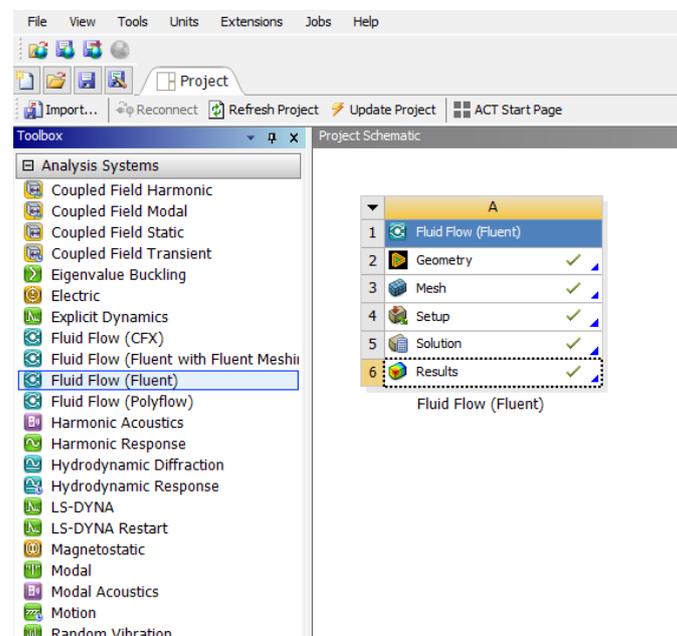


Figura 6.2 desde donde se van a ir abriendo los distintos subprogramas que permitirán realizar las distintas tareas necesarias para realizar.

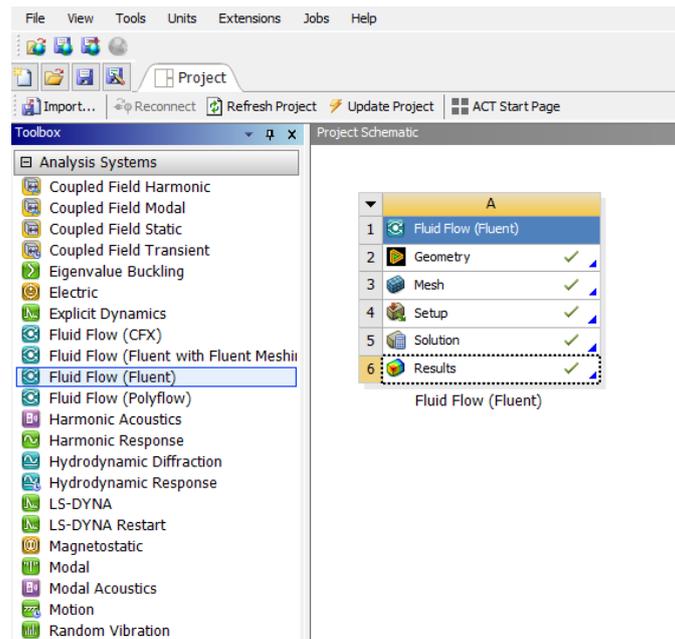


Figura 6.2 Interfaz del programa Ansys Workbench

Una vez presentado el programa, se empieza seleccionando que tipo de simulación se quiere realizar, esto determina qué tipo de subprograma se va a usar, en este caso, al querer hacer una simulación de fluidos, se va a usar el subprograma Ansys Fluent.

Para poder realizar la simulación en este programa, de deben realizar una serie de procesos, los cuales son los siguientes:

1. Introducir la geometría
2. Realizar el mallado
3. Configurar los parámetros de la simulación
4. Configurar las condiciones de contorno

Una vez realizados todos los procesos se realiza la simulación y mediante el programa de post procesamiento de Ansys se obtienen los resultados.

### **6.2.1. Geometría**

Empezando con la geometría, primeramente, se exporta el diseño de la geometría en formato STEP, que es uno de los formatos que acepta el programa Ansys, una vez exportado, se importa mediante el primero de los subprogramas de Ansys, el Design Modeler. Este es un programa que permite diseñar la geometría para su posterior simulación, pero como ya se ha realizado la

geometría, simplemente se importa la geometría diseñada y se determina si esta geometría es un fluido o un sólido, en este caso un fluido, como se puede observar en la Figura 6.3 presentada a continuación.

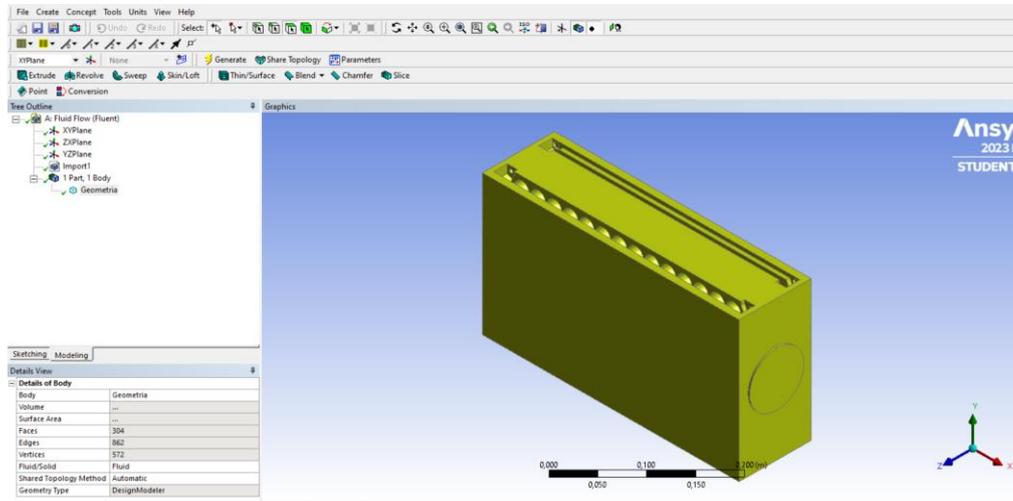


Figura 6.3 interfaz del programa Design Modeler

### 6.2.2. Mallado de la geometría

A continuación, se realiza el mallado, para realizar este, se usará el subprograma de Ansys llamado Meshing, este permite modificar diferentes parámetros para construir la malla, el objetivo principal de este es obtener la máxima resolución posible.

Antes de proceder a describir los cambios realizados en la malla, se deben comentar las limitaciones de la licencia de estudiante, la cual limita el número de elementos a 1M y el uso de hasta 4 procesadores paralelamente para la simulación, eso limita la precisión y aumenta considerablemente el tiempo de simulación.

Para poder realizar una malla útil respetando las limitaciones, primeramente, se modifica la geometría del método de mallado, es decir que geometría base va a usar el programa para realizar cálculos, se decide que sean tetraedros debido a que son más precisos que los octaedros, los cuales vienen por defecto, seguidamente se reducirá el tamaño de los elementos de la malla, estos se reducirán hasta 4 mm, también se cambia el “smoothing” de la malla a “high” y se activa la opción de inflación automática dejándola en “program controlled”.

Antes de generar la malla, primero se deberá determinar los distintos elementos destacados, estos principalmente son las celdas, la entrada de aire y la salida de aire, para hacer esto,

simplemente se deberán nombrar las diferentes superficies, seleccionando estas y nombrándolas mediante el comando “Named Selections”.

Una vez realizados estos cambios y nombrados todos los elementos importantes, se genera la malla, obteniendo el resultado presentado en la Figura 6-4, y obteniendo un total de 989.458 elementos.

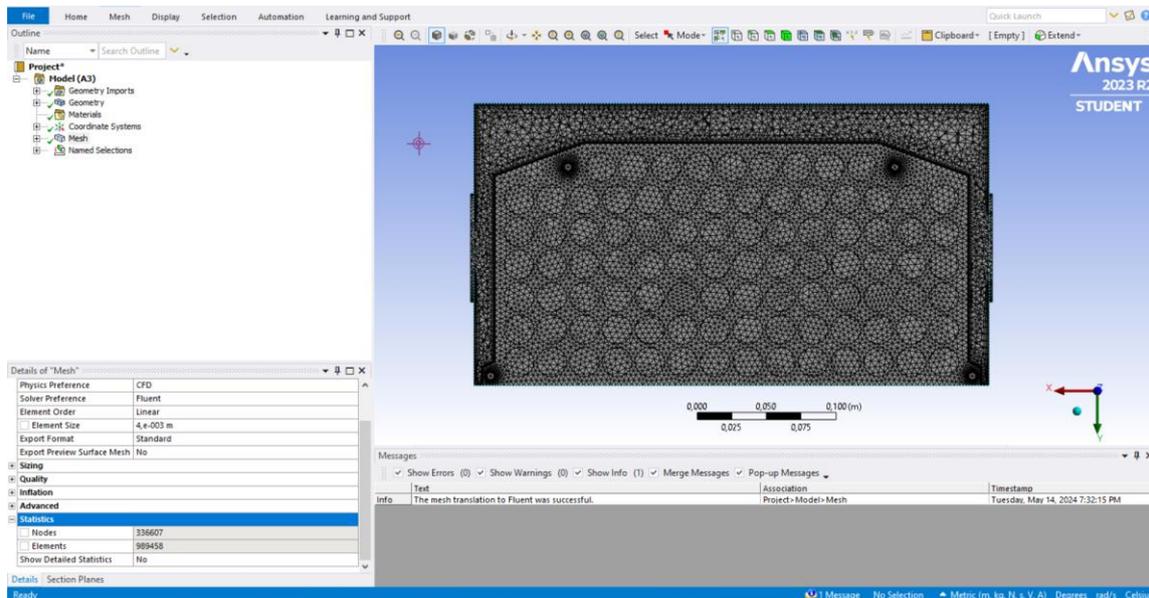


Figura 6.4 Interfaz del subprograma Mesh de Ansys

### 6.2.3. Configuración de los parámetros de la simulación

Con el mallado ya hecho, se procede a abrir el subprograma que permite realizar la simulación llamado Fluent, al inicializar el programa, se abrirá una pantalla para poder escoger el número de núcleos que se quieren destinar a este, en este caso, se usaran 4, que son los máximos permitidos por la licencia de estudiante del programa.

Una vez dentro del programa, se procederá a configurar los parámetros de la simulación, empezando por determinar el tipo de simulación, hay dos tipos, la llamada “steady”, la cual simula el estado de equilibrio del sistema, y el “transient”, la cual hace una simulación temporal del sistema, en este caso en concreto se va a utilizar una simulación de tipo “steady” dado que el objetivo de la simulación es observar si el sistema es capaz de mantener la temperatura de las celdas por debajo de los 60°C, comprobando esto último mediante el estado de equilibrio del sistema.

A continuación, procede a modificar y añadir los modelos que va a usar la simulación, en donde, se activa la ecuación de la energía y se modifica el modelo de viscosidad, el cual se debe cambiar de k-omega a k-epsilon, activar las opciones de “Enhanced Wall Treatment”, “Thermal Effects” y “Curvature Correction”.

Siguiendo con las condiciones de contorno, estas son 5, la superficie de las celdas, la entrada de aire, la salida del aire, las paredes externas y el interior de la geometría. Empezando con las celdas, en donde se procede a introducir el flujo de calor calculado en el apartado 6.1, concretamente  $410,87 \text{ W/m}^2$ .

Siguiendo con la entrada de aire, donde se van a modificar dos parámetros, la velocidad de entrada y la temperatura del aire de entrada, estos serán los encontrados en el apartado de cálculos teóricos, en este caso serán  $10 \text{ m/s}$  a  $45^\circ\text{C}$ .

Respecto a la salida del aire, esta se configurará exactamente igual a la entrada, exceptuando el vector de dirección de la velocidad del aire, en donde se invertirá para que sea una salida.

Finalmente se cambia la temperatura del aire del interior del paquete.

Una vez terminadas las condiciones de contorno, se procede a realizar la inicialización de la simulación, donde el programa aplica las condiciones y simula el estado inicial del sistema.

A continuación, se procede a configurar los diferentes parámetros que se quieren medir, es decir, en este caso serán la temperatura, la presión y la velocidad. Procediendo finalmente con la simulación.

### **6.3. Resultados de la simulación**

Para poder ver mejor los resultados de la simulación, se hará uso del programa de post procesamiento de Ansys, llamado CFD-Post, en donde se obtienen los gráficos de las Figuras 6.19, 6.20 y 6.21, presentados a continuación.

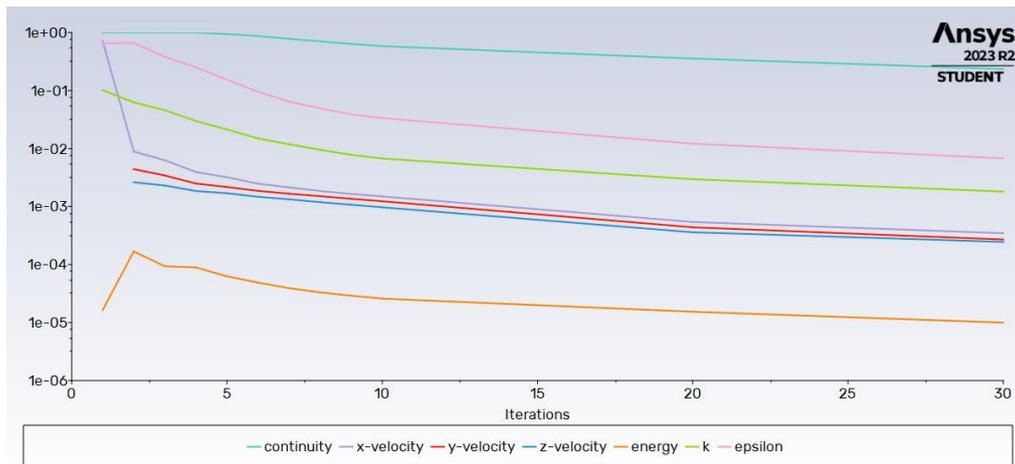


Figura 6.5 Gráfico con los residuales obtenidos de la simulación

Empezando con esta figura, esta muestra los residuales de los parámetros utilizados, en este caso nos sirve para detectar anomalías y ver la cantidad de iteraciones necesarias para obtener un buen resultado, observando como a partir de la iteración 20 todas las curvas de los parámetros se van estabilizando, haciendo que se pueda considerar un buen resultado de simulación.

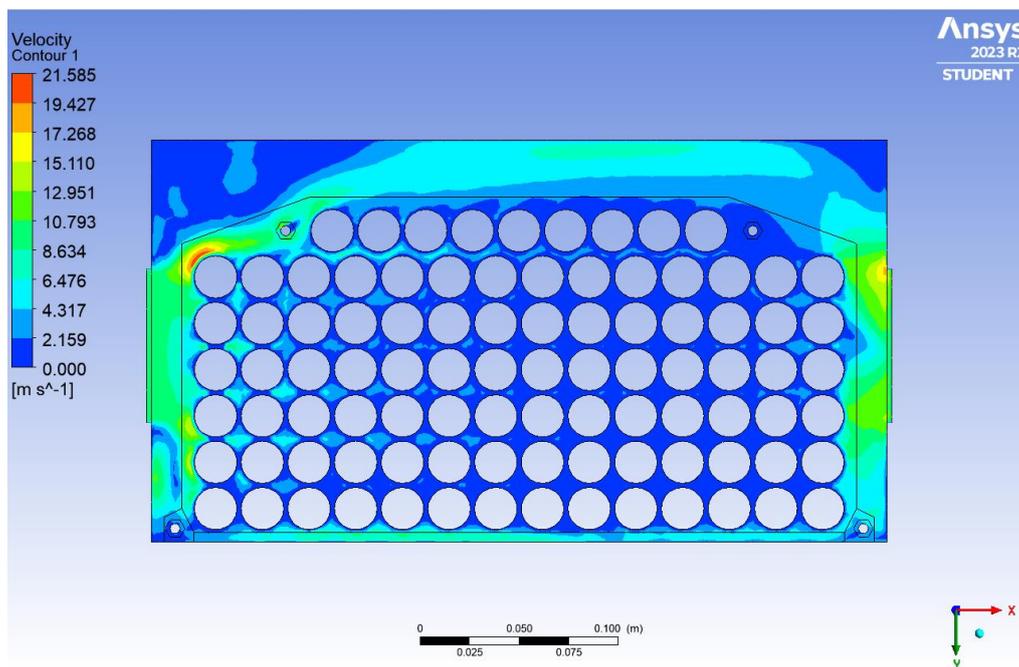


Figura 6.6 Mapa de velocidades obtenidas en la simulación

En esta segunda figura se puede observar el mapa de velocidades internas de la geometría, esto permite observar cómo se distribuye la masa de aire entrante, viendo como a más velocidad, mayor va a ser la cantidad de aire que pase por ese punto.

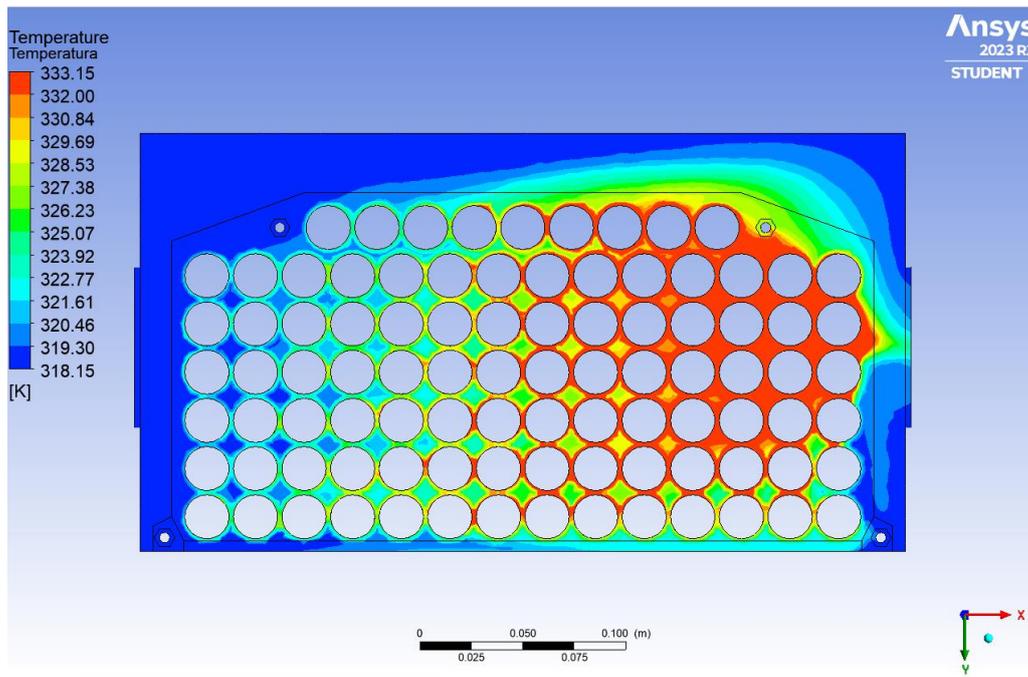


Figura 6.7 Mapa de temperaturas obtenidas en la simulación

En esta última figura se puede observar el mapa de temperatura interna de la geometría, esto permite observar cómo se distribuye la temperatura internamente, viendo que puntos son más calientes y como esta temperatura se reparte.

Finalmente se procede obtener dos datos importantes de la simulación, la temperatura máxima de superficie de celda, y la temperatura promedio de la superficie de las celdas, vistas en la

Elemento	Temperatura °C
Temperatura máxima de superficie	103,629
Temperatura promedio de superficie	60,443

Tabla 6.1 Temperaturas máxima y promedio obtenidas de la simulación

### 6.3.1. Análisis de resultados

Una vez obtenidos los resultados, se procede a realizar un análisis de estos, empezando con la, el mapa de velocidades, donde se puede observar como el sistema está muy poco optimizado, perdiendo una carga considerable que se dirige a la parte superior del modelo, también se puede observar que en la esquina inferior izquierda se produce un flujo turbulento, esto también genera una pérdida de carga.

Siguiendo con el análisis de temperatura y empezando con el mapa de temperaturas de la Figura 6.7 Mapa de temperaturas obtenidas en la simulación, en donde se detecta un gran punto caliente situado en el conjunto de celdas de la esquina superior derecha, sumado a los resultados obtenidos presentados en la Tabla 6.1 Temperaturas máxima y promedio obtenidas de la simulación, los cuales indican que tanto la temperatura máxima como la promedio son superiores a la temperatura de superficie buscada que son 60°C, determinando que en efecto el sistema de refrigeración teórico no cumple con las especificaciones buscadas, así que se deberán modificar tanto la geometría como las entradas de aire para cumplir con los requisitos pedidos en competición.

## **7. Modificaciones y pruebas**

Una vez visto que el sistema planteado no cumple con las especificaciones pedidas por la competición, se va a realizar un seguido de modificaciones y pruebas para mejorar la transferencia de calor del sistema y lograr que las celdas estén por debajo de 60°C.

### **7.1. Modificaciones en la geometría**

En este apartado se van a exponer las modificaciones realizadas a la geometría, buscando mejorar la transferencia del sistema.

#### **7.1.1. Primera modificación**

La primera modificación propuesta, pasa por, primeramente, partir la geometría por la mitad, dado que es simétrica, de esta manera, se puede realizar un mallado más potente y obtener resultados más precisos, este corte se puede ver en la Figura 7.1 Vista lateral del corte hecho de la geometría.

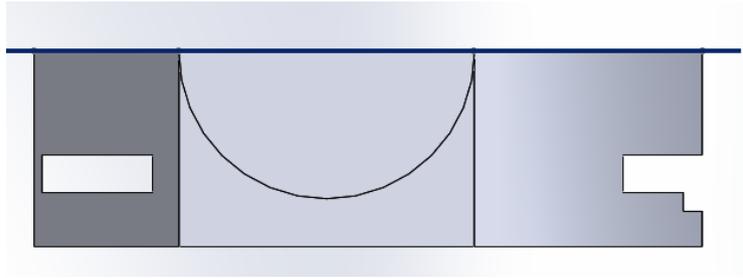


Figura 7.1 Vista lateral del corte hecho de la geometría

Una vez optimizada la geometría para la simulación se procederá a realizar las modificaciones para mejorar el sistema, empezando por delimitar las partes superior e inferior intentando solucionar el problema de la pérdida de carga útil en esos dos puntos, las modificaciones se pueden observar en la Figura 7.2 Medidas de la primera modificación y la Figura 7.3 Vista de la geometría post modificaciones, presentadas a continuación.

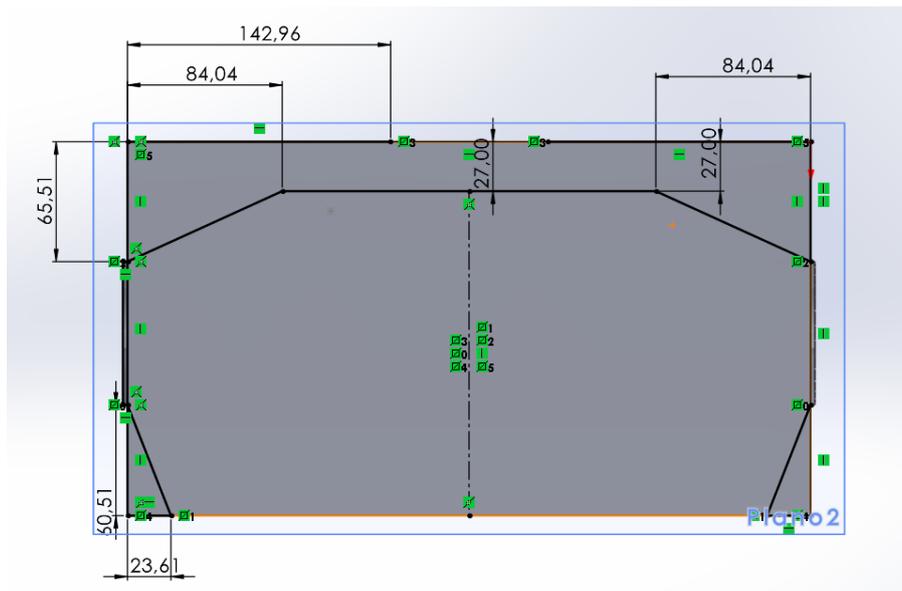


Figura 7.2 Medidas de la primera modificación

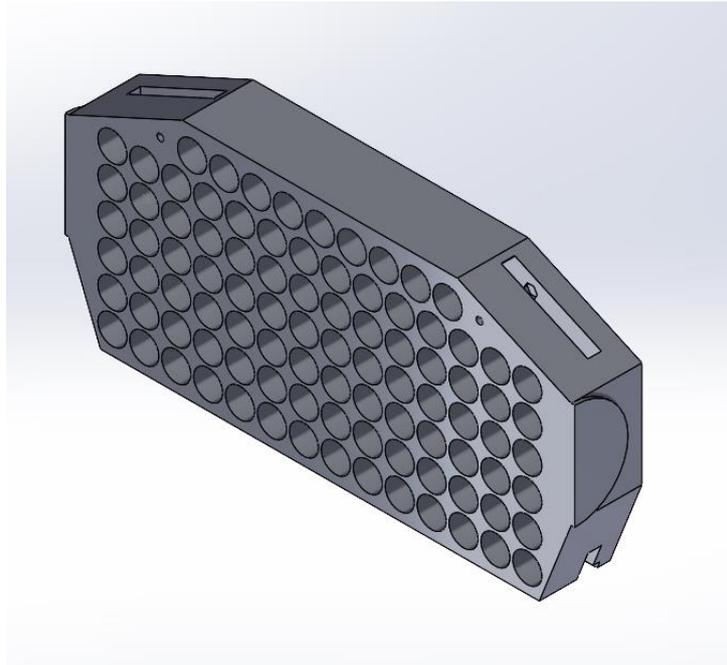


Figura 7.3 Vista de la geometría post modificaciones

Una vez modificada se procede a realizar una simulación para comprobar si se ha mejorado en el proceso, al haber optimizado la geometría se han realizado cambios en el mallado, los cuales pasan por modificar el tamaño de los elementos a 2,8 mm, aumentar en la pestaña de inflación de elementos el parámetro “transition” y el “growth” a 0,4 y 1,6 respectivamente, obteniendo una malla con un total de 821.623 elementos, presentada en la Figura 7.4, la cual al estar simulando solo una de las dos mitades, tiene casi el doble de elementos, siendo más precisa.

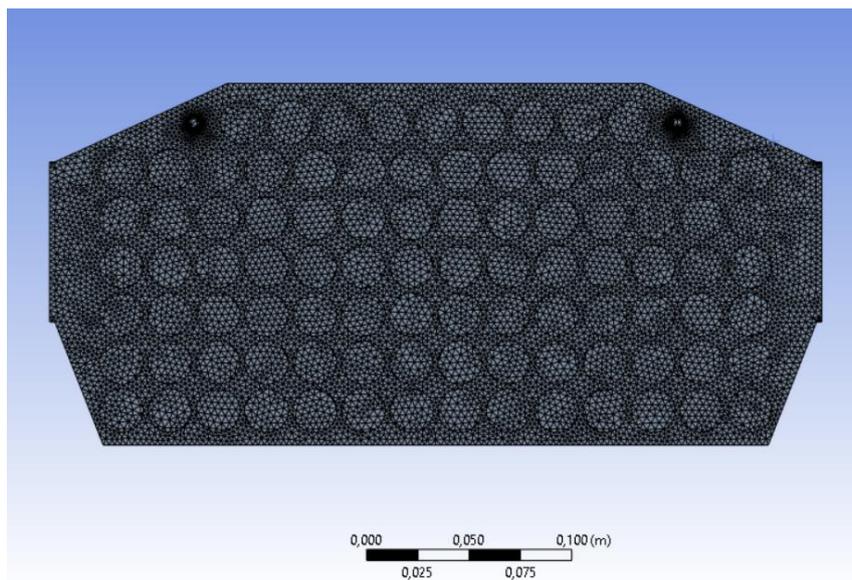


Figura 7.4 Vista de la malla obtenida

Una vez obtenida la malla mejorada, se procede a realizar la simulación con los mismos parámetros usados en la anterior, obteniendo los resultados presentados en las Figuras: Figura 7.5 Mapa de velocidades de la primera modificación y Figura 7.6.

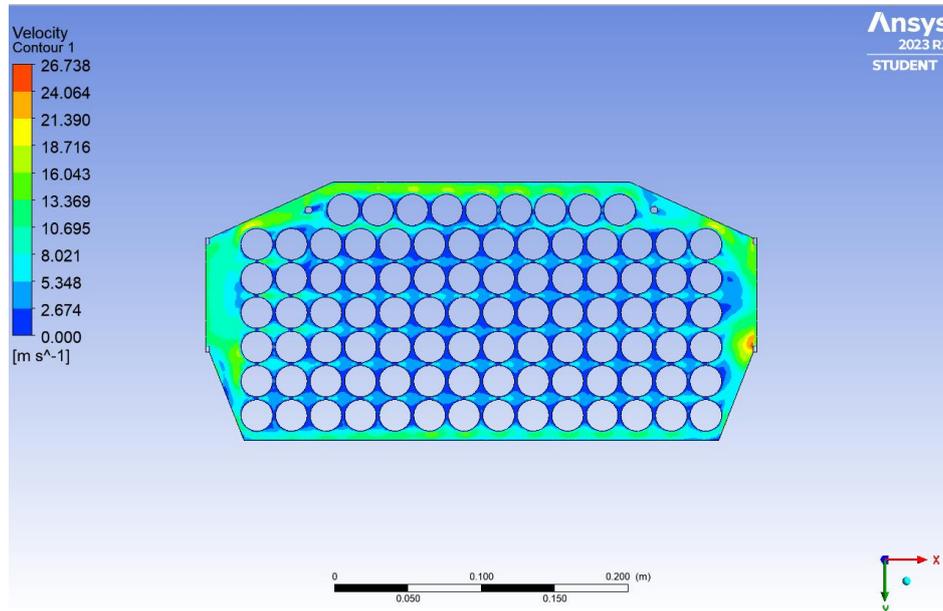


Figura 7.5 Mapa de velocidades de la primera modificación

En esta figura se observa como la distribución de la masa de aire entrante mejora, pasando así por todas las celdas del paquete, cosa que provoca que en todas las celdas haya transferencia se produzca la transferencia de calor por convección forzada.

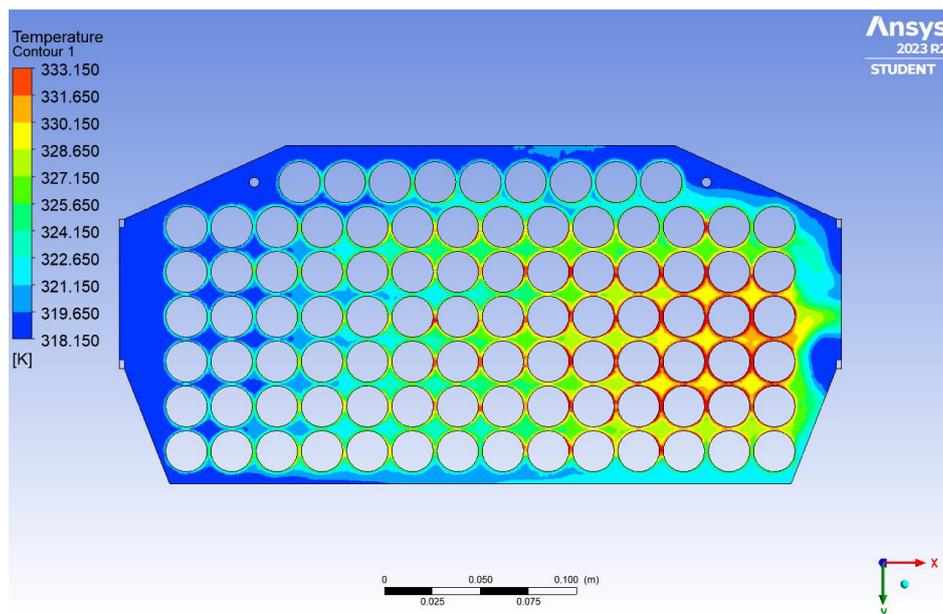


Figura 7.6 Mapa de temperaturas de la primera modificación

Respecto al mapa de temperaturas presentado en la anterior figura, se observa como el punto caliente situado en las celdas más próximas a la salida de aire ha disminuido de tamaño y se ha desplazado hacia abajo. Para poder observar mejor el resultado, se obtienen los mismos datos que en la simulación del anterior apartado para poder comparar mejor, estos se presentan en la Tabla 7.1 Temperaturas máxima y promedio obtenidas de la modificación, presentada a continuación.

Elemento	Temperatura °C
Temperatura máxima de superficie	80,445
Temperatura promedio de superficie	56,032

Tabla 7.1 Temperaturas máxima y promedio obtenidas de la modificación

Una vez obtenidas, se comparan los resultados con los obtenidos anteriormente en la tabla, viendo como tanto temperatura máxima de superficie como la temperatura promedio han disminuido, habiendo disminuido 103,629 °C a 80,445 °C la temperatura máxima, y de 60,443 °C a 56,032 °C la temperatura promedio, estos dos cambios son debidos a que al haber aumentado la cantidad de aire que pasa por el centro, esto permite que más cantidad de aire limpio entre en contacto con la superficie de las celdas, permitiendo una mayor transferencia de calor, bajando en gran medida las dos temperaturas.

### **7.1.2. Segunda modificación**

En esta modificación se cambiar la dirección de las entradas del aire, abriendo una obertura en la parte superior de la tapa de la caja de baterías, haciendo que los dos ventiladores entren aire al paquete, el cual sale por la obertura realizada en la tapa, para realizar esto se ha tenido que hacer un cambio encima de la primera modificación, haciendo un canal que vaya desde la fila de celdas superior a la obertura de la tapa, esta segunda modificación se presentan en las siguientes figuras, la Figura 7.7 Medidas de la segunda modificación y la Figura 7.8.

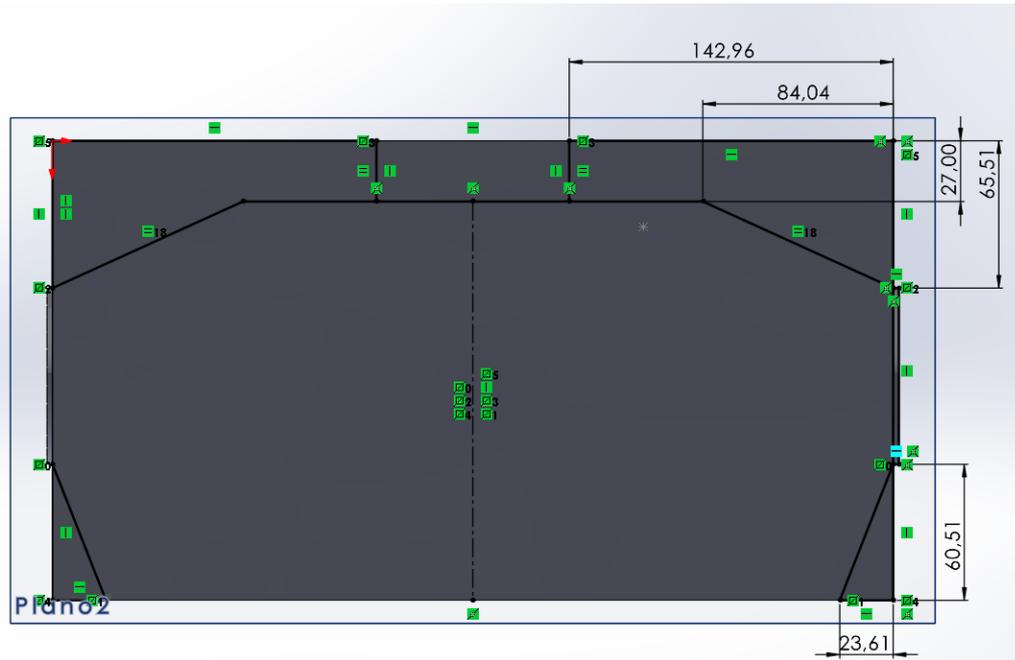


Figura 7.7 Medidas de la segunda modificación

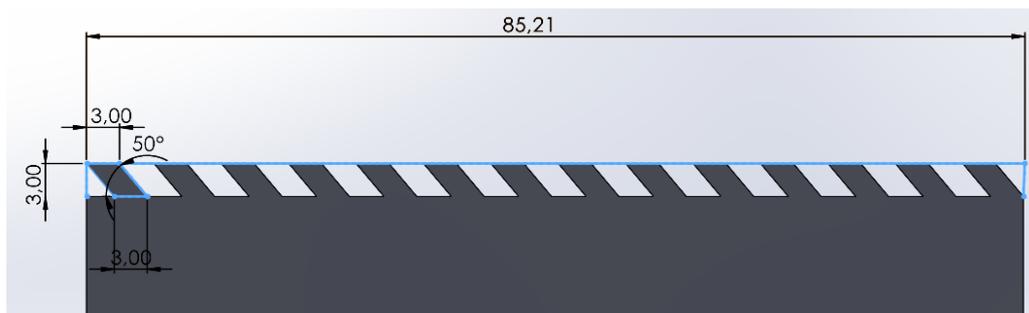


Figura 7.8 Medidas de las oberturas de la tapa de la caja

Una vez presentadas las modificaciones, se procede a realizar la simulación de esta tercera modificación, en este caso, no se requiere modificar ningún parámetro nuevo en el apartado de mallado, obteniendo una malla de 920.572 elementos, obteniendo los siguientes resultados, situados en las figuras, la Figura 7.10 y Figura 7.9.

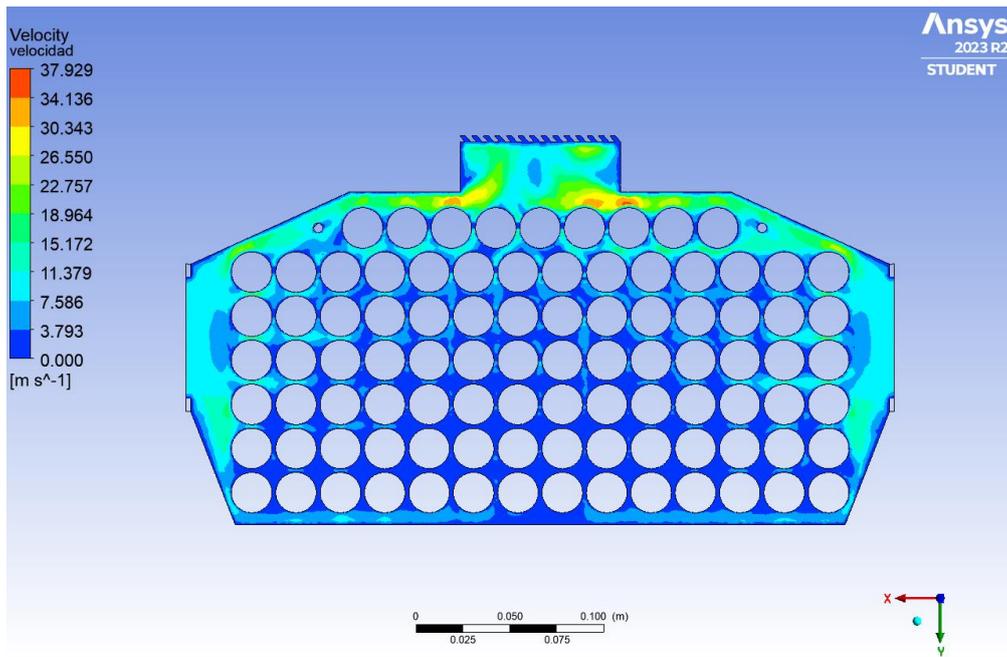


Figura 7.9 Mapa de velocidades de la segunda modificación

En esta figura se observa como vuelven a aparecer zonas internas donde el aire casi no tiene velocidad, perdiendo la gran mayoría de carga en la zona superior.

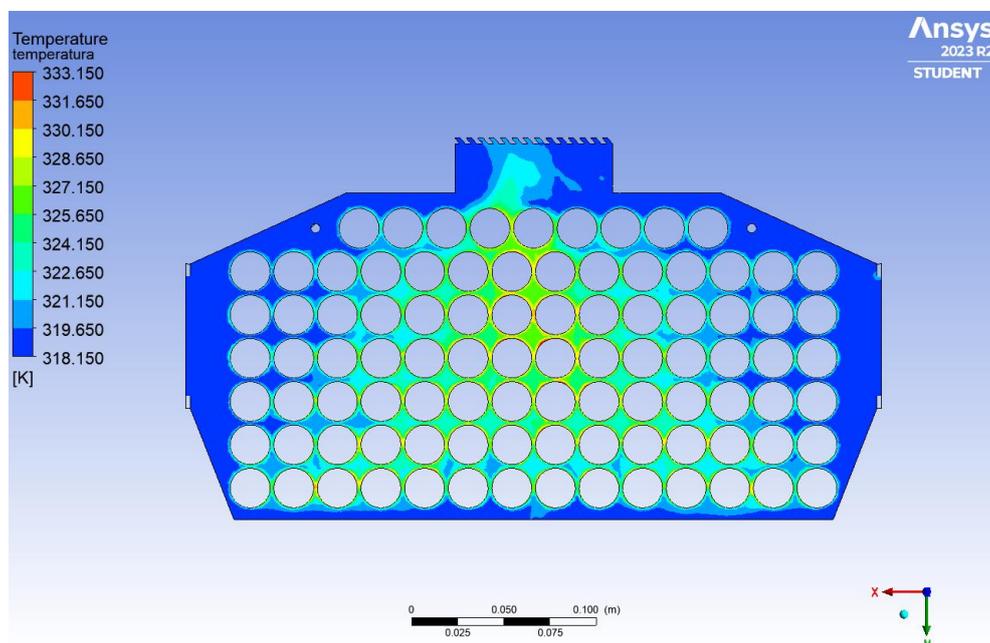


Figura 7.10 Mapa de temperaturas de la segunda modificación

Respecto a la segunda figura, se puede observar grandes cambios respecto a las simulaciones previas, viendo primeramente que el punto caliente ha pasado de estar en el extremo de la salida

al centro del paquete, esto es debido a que el aire de las dos entradas se encuentra en el medio, este aire ya ha sido calentado por las celdas externas, provocando que este aire tenga una temperatura mayor, reduciendo su capacidad para refrigerar. Se vuelven a obtener los datos de temperatura máxima y temperatura promedio presentadas en la tabla siguiente.

Elemento	Temperatura °C
Temperatura máxima de superficie	68,706
Temperatura promedio de superficie	52,758

Tabla 7.2 Temperaturas máxima y promedio obtenidas de la segunda modificación

En este caso, se puede observar otra mejora en el sistema, rebajando tanto la temperatura máxima como la temperatura promedio de la superficie, siendo estas de 80,445°C a 68,706°C para la temperatura máxima, y de 56,032°C a 52,758°C en la temperatura promedio de superficie.

En esta segunda modificación se ha conseguido una temperatura máxima de 68,706°C, que se acerca mucho a la temperatura objetivo, que son menos de 60°C, así que se va a realizar una última modificación antes de modificar otros componentes.

### 7.1.3. Tercera modificación

Esta última modificación pasa por cambiar el sentido del aire de los ventiladores, haciendo que, en vez de introducir aire lo extraigan, usando la obertura superior como entrada de aire, al no haber modificado la geometría, no se requiere el uso de SolidWorks ni el uso de Ansys Meshing para realizar la malla de nuevo, dado que es la misma que la obtenida en la segunda modificación. Respecto a las simulaciones, lo único que cambia es el sentido de la velocidad impuesta en las entradas de aire, que pasara de 10m/s a -10m/s, girando su orientación. Una vez realizada la modificación, se simula y se obtienen los siguientes resultados.

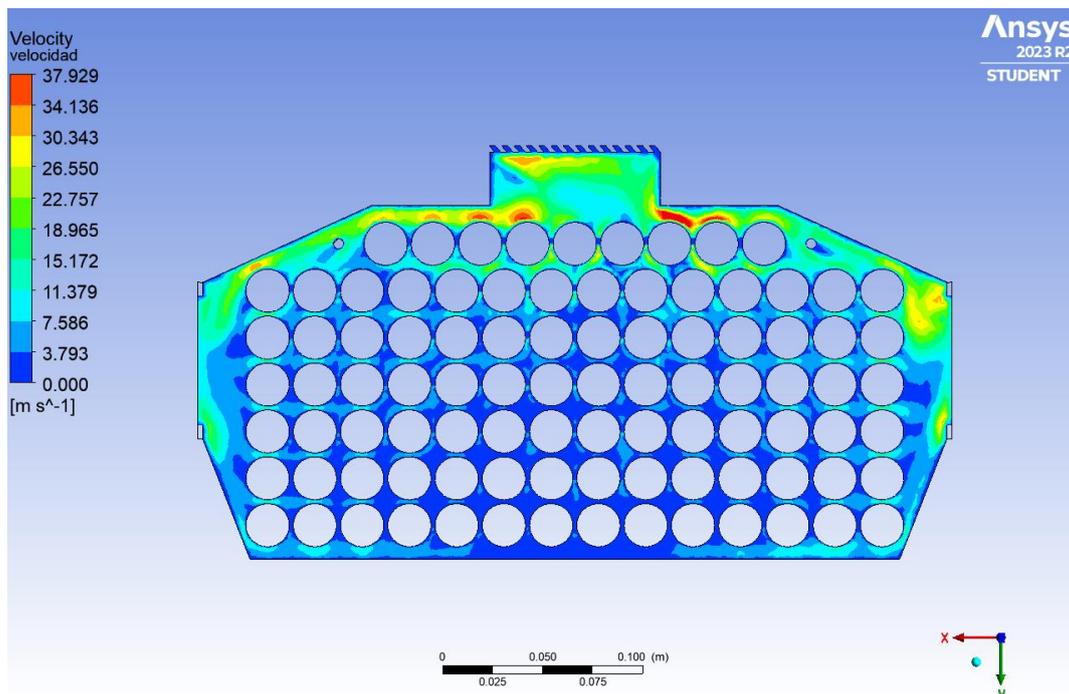


Figura 7.11 Mapa de velocidades de la tercera modificación

En esta Figura 7.11, se observa cómo se reparte en mayor escala la masa de arie, haciendo que casi todas las celdas estén en contacto con aire turbulento, mejorando la distribución de aire respecto a la modificación anterior.

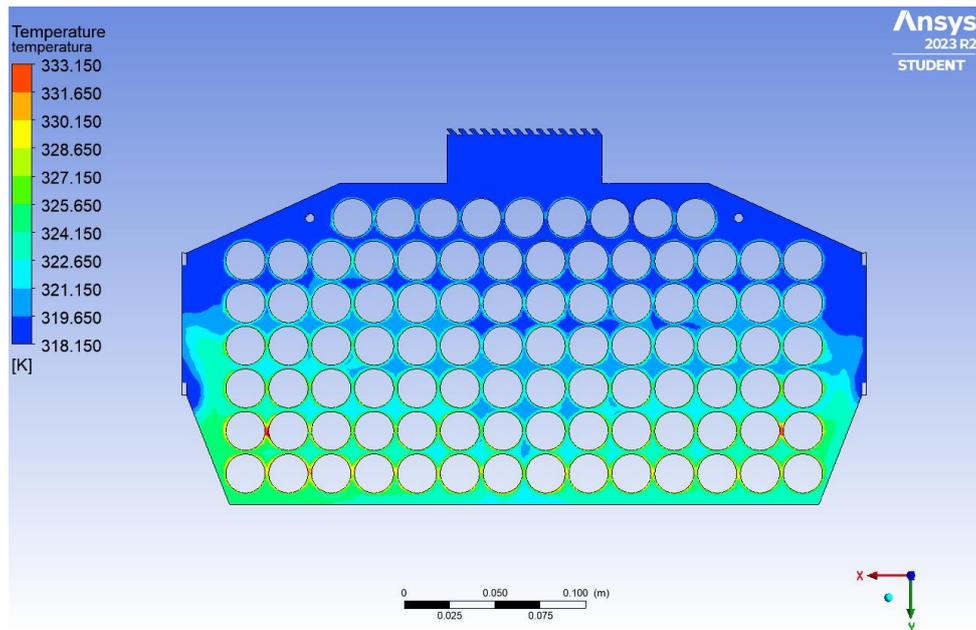


Figura 7.12 Mapa de temperaturas de la tercera modificación

En esta Figura 7.12, se observa como otra vez cambia completamente la distribución de temperaturas dentro del paquete, teniendo dos puntos calientes en vez de uno, estando estos en ambas esquinas inferiores del paquete, estas se producen debido a que el aire entra por arriba, haciendo que las partes situadas en el extremo opuesto de la entrada estén más calientes. Respecto a las temperaturas máximas y promedio de superficie estas son.

Elemento	Temperatura °C
Temperatura máxima de superficie	69,698
Temperatura promedio de superficie	51,475

Tabla 7.3 Temperaturas máxima y promedio obtenidas de la tercera modificación

A diferencia de las modificaciones 1 y 2, en la Tabla 7.4 , se puede observar cómo esta tercera modificación no cambia tanto respecto a las anteriores, aumentando la temperatura máxima de 68,706°C a 69,698°C, pero disminuyendo la temperatura promedio de superficie de 52,758°C a 51,475°C, siendo esta mejor refrigerando, pero peor distribuyendo la temperatura respecto a la segunda modificación.

#### **7.1.4. Resumen de modificaciones geométricas**

En este apartado, se resumirán los datos obtenidos de las diferentes modificaciones geométricas obtenidos, valorando cual es la mejor geometría para seguir iterando con otros parámetros. Los resultados de las simulaciones vistas en la siguiente Tabla 7.4.

<b>Concepto</b>	<b>Temperatura Máxima (°C)</b>	<b>Temperatura Promedio (°C)</b>
Geometría base	103,629	60,443
Modificación 1	80,445	56,032
Modificación 2	68,706	52,758
Modificación 3	69,698	51,475

Tabla 7.4 Resumen de los resultados obtenidos de las modificaciones geométricas

Como bien se ha ido comentando en los apartados anteriores, se puede observar que la menor temperatura máxima obtenida, es de 68,706°C en la modificación 2, mientras que la menor temperatura promedio que se ha obtenido, es de 51,475°C obtenida en la modificación 3. Respecto a cuál de todos los sistemas es el mejor en términos de refrigeración, se observa una clara ventaja de las modificaciones 2 y 3 respecto a la geometría base y la modificación 1, continuando con cual es la mejor, se observa que la modificación 2 consigue bajar la temperatura máxima en casi un grado respecto a la tercera modificación, pero esta última obtiene una temperatura promedio de más de un grado de diferencia respecto a la dos. Como la diferencia no es muy significativa, se deberán seguir haciendo pruebas para determinar cuál de las dos es mejor.

#### **7.2. Modificación de velocidades**

En este apartado se van a realizar simulaciones cambiando las velocidades de ventiladores, para observar el cambio que producen. Respecto a la geometría a utilizar, se van a usar tanto la modificación 2 como la modificación 3. En este apartado los resultados se van a exponer mediante una tabla, y solo se van a mostrar las dos simulaciones más relevantes, las demás estarán incluidas en los anexos del proyecto.

### 7.2.1. Doble entrada de aire

Primeramente, se realizarán las simulaciones de la modificación 2, es decir, la doble entrada, donde se irá aumentando de velocidad para observar el efecto de esta en la temperatura de las celdas, empezando de 5 m/s a 15 m/s, haciendo una simulación cada 2.5 m/s, los resultados de las simulaciones se presentan en la tabla y grafica de la Tabla 7.5 Resultados de las simulaciones de doble entrada modificando la velocidad y Figura 7.13 Grafica con las simulaciones de la variación de velocidad con la doble entrada.

Doble entrada		
velocidad (m/s)	T máxima (°C)	T promedio (°C)
5	82,355	57,501
7,5	74,14	55,035
10	69,782	53,175
12,5	65,76	51,863
15	63,76	50,949

Tabla 7.5 Resultados de las simulaciones de doble entrada modificando la velocidad.

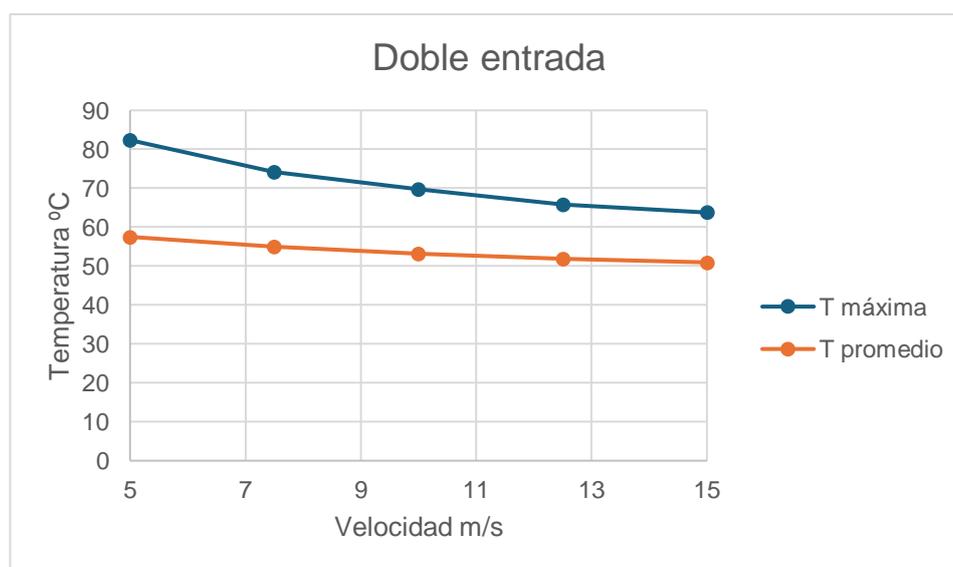


Figura 7.13 Grafica con las simulaciones de la variación de velocidad con la doble entrada

En esta figura se puede observar cómo tanto la temperatura máxima como la temperatura promedio bajan a medida que se aumenta la velocidad, aún que esta bajada se va reduciendo cada vez más, obteniendo una temperatura máxima que se ha reducido de 82,355°C a 63,76°C y una temperatura promedio que va de 57,501°C a 50,949°C.

Para observar mejor el efecto, se procede a analizar los mapas de temperatura y velocidad de los dos extremos.

Empezando con los mapas de velocidades internas de las simulaciones de 5 m/s y 15 m/s mostradas en las figuras, Figura 7.14 Mapa de velocidades de la modificación 2 con 5 m/s y Figura 7.15 Mapa de velocidades de la modificación 2 con 15 m/s.

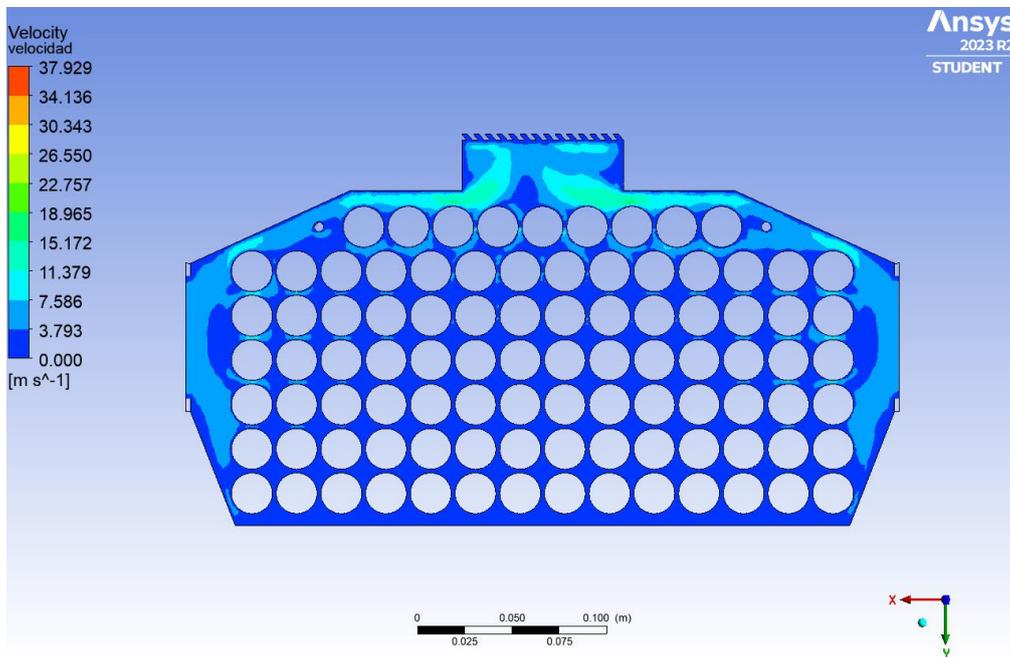


Figura 7.14 Mapa de velocidades de la modificación 2 con 5 m/s

En esta figura, se puede observar como la mayoría de carga se sitúa en las zonas exteriores, haciendo que la mayoría de las celdas interiores no se refrigieren bien al no llegar suficiente aire frío a su superficie.

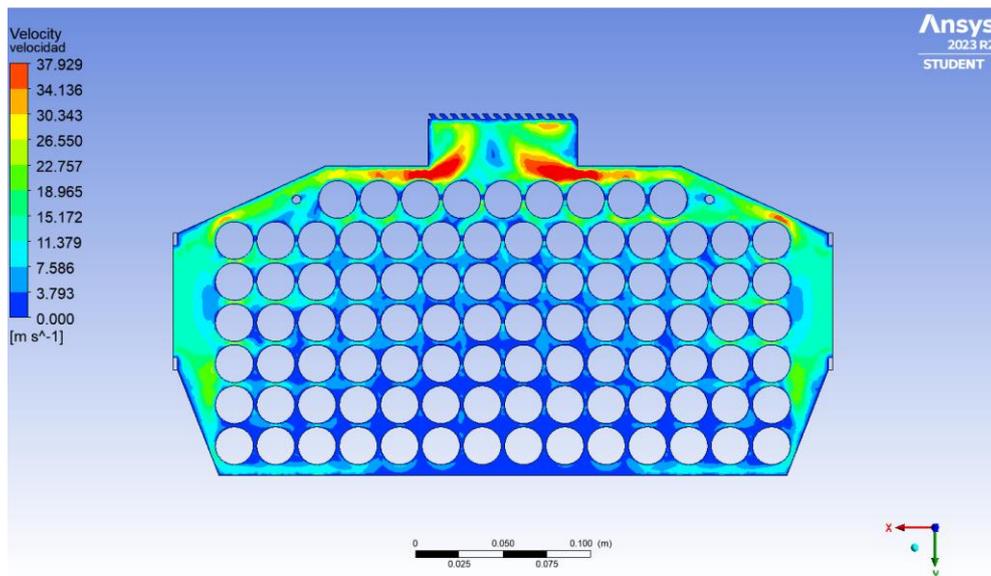


Figura 7.15 Mapa de velocidades de la modificación 2 con 15 m/s

Respecto a la simulación con la velocidad de 15 m/s, en esta Figura 7.15, se observa como la gran mayoría de celdas están refrigeradas, siendo las tres celdas inferiores las únicas en donde el aire adyacente no tienen mucha velocidad, siendo esta inferior a 3,793 m/s.

Respecto a las temperaturas, se presentan a continuación en las figuras, Figura 7.16 y Figura 7.17.

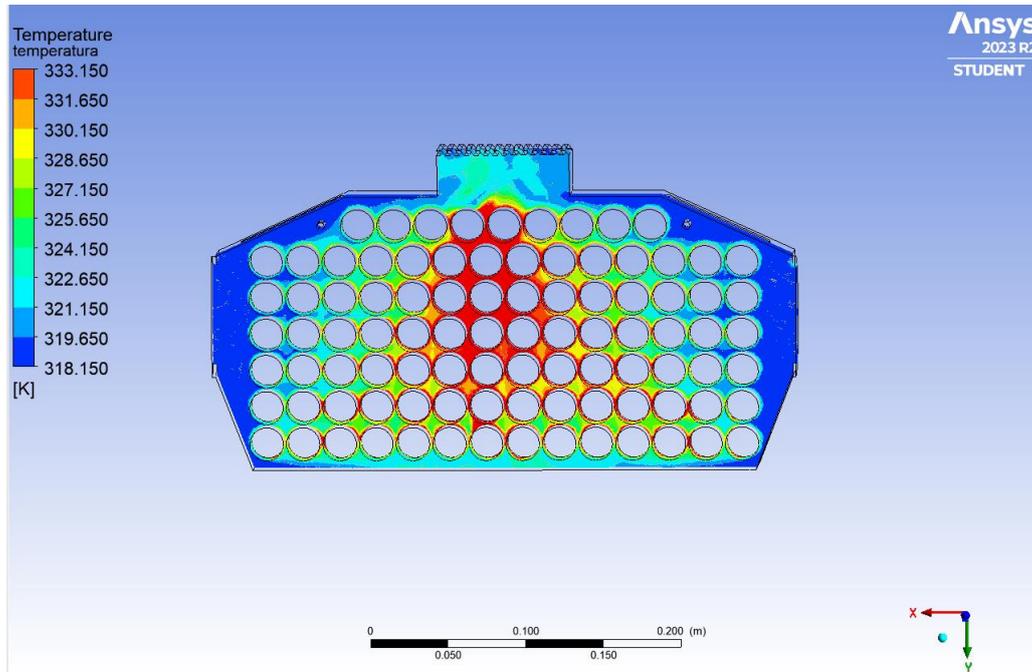


Figura 7.16 Mapa de temperaturas de la modificación 2 con 5 m/s

En esta figura, se observa cómo hay un punto caliente justo en el centro, respecto a la temperatura, este punto caliente es debido a que el aire se calienta con las celdas exteriores, y al tener las dos corrientes confluyendo en el centro, siendo este aire ya calentado, este al tener mayor temperatura, disipa menos temperatura.

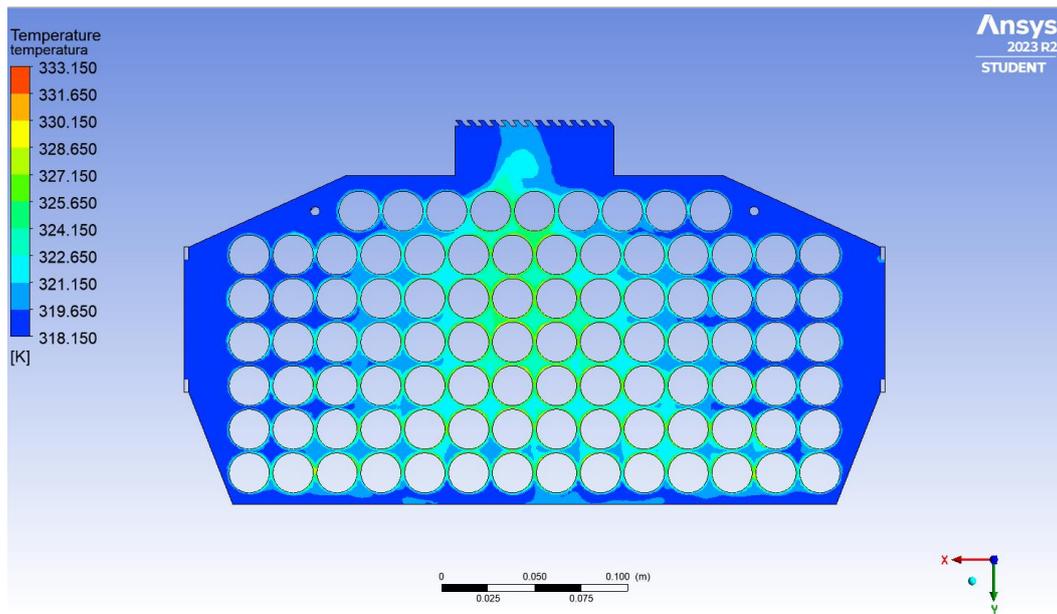


Figura 7.17 Mapa de temperaturas de la modificación 2 con 15 m/s

En esta segunda figura, se ve como, aún que el punto caliente del centro sigue existiendo, este ha bajado mucho la temperatura, siendo la temperatura menor a los 60°C, esto es debido a que, al aumentar la velocidad, aumenta el flujo de aire que entra en el sistema, haciendo que más cantidad de aire limpio entre en el sistema, aumentando la transmisión de calor del sistema y por ende reduciendo la temperatura.

### 7.2.2. Doble salida de aire

Continuando con las simulaciones de la modificación 3, es decir, la doble salida, donde como se ha realizado anterior, se realizan las simulaciones de 5 m/s a 15 m/s aumentando la velocidad en 2,5 m/s en cada simulación, obteniendo los siguientes resultados, vistos en la Tabla 7.6 Resultados de las simulaciones de doble salida modificando la velocidad y Figura 7.19.

Doble salida		
Velocidad	T máxima °C	T promedio °C
5	81,158	56,941
7,5	72,097	53,614
10	69,698	51,475
12,5	66,416	50,782
15	63,682	50,02

Tabla 7.6 Resultados de las simulaciones de doble salida modificando la velocidad

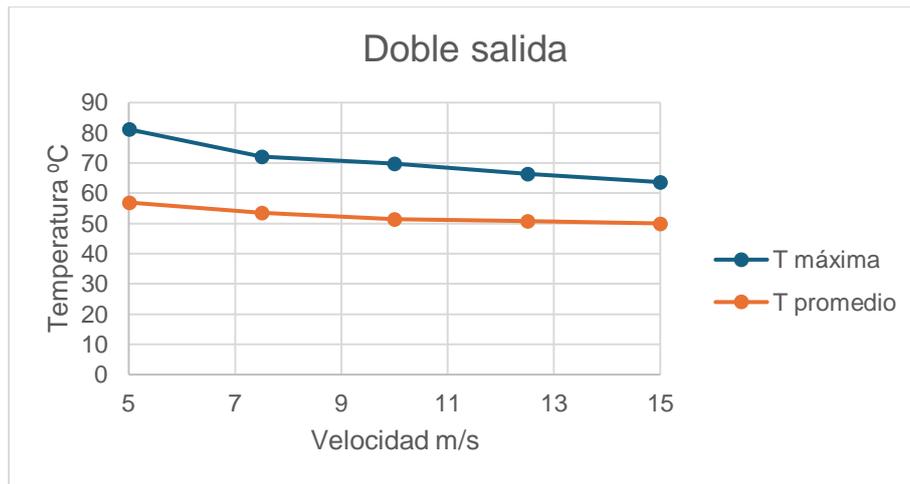


Figura 7.18 Grafica con las simulaciones de la variación de velocidad con la doble entrada

En esta figura se observa que ocurre algo muy similar a lo que se ha visto anteriormente con las simulaciones con el modelo de la doble entrada, donde las temperaturas máxima y promedio van disminuyendo a medida que la velocidad aumenta, y que esta reducción de la temperatura se va haciendo menor a medida que la velocidad aumenta, en este caso se observa que la temperatura máxima de 81,158°C disminuye a 63,682°C mientras que la temperatura promedio va de 56,941°C hasta 50,02°C.

Como se ha realizado en el apartado anterior, se analizarán los distintos mapas obtenidos en las simulaciones de 5 m/s y 15 m/s con la configuración de doble salida.

Empezando como los mapas de velocidades internas de las simulaciones con 5 m/s y 15 m/s, mostrados en las figuras, Figura 7.19 y Figura 7.20, vistas a continuación.

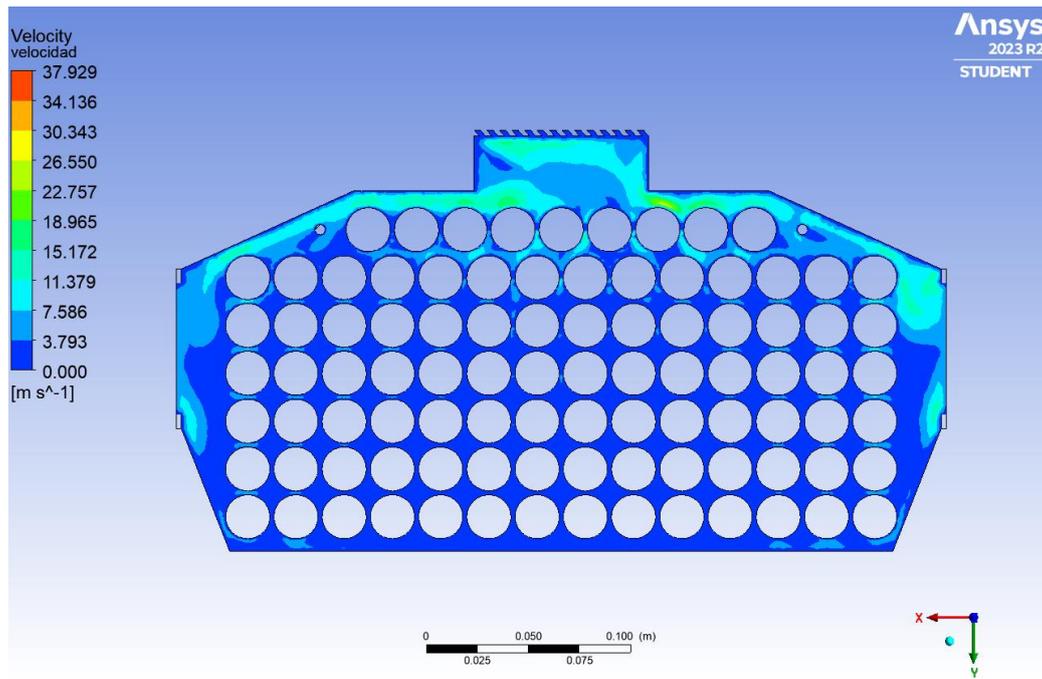


Figura 7.19 Mapa de velocidades de la modificación 3 con 5 m/s

En esta figura, se observa algo similar a lo visto en la Figura 7.14, el Mapa de velocidades internas de la simulación con 5 m/s con doble entrada, donde gran parte de la carga de aire entrante se reparte por la zona superior del paquete, dejando a la mayoría de las celdas internas con muy poco flujo de aire limpio. También se observa la diferencia entre ambos sistemas, siendo estos el sistema de doble entrada y el sistema de doble salida, en las celdas inferiores próximas a la salida, donde se observa como el de doble entrada tiene más velocidad en el exterior inferior, mientras que el de doble salida presenta más velocidad en las celdas internas situadas en los extremos inferiores.

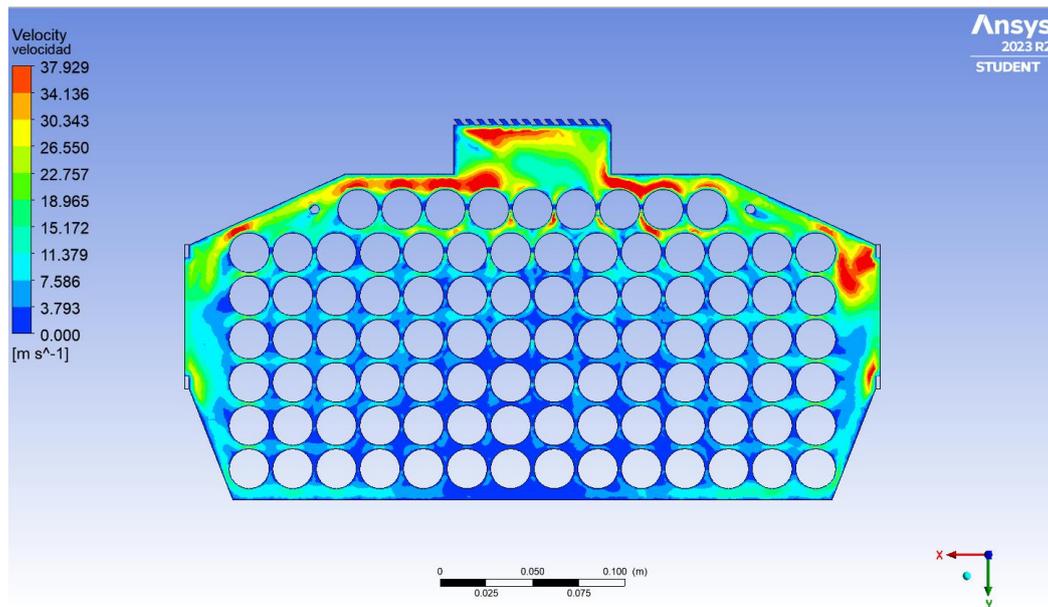


Figura 7.20 Mapa de velocidades de la modificación 3 con 15 m/s

Respecto a la simulación hecha con el sistema de doble salida con una velocidad de 15 m/s vista en la Figura 7.20, se observa que, como pasa con la simulación anterior, esta es muy similar a la simulación hecha con el sistema de doble entrada, pudiendo refrigerar todas las celdas a excepción de las tres celdas inferiores, cuyas velocidades son iguales o inferiores a 3,793 m/s.

Una vez vistos los mapas de velocidades internas de las dos simulaciones, se procede a visualizar los mapas de temperatura interior del sistema con la doble salida de aire, presentados en las figuras, Figura 7.21 y la Figura 7.22.

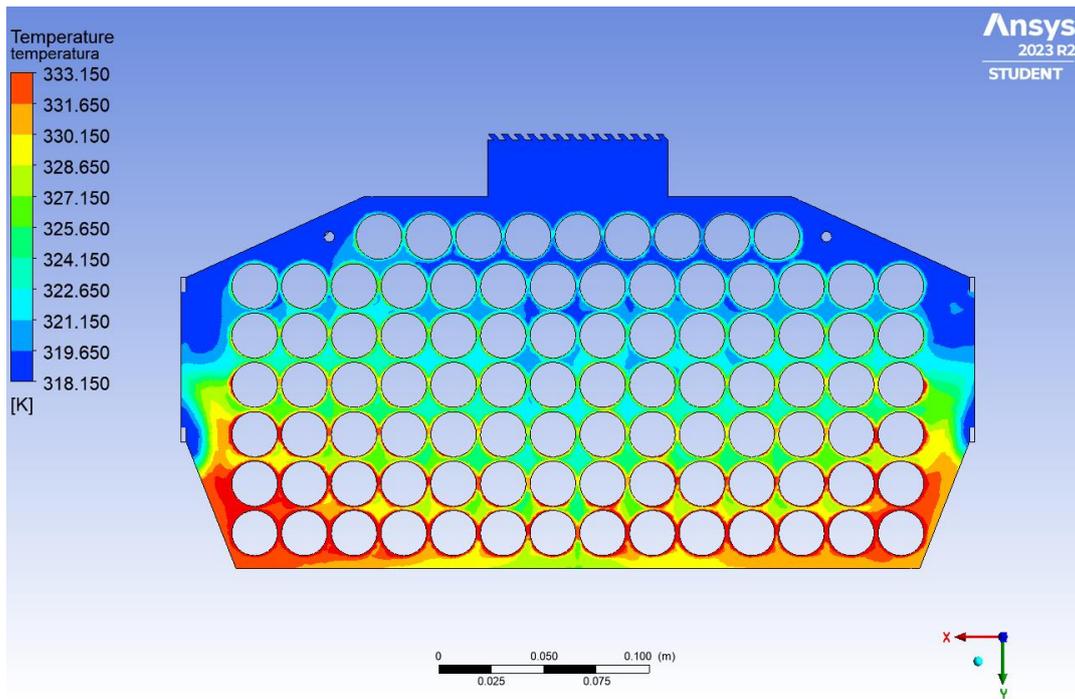


Figura 7.21 Mapa de temperaturas de la modificación 3 con 5 m/s

En este caso se puede volver a observar lo mencionado en el 7.1.3, donde se vuelve a observar los dos puntos calientes situados en los extremos inferiores del sistema, en este caso, al tener los ventiladores una velocidad inferior, estos dos puntos son mayores, también se observa que los resultados del sistema no son simétricos, es decir, que la parte derecha no es igual a la parte izquierda de la simulación, esto es debido a la dirección de las entradas de aire superiores, estando estas inclinadas hacia la derecha.

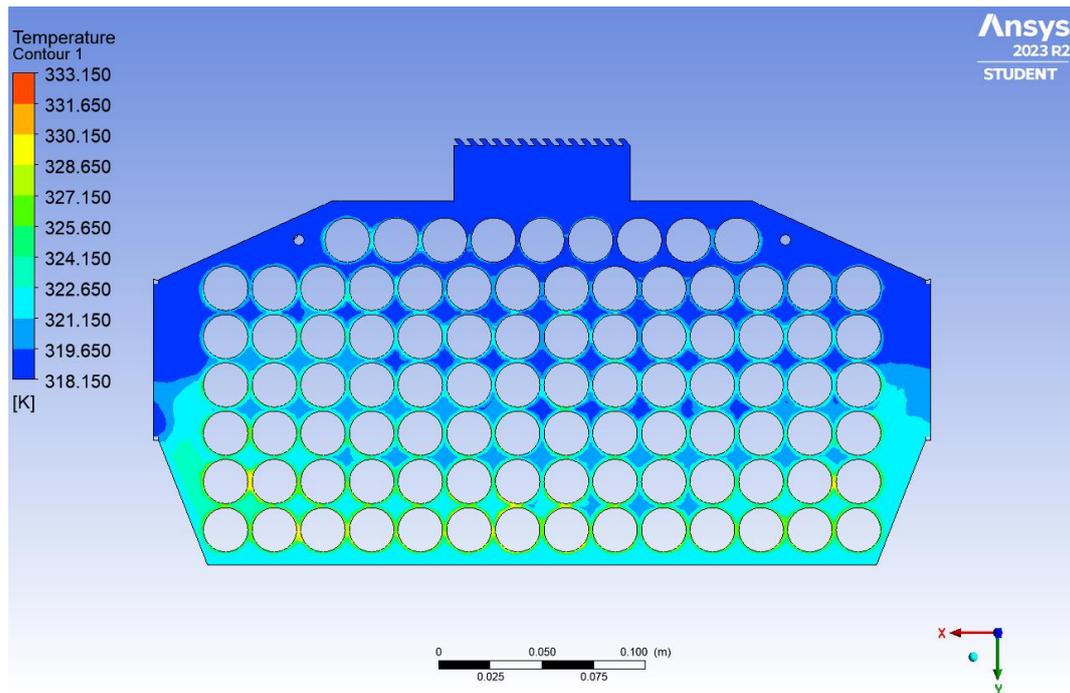


Figura 7.22 Mapa de temperaturas de la modificación 3 con 5 m/s

En esta figura, se observa que aún que el punto caliente sigue estando, este tiene una temperatura inferior a los  $60^{\circ}\text{C}$ , que como se observa también en la Figura 7.17, al tener una mayor velocidad, esta genera una depresión mayor, haciendo que el aire que entra, entre a mayor velocidad, entrando una mayor cantidad de aire, y provocando que la transmisión de calor del sistema aumente.

### 7.2.3. Comparativa del sistema de doble entrada con el sistema de doble salida.

Para finalizar el apartado 7.2, se va a realizar un gráfico comparativo para comparar los dos sistemas, para poder comparar los dos sistemas y tener en cuenta las dos variables obtenidas, la temperatura máxima y la temperatura promedio, se va a hacer una media entre estas dos, considerando esa media como la temperatura promedio de la celda más caliente del sistema, esta va a ser la variable para comparar en el gráfico, los datos obtenidos se presentan en las Tabla 7.7 Tabla con los valores de las temperaturas máximas de celda y Figura 7.23.

T celda más caliente (°C)		
velocidad (m/s)	Doble entrada	Doble salida
5	69,928	69,0495
7,5	64,5875	62,8555
10	61,4785	60,5865
12,5	58,8115	58,599
15	57,3545	56,851

Tabla 7.7 Tabla con los valores de las temperaturas máximas de celda

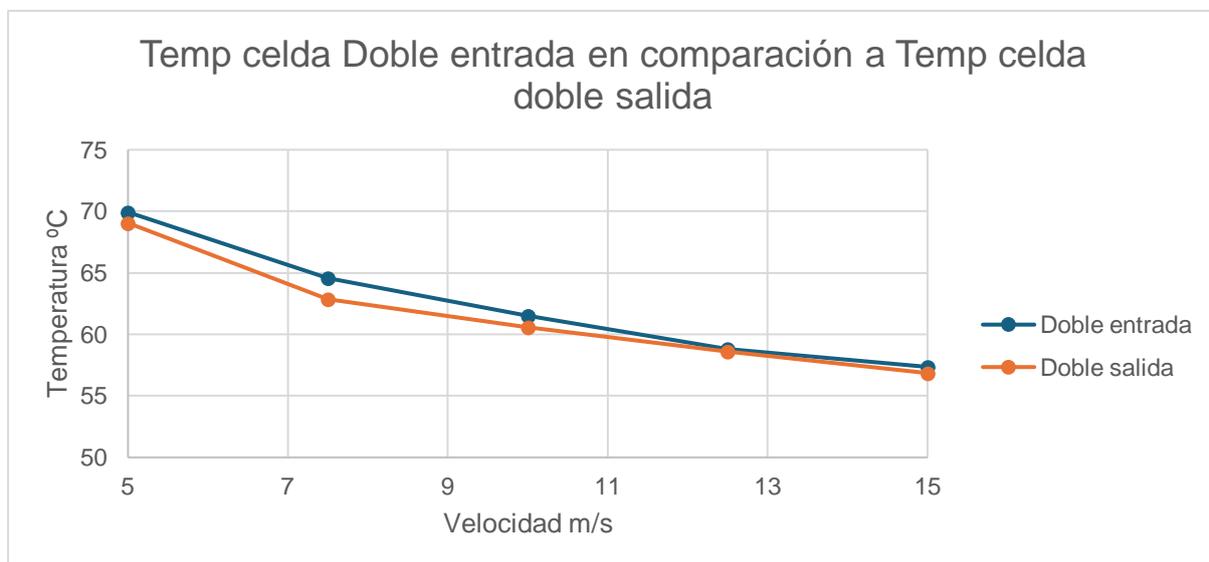


Figura 7.23 Grafica comparativa con los valores de la temperatura máxima de celda

Como se puede observar, tanto en la Figura 7.23, como en la Tabla 7.7, el sistema de doble salida es ligeramente superior en todo el recorrido, destacando al inicio, pero poco a poco se van igualando los dos sistemas, así que siendo el sistema de doble salida superior al de doble entrada, este es el modelo geométrico que se va a usar. Siguiendo con la temperatura de celda, se observa como a partir de 12,5 m/s se obtienen temperaturas inferiores a los 60°C, pero como el cálculo realizado es un promedio, se deberá realizar una nueva simulación con la que poder valor obtener un valor más exacto de la celda, para saber si realmente cumple con los requisitos.

### 7.3. Modificación de ángulos de entrada y salida

Una vez visto el efecto del cambio de velocidades en el sistema, se procede a realizar simulaciones cambiando el ángulo de salida de los ventiladores para estudiar si se puede conseguir bajar la temperatura máxima de la celda, respecto al modelo que se va a utilizar este va a ser el sistema con la doble salida de aire, y se va a usar una velocidad de 5 m/s, para poder ver con facilidad el efecto.

Una vez comentado, se procede a mostrar los datos obtenidos mediante una tabla y una gráfica mostradas en la tabla y figura mostradas a continuación.

ángulo (°)	T máxima (°C)	T promedio (°C)
-40	92,228	58,707
-30	83,741	57,41
-20	81,083	56,608
-15	79,71	56,346
-10	78,91	56,175
-5	78,756	56,083
0	78,334	56,045
5	78,657	56,078
10	79,255	56,187
15	79,657	56,356
20	80,044	56,62
30	83,367	57,413
40	90,93	58,729

Tabla 7.8 Resultados de las simulaciones con el sistema de doble salida y cambio de ángulo

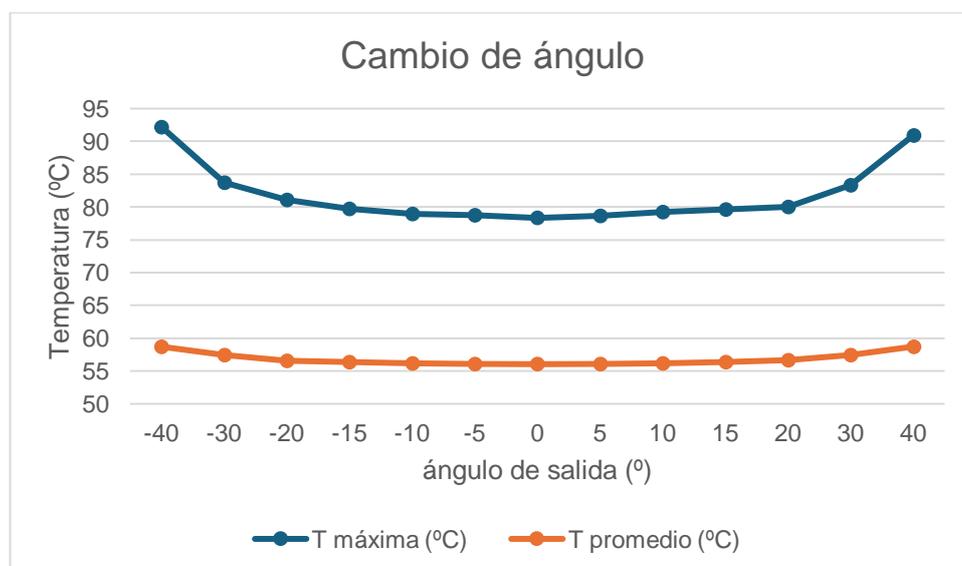


Figura 7.24 Gráfica del resultado de las simulaciones con el cambio de ángulo

Empezando por la temperatura máxima, en esta se observa como el ángulo tanto positivo como negativo provoca que suban las temperaturas máximas de superficie, notando que de  $+5$  a  $+15$  esta incrementa muy poco, pero a partir de  $+15$  hasta  $+40$ , esta incrementa considerablemente más, respecto a la temperatura promedio, esta se mantiene bastante estable, obteniendo datos similares a la temperatura máxima, viendo como a partir de  $+15$ , incrementa considerablemente más respecto al tramo de  $0$  a  $+15$ .

A continuación, se compararán la simulación con un ángulo de salida de  $0^\circ$  y la simulación de un ángulo de  $-40^\circ$  siendo este último el que mayor temperatura máxima presenta.

Procediendo primeramente con los mapas de velocidades internas de las simulaciones mencionadas, presentados en las figuras adjuntas a continuación.

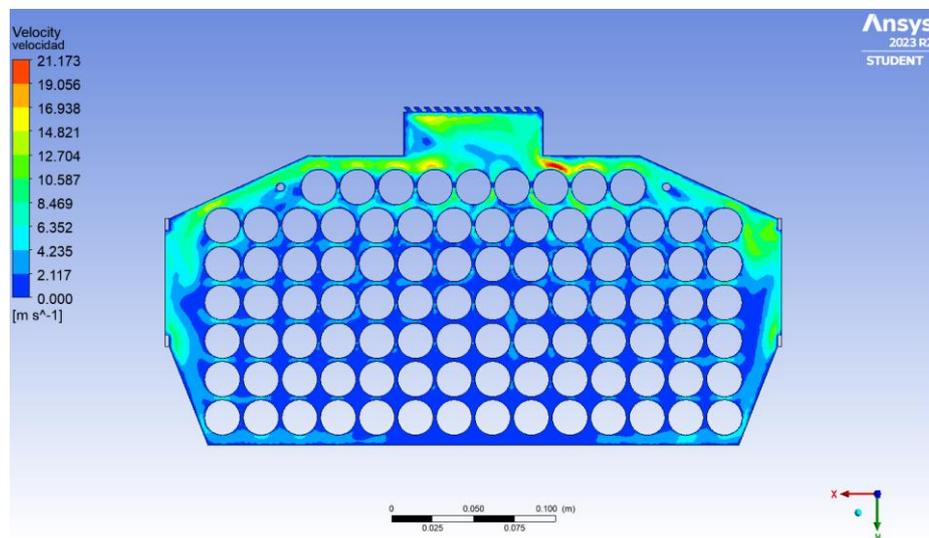


Figura 7.25 Mapa de velocidades internas de la simulación con un ángulo de  $0^\circ$

En esta Figura 7.25, que es la misma que se ha visto en el 7.2.2, se le ha modificado la leyenda junto con la escala de colores y valores para poder observar mejor los resultados y poder compararlos, viendo como que si bien es cierto que han aparecido nuevas regiones con valores de  $2.11$  m/s, mostrando que el aire llega a más celdas, este, teniendo una velocidad baja, esta no es suficiente para reducir la temperatura lo necesario.

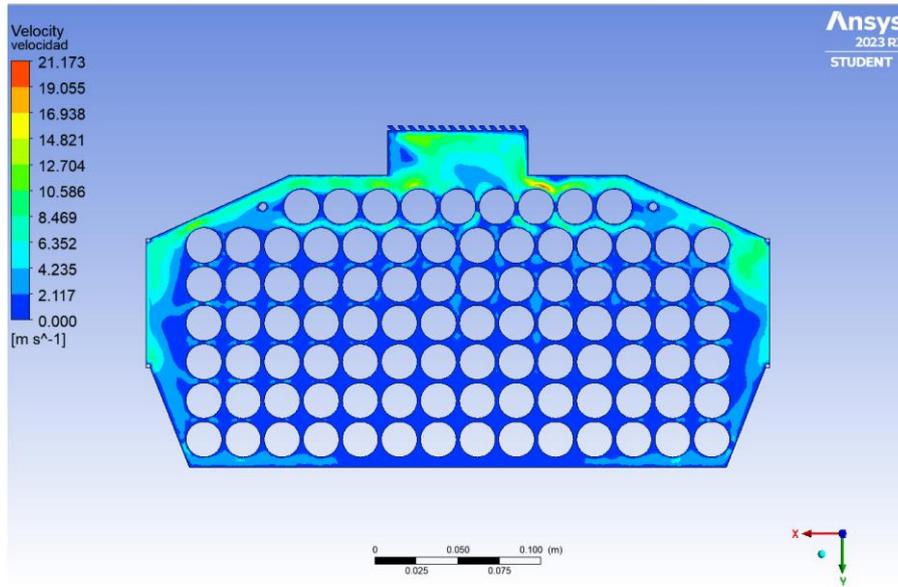


Figura 7.26 Mapa de velocidades internas de la simulación con un ángulo de  $-40^\circ$

Respecto a esta, se puede observar que al introducir un ángulo de  $-40^\circ$  este actúa negativamente, bajando la velocidad general del sistema y provocando que este mueva una menor cantidad de flujo de aire.

Una vez analizados los mapas de velocidades internas, se proceden a observar las temperaturas de las celdas, presentadas en las figuras mostradas a continuación.

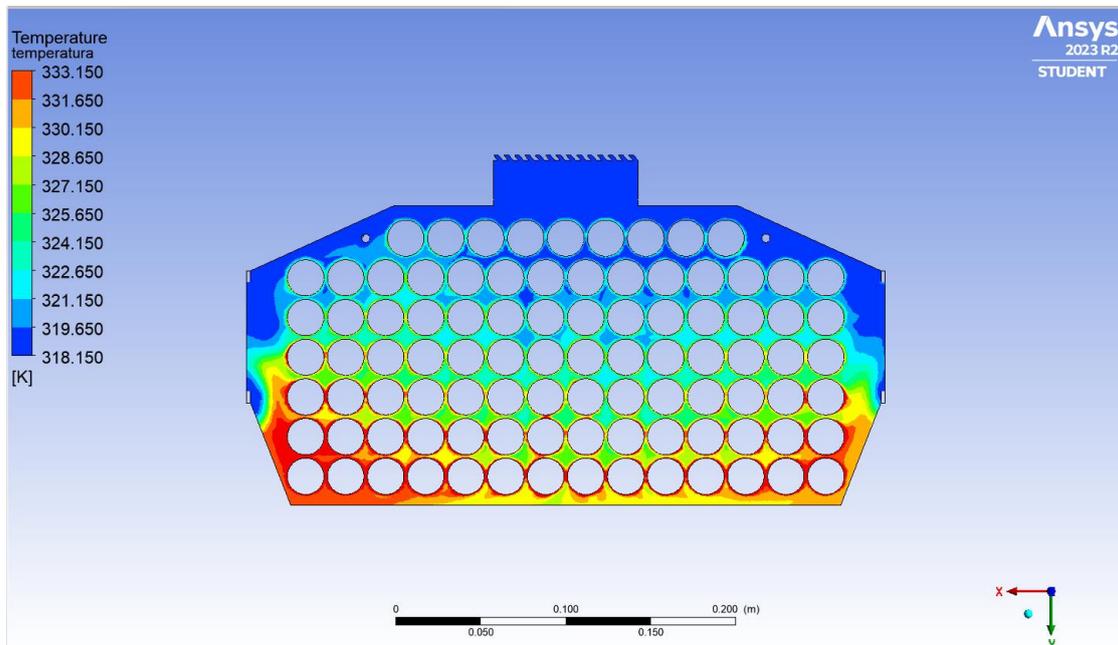


Figura 7.27 Mapa de temperaturas internas de la simulación con un ángulo de  $-40^\circ$

Respecto a esta Figura 7.27, es exactamente el mismo resultado visto en el 7.2, en donde podemos observar 2 puntos calientes situados en los extremos inferiores del paquete.

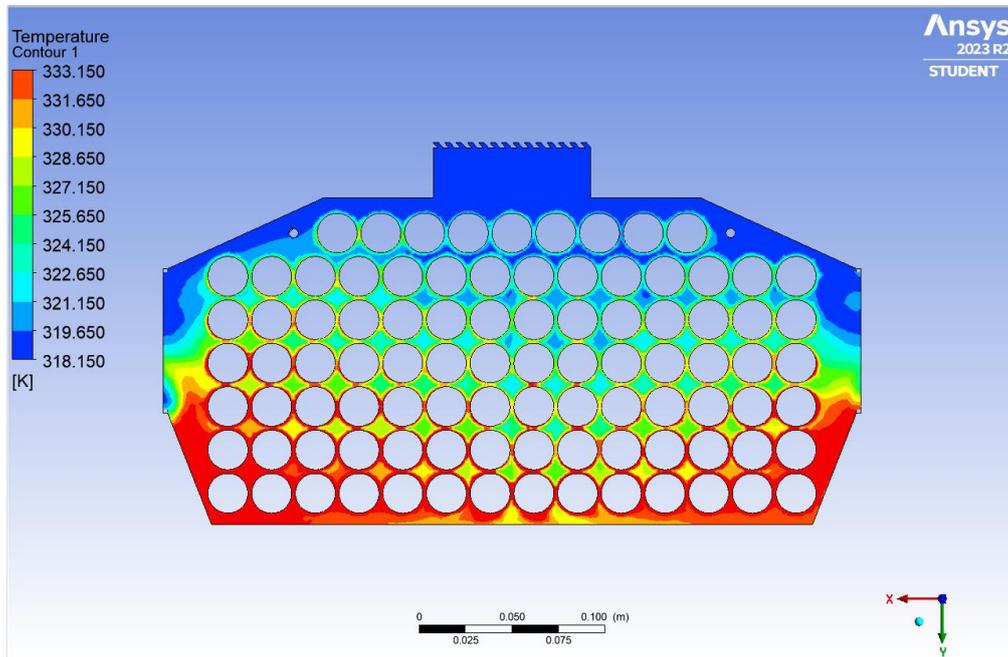


Figura 7.28 Mapa de temperaturas internas de la simulación con un ángulo de  $-40^\circ$

En este caso, se puede observar cómo los puntos calientes observados en la Figura 7.28 han crecido significativamente respecto a la Figura 7.28, esto es debido a las velocidades observadas en los mapas de velocidades, en donde la simulación con los ventiladores en un ángulo de  $-40^\circ$ , tenía menor velocidad que la simulación con los ventiladores en un ángulo de  $0^\circ$ .

En resumen, se ha comprobado como los ángulos en esta geometría, disminuyen la efectividad del sistema, haciendo que la opción que proporciona una mayor disipación sea con las salidas de aire situadas con un ángulo de  $0^\circ$  de inclinación.

## 8. Diseño de refrigeración activa

Una vez estudiado el comportamiento del sistema, iterando diversas veces mediante el cambio de diferentes parámetros, se procede a realizar una propuesta de refrigeración activa, para refrigerar la superficie de las celdas hasta la temperatura determinada por la normativa de la Formula Student Germany [6], es decir, que esta debe ser menor a  $60^\circ\text{C}$ .

## 8.1. Requisitos de refrigeración

Procediendo primeramente por determinar los requisitos necesarios de la refrigeración, los cuales son, primeramente que las celdas estén por debajo de los 60°C, como se ha mencionado anteriormente, seguidamente y como se ha podido observar en el apartado 7, la geometría debe ser la realizada en la tercera modificación, es decir, el sistema con la doble salida de aire, respecto a los ventiladores, estos deben proporcionar una velocidad mayor a los 10 m/s y deben estar situados en un ángulo de 0° y 180°, concretamente el ventilador izquierdo a 180° y el ventilador derecho a 0°.

## 8.2. Dimensionado y elección de ventiladores

Para poder determinar que ventiladores se van a usar, se deberá calcular el caudal que estos deben proporcionar para poder obtener el flujo de aire buscado, también se calculará la pérdida de carga del sistema.

Para calcular el caudal, se utilizará la formula proporcionado a continuación.

$$Q = \frac{V}{t} = A_{entrada} * V_{ventilador} = 0,0038m^2 * 10 \frac{m}{s} * 3600 \frac{s}{h} = 136,8 m^3/h \quad (8.1)$$

Donde:

Q es el caudal (en m<sup>3</sup>/h)

V es el volumen (m<sup>3</sup>)

t es el tiempo (horas)

$A_{entrada}$  es el área de salida del aire (m<sup>2</sup>)

$V_{ventilador}$  es la velocidad de salida (m/s)

Una vez obtenido el caudal mínimo necesario para poder obtener la velocidad buscada, se debe calcular la pérdida de carga del ventilador, obteniendo esta mediante un cálculo en donde se resta la presión de entrada menos la presión de salida, estas dos presiones se obtienen mediante las simulaciones, siendo la presión de entrada de 803.56 Pa y una presión de salida de 645.64 Pa esta se presenta en la siguiente formula

$$\Delta P = P_{entrada} - P_{salida} = 803.56Pa - 645.64Pa = 157.92 Pa \quad (8.2)$$

Una vez obtenida la velocidad y la caída de presión, se procede a buscar ventiladores que tengan un tamaño similar al de la entrada de aire, y que sean capaces de proporcionar ese caudal, resumiendo estos en un ventilador de un tamaño de 80 mm de diámetro con un caudal igual o mayor a 136,8 m<sup>3</sup>/h y que soporten una caída de presión mayor a 157.92 Pa.

Se ha realizado una búsqueda, y se han encontrado varios modelos que superan los 136,8 m<sup>3</sup>/h, los más cercanos a esta cifra son el ventilador SUNON PMD1208PMB1-A (2).GN. [17] que ofrece un caudal total de 142,716 m<sup>3</sup>/h y una caída de presión soportada de 184.327Pa, la otra opción planteada es el ventilador DELTA ELECTRONICS AFB0824GHE [18] que ofrece un caudal total de 168,20 m<sup>3</sup>/h y una caída de presión de 250,46 Pa..

Respecto al ventilador escogido, se escoge el ventilador AFB0824GHE, dado que este es el que ofrece un caudal mayor de los dos, cosa que permite que la haya una mayor refrigeración del sistema, además de aguantar una caída de presión de 250,46 Pa.

Una vez decidido el ventilador, se pasa a obtener cual es la velocidad que este proporciona, para esto se deberá volver a usar la formula usada al principio de este apartado, modificándola un poco, haciendo el cálculo siguiente.

$$V_{ventilador} = \frac{Q}{A_{entrada}} = \frac{168,2 \frac{m^3}{h}}{0,0038m^2 * 3600 \frac{s}{h}} = 12,295 m/s \quad (8.3)$$

Obteniendo una velocidad de salida de 12,295m/s por cada salida lateral.

## **9. Diseño final y simulación numérica del sistema**

Para finalizar la parte técnica, se realizará la simulación del diseño final del paquete, para ver si realmente este cumple con la normativa de competición, este diseño va a tener en cuenta todo el conocimiento obtenido en los anteriores apartados, escogiendo las variables que mejor resultado han dado.

### **9.1. Presentación del diseño final y características de la simulación**

Empezando con la geometría, esta va a ser la geometría vista en el apartado 7.1.3, concretamente en la Figura 7.7, Figura 7.3, Figura 7.3, que es la que mejores resultados ha dado, comprobando estos en el apartado 7.2.3.

Siguiendo con el ángulo de los ventiladores, el cual va a ser de  $0^\circ$  y  $180^\circ$  respectivamente, los resultados de este se han demostrado en el apartado 7.2.3, donde de todos los ángulos que se han simulado, el mejor resultado se ha dado con los ventiladores posicionados en  $0^\circ$ .

Finalmente, el parámetro de velocidad, donde en el anterior apartado 8, se ha escogido y dimensionado el ventilador que se va a usar, junto con sus características para la simulación.

En resumen, se presentan los datos escogidos en la Figura 9.1, Figura 9.1 y la Tabla 9.1, Tabla 9.1 que se presenta a continuación.

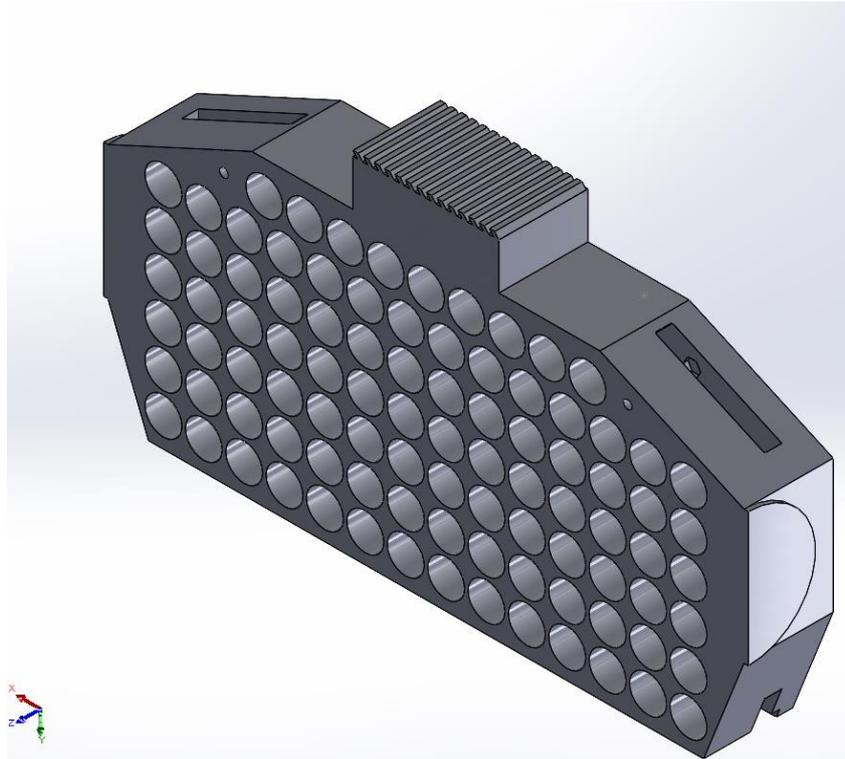


Figura 9.1 Geometría del diseño final del sistema

Concepto	Valor
Geometría	Figura 9.1 Geometría del diseño final del sistema
Dirección de los ventiladores	Hacia el exterior
Ángulo de salida	0°
Caudal	168,2 m <sup>3</sup> /hora
Velocidad	12,295 m/s

Tabla 9.1 Tabla Resumen de las características del diseño final

De cara al mallado, en este se deberá cambiar un parámetro, concretamente, se modifica la selección de celdas como cell wall, excluyendo algunas celdas que tengan una mayor temperatura para poder realizar la temperatura media de estas, para hacer esto primeramente se deberán observar las superficies de todas las celdas para detectar cuales son las más calientes, una vez hecho esto, se detectan que las celdas más calientes son las situadas en inferior del paquete, concretamente las dos situadas en el centro, una vez se hayan determinado estas, se agregaran individualmente como dos “Named selections” independientes para luego poder

tratar estas por separado en el programa de análisis de datos, las dos celdas se pueden ver en la Figura 9.2.

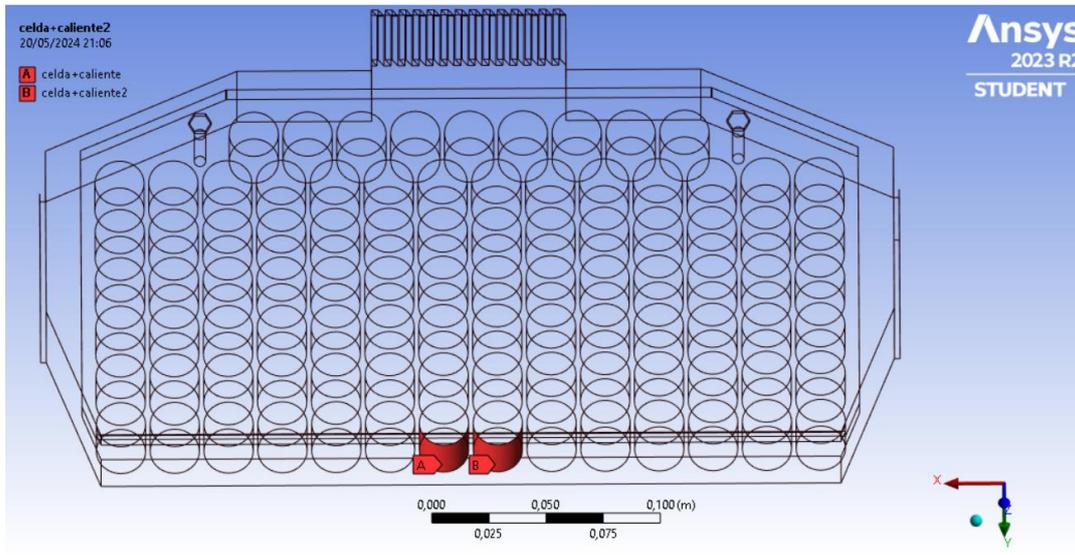


Figura 9.2 Posición de las dos celdas más calientes del sistema

Respecto a la configuración de la simulación, esta va a ser igual a las simulaciones vistas en el apartado 7.27.3, en donde se cambia solamente la velocidad del sistema y se configuraran las dos celdas que se han separado, agregándole el flujo de calor que tienen las demás, es decir  $410,87\text{W/m}^2$ .

Una vez configurado el modelo y la simulación, se realizará esta.

## 9.2. Resultados obtenidos y análisis de estos

Una vez obtenidos los resultados, se procede a analizar los resultados obtenidos, estos se presentan en las Figura 9.3 y Figura 9.4.

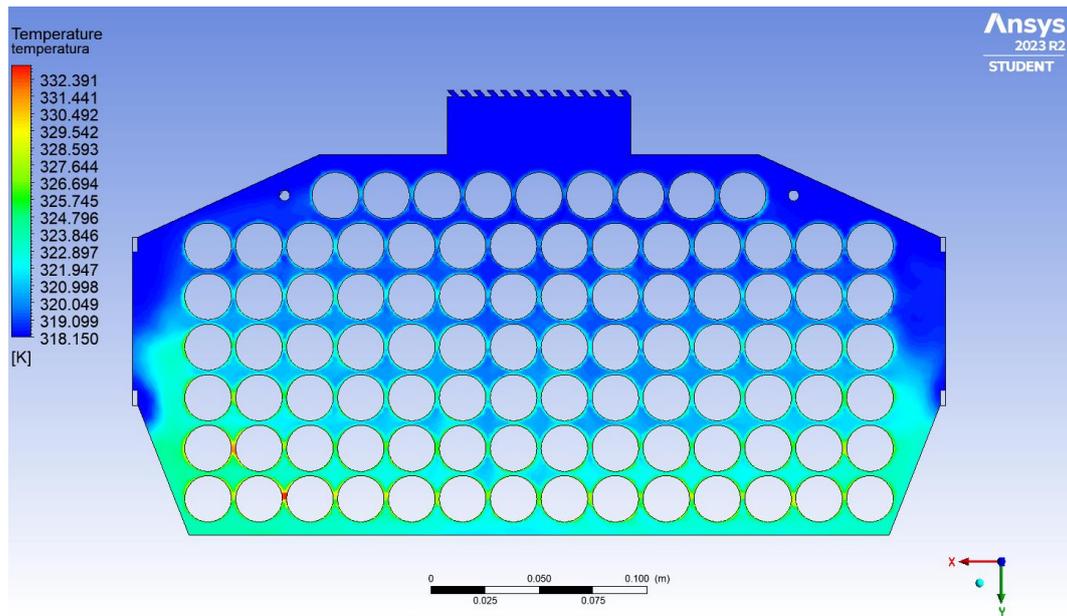


Figura 9.3 Mapa de Temperaturas internas de la simulación

Empezando con el mapa de temperaturas de la Figura 9.3, se observa un resultado similar al obtenido de la simulación realizada en el apartado 7.1.3, concretamente, la Figura 7.12 en donde se realiza una simulación con la misma geometría y mismo ángulo de ventiladores, la única diferencia recae en la velocidad de entrada, la cual es de 10 m/s.

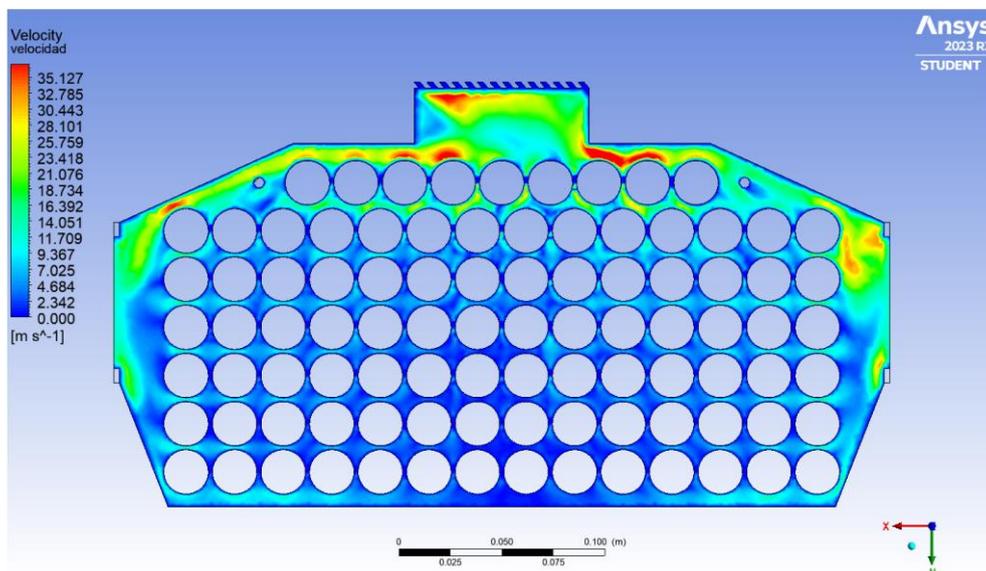


Figura 9.4 Mapa de velocidades internas de la simulación

En este mapa de velocidades de la Figura 9.4, se observa más en detalle las direcciones de las velocidades internas, viendo y comprobando que las dos celdas de mayor temperatura, es decir

las vistas en la Figura 9.2, no tienen casi corriente de aire, cosa que provoca que estas no tengan tanta refrigeración.

Finalmente, se obtienen los valores de las temperaturas máximas y promedio de superficie, también se obtendrán las temperaturas promedio de las celdas más calientes, la mayor de estas dos, se considerarán como la temperatura máxima de la celda más caliente. Estos se presentan en la Tabla 9.2.

Elemento	Temperatura °C
Temperatura máxima de superficie	64,774
Temperatura promedio de superficie	50,821
Temperatura de la celda más caliente 1	55,646
Temperatura de la celda más caliente 2	55,529

Tabla 9.2 Temperaturas máximas y promedio de superficie más las temperaturas de celda más caliente.

### 9.3. Análisis de resultados

Una vez obtenidos todos los mapas y datos, se procede a realizar un análisis de si este sistema cumple con el requisito más importante, la temperatura máxima de celda, la cual debe ser menor a 60°C.

Empezando con el mapa de temperatura de la Figura 9.3, donde se observa como a simple vista solamente se ve un punto cercano a los 60°C, situado en la esquina inferior izquierda, concretamente entre las celdas del extremo inferior, también se observa que las dos celdas más calientes, son las que, de la parte inferior, menos temperatura tienen alrededor, observando el motivo en el mapa de velocidades de la Figura 9.4, y es que al tener una menor corriente de aire, este no disipa tanto calor, manteniéndose este mayoritariamente en la superficie de la celda, sin disiparse tanto en aire colindante.

Respecto a los datos obtenidos de la Tabla 9.2, se observa como si bien es cierto que las temperaturas de superficie máximas siguen siendo mayores de 60°C, la temperatura promedio de la celda más caliente está a 55,64°C, y al considerar esta como la temperatura de la celda más caliente, se puede determinar como el sistema logra cumplir con el objetivo impuesto por la normativa, siendo 55,64°C, menor a 60°C.

## 10. Planificación

En este apartado se presentará la planificación prevista para este proyecto, la cual tiene prevista su inicio el día 15/10/2023, cabe destacar que este proyecto se ha elaborado teniendo en cuenta las diversas fechas de entrega del proyecto, siendo la primera el 15 de marzo, donde se presentará la memoria intermedia, y finalmente el 3 y 4 de junio, donde se presentará la memoria final.

Para realizar este proyecto se han planteado las tareas siguientes:

1. Estudio sobre las necesidades de la batería; capacidad necesaria y estudio y elección de las celdas.
2. Estudio y elección del tipo de sistema de refrigeración que se va a usar.
3. Realizar la primera propuesta de disposición y configuración eléctrica de la batería.
4. Encontrar los datos necesarios del vehículo (velocidad media, potencia requerida, Potencia disipada...)
5. Realizar la documentación de los procesos anteriores
6. Realizar cálculos del sistema de refrigeración pasiva
7. Validación de los cálculos mediante simulación
8. Documentación de los pasos anteriores
9. Iterar con diversos parámetros del sistema
10. Realización de cálculos del sistema de refrigeración activa
11. Propuesta de diseño final del sistema de refrigeración
12. Validación del diseño final del sistema mediante simulaciones
13. Análisis de los resultados
14. Redacción final de la memoria.

Hecho el planteamiento, se realiza una planificación con las tareas, indicando la precedencia y la duración aproximada en días de estas.

<b>Nº Tarea</b>	<b>Duración (horas)</b>	<b>Precedencia</b>
1	15	-
2	15	-
3	18	1;2
4	15	3
5	36	-
6	30	5;4

7	30	6
8	30	7
9	60	7;8
10	15	9
11	30	10
12	45	11
13	30	12
14	60	13

Tabla 10.1 Tabla descriptiva de tanto tiempos como precedencia de las tareas

Respecto a la duración de las tareas, esta se ha dado en días, teniendo en cuenta que se dedicaran 2h diarias al proyecto, también se ha tenido en cuenta tanto las fechas de exámenes del primer trimestre como las del segundo trimestre y las festividades que vienen con ellas, es decir semana santa y navidades, contando con que en ese tiempo se prevé que los avances sean menores, así que en ese tiempo no se asignará ninguna tarea.

En esta planificación también se han realizado planes de contingencia, teniendo las siguientes consideraciones:

- Primeramente, el proyecto termina 18 días antes de la entrega final.
- A partir del segundo trimestre la carga de asignaturas disminuye, pudiéndole dedicar más de 2h diarias si estas fuesen necesarias.
- Durante la semana de exámenes no hay clase, cosa que permite que se le puedan dedicar algunas horas si el proyecto tope con algún imprevisto

A continuación, se presenta el diagrama de Gannt de la planificación del proyecto.

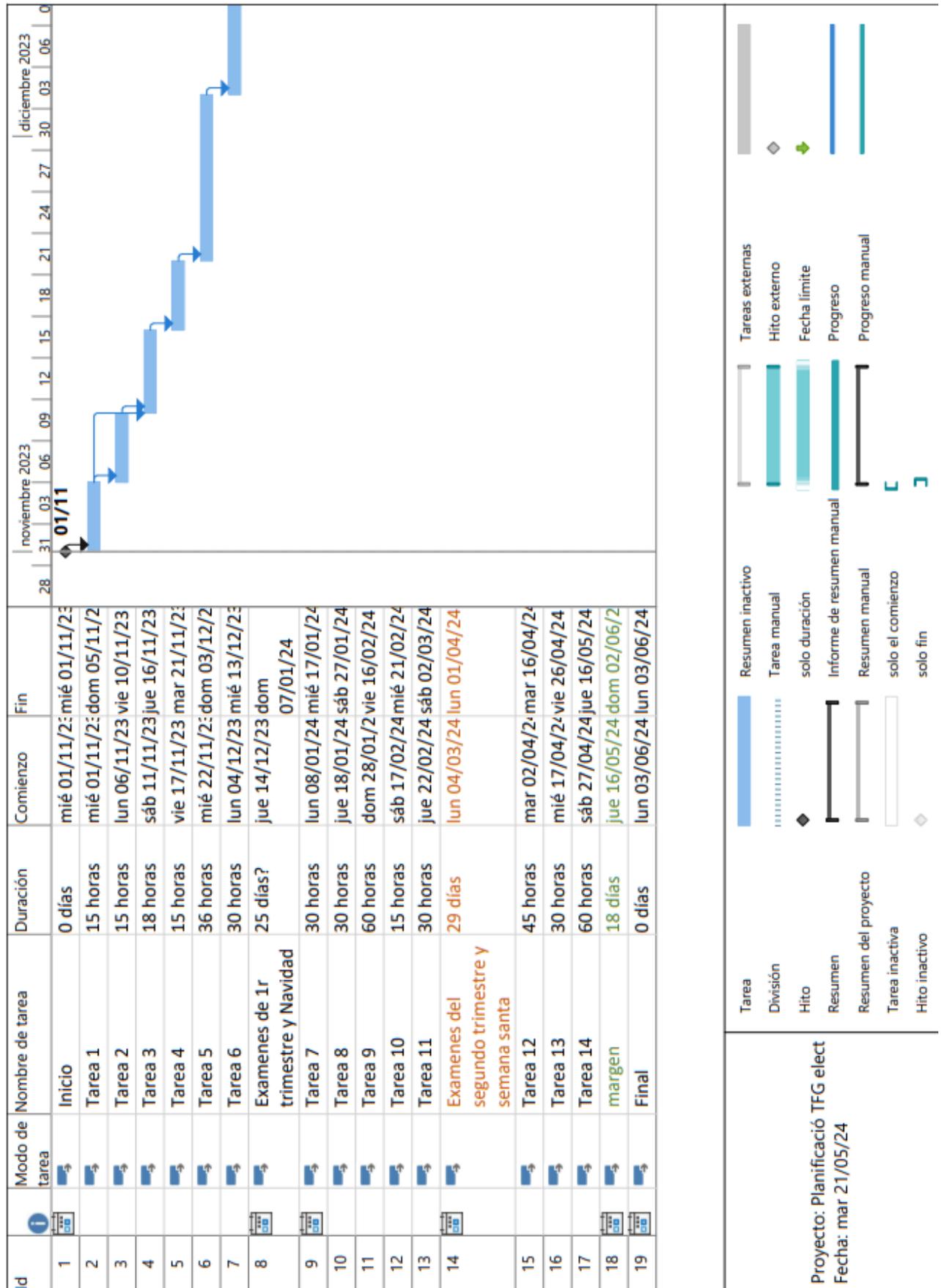


Figura 10.1 Diagrama de Gantt de la planificación del proyecto

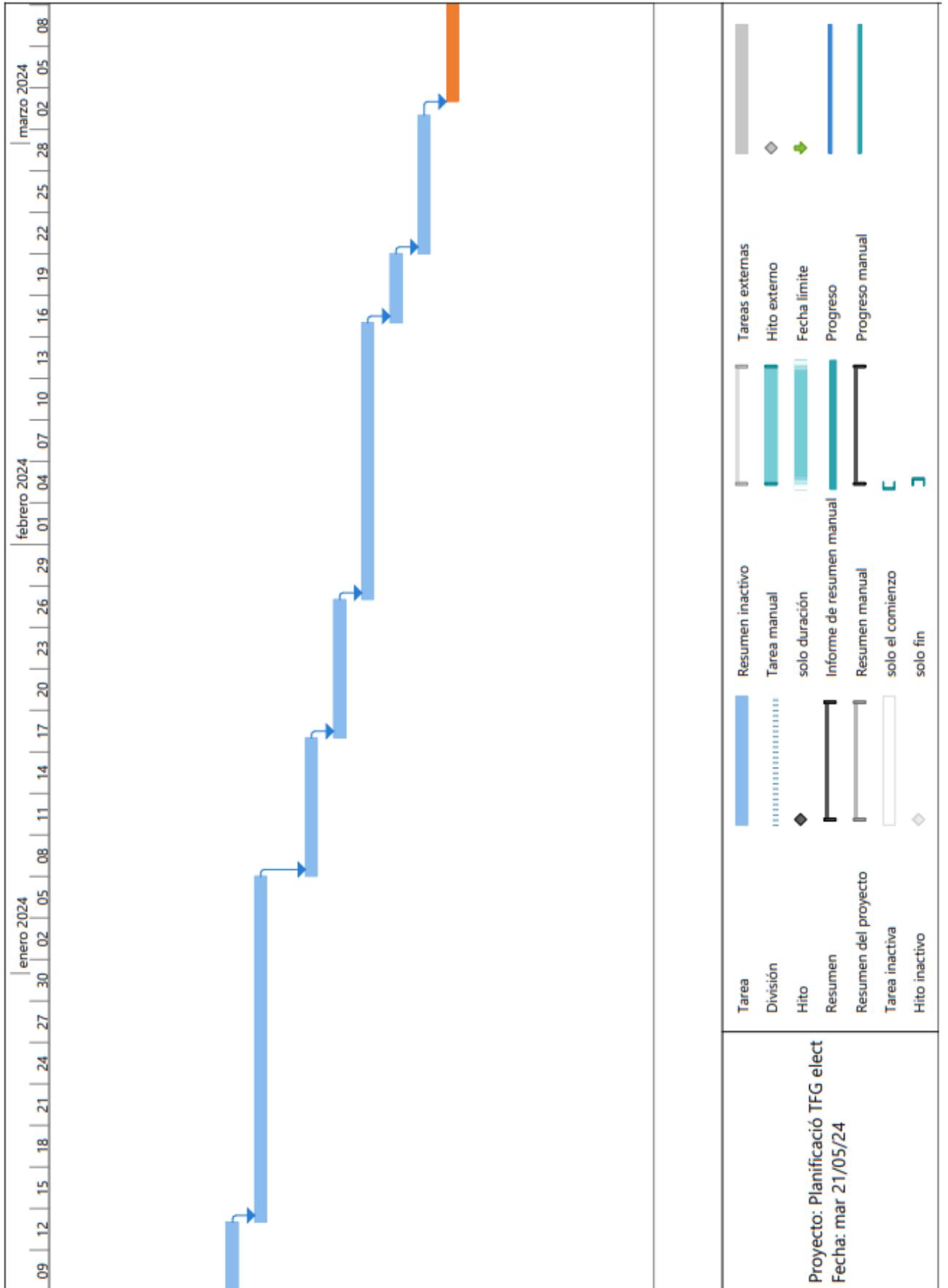


Figura 10.2 Continuación del diagrama de Gantt de la planificación del proyecto

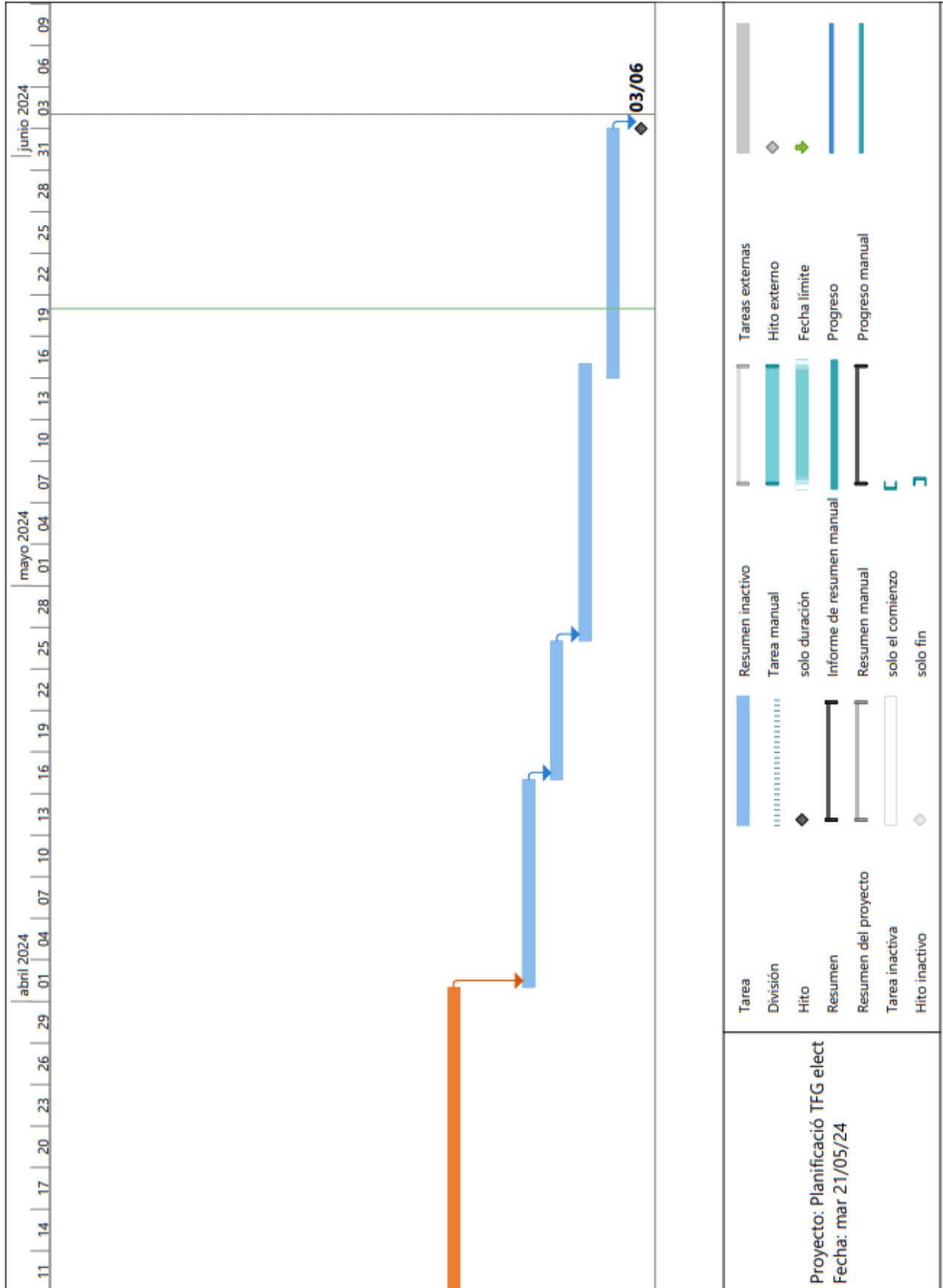


Figura 10.3 Final del diagrama de Gantt de la planificación del proyecto

## **10.1. Desviaciones en la planificación**

Respecto a las desviaciones que ha tenido el proyecto, estas han sido bastante pocas, siendo la más importante, el retraso en la elaboración de las simulaciones, esto fue debido a que, a mitad de las distintas simulaciones, se encontró una propuesta mejor, y se tuvieron que repetir la gran mayoría de estas, para poder comparar correctamente estas.

También ha habido otro problema externo al proyecto, este ha sido debido al proyecto que se estaba llevando a cabo en paralelo justo con la misma fecha de entrega, complicándose este y haciendo que se tengan que redistribuir las horas dedicadas a este.

Estos dos imprevistos han hecho que el proyecto se retrase 4 días de la planificación hecha, esta información se tendrá en cuenta para realizar otros proyectos en un futuro, para acotar correctamente los márgenes de las planificaciones de estos.



## **11. Impacto medioambiental**

Respecto a los componentes del monoplaza y del sistema que suponen un riesgo medioambiental, se abarcan desde los componentes eléctricos más pequeños hasta componentes de mayor tamaño e importancia, como el paquete de baterías en sí.

En este caso, el mayor impacto medioambiental dentro del monoplaza se basa principalmente en el impacto que tienen las celdas que componen el paquete de baterías en todas sus fases. Desde que se aprovisionan y ensamblan los materiales necesarios, pasando por su uso durante las competiciones y terminando en el fin de la vida útil y en cómo se reciclan estas.

El principal problema con las baterías para el medio ambiente es principalmente su composición de litio, el cual presenta distintas problemáticas. La primera es su alta peligrosidad a la hora de accidentes o incendios, ya que pueden liberar gases, humos y vapores de alta toxicidad. Por no hablar del envenenamiento que pueden llegar a sufrir las reservas de agua y la vida silvestre local. [19]

Otra problemática es su extracción, ya que, aparte de desforestar y desestabilizar los paisajes de las zonas de las cuales se extrae el material en su forma primaria, esta extracción requiere de millones de litros de agua, lo que provoca la pérdida de enormes cantidades de agua de los ecosistemas año tras año. [20]

Debido a que el impacto medioambiental es muy extenso, en los anexos del documento, se encontrarán una serie de tablas de valoración del impacto medioambiental del proyecto, donde se presentará este con más detalle.

## **12. Perspectiva de género**

Debido a que este trabajo se orienta en el diseño de un producto tecnológico, como es un sistema de refrigeración para un monoplaza eléctrico, lo adecuado es enfocar la perspectiva de género en cómo se usará el monoplaza, donde irá implementado el sistema.

Lo primero en abordar son las necesidades, que se presentan diferenciadas por el género en lo referente al uso del monoplaza. Es decir, el monoplaza consta de una serie de especificaciones de uso para que pueda sacar su máximo rendimiento, estas características se pueden relacionar, más que con el género en términos de peso, altura y anchura de la persona que se disponga a conducir el monoplaza durante las diferentes pruebas.

Si se tienen en cuenta los factores que afectan a la potencia final del monoplaza, como el peso de los componentes, la gravedad y otros mencionados en la tabla 4.2, se pueden obtener los valores para que el monoplaza esté en su velocidad ideal que es de 70 km/h.

Primeramente, el objetivo es clarificar que existe una estrecha relación entre el peso del piloto y la potencia necesaria del monoplaza para mantenerse en valores competitivos. En la tabla siguiente se presentan seis valores dentro del intervalo de pesajes que hay en el equipo.

PESO DEL PILOTO	POTENCIA NECESARIA
45 kg	13055,87 W
55 kg	13168,35 W
65 kg	13280,83 W
75 kg	13393,30 W
85 kg	13505,78 W

Tabla 12.1 Peso y potencia

Si bien en España los datos estadísticos que proporciona el Instituto Nacional de Estadística [21] muestran que el 37% de los hombres se encuentran en su peso ideal y que el 50% de las mujeres también. Teniendo en cuenta que el peso promedio de los hombres en España es de 77 kg y el peso promedio de las mujeres es de 63 kg.

Por lo que en el caso del pilotaje del Voltcat-24, los candidatos ideales para que llegue a la potencia necesaria son, o bien mujeres con medidas standard o hombres que estén por debajo de la media en términos de peso y altura.

## **13. Conclusiones**

El estudio y dimensionado de la refrigeración de un monoplaza de competición ha sido un proyecto interesante y a la vez complejo, este proyecto ha servido como una pequeña introducción a la mecánica de fluidos, profundizando sobre todo en el mundo de la simulación numérica y de refrigeración, habiendo aprendido el funcionamiento tanto de programas de simulación CFD como el Ansys, que son programas los cuales se usan a diario para realizar diseños en el ámbito profesional que no se ven demasiado durante la estancia en la universidad.

También ha servido para formar parte de un proyecto muy interesante que aporta una visión muy similar a como se trabaja en el mundo real, el Voltcat-24. Es decir, con el trabajo de un equipo de ingenieros, en donde cada integrante diseña una parte de un conjunto, donde finalmente todas las partes funcionan y encajan a la perfección, siendo este proyecto una de las partes requeridas para que el monoplaza funcione.

Procediendo con los resultados del proyecto, estas han sido positivas, obteniendo el resultado esperado, cumpliendo los objetivos del proyecto, habiendo dimensionado y diseñado la distribución de una batería de un vehículo eléctrico, también se ha realizado el dimensionamiento de un sistema de refrigeración activa, habiendo iterado con distintos parámetros hasta encontrar un sistema capaz de cumplir normativa, el diseño final, es capaz de mantener las celdas a una temperatura máxima de  $55,64^{\circ}\text{C}$  situada por debajo de la requerida por la normativa, la cual es de  $60^{\circ}\text{C}$ .

Respecto a las líneas de mejora del proyecto, estas pasan por realizar una batería con celdas tipo pouch teniendo una menor cantidad de strings, diseñada con frenada regenerativa, reduciendo la capacidad y el espacio necesario para estas, así como implementar una refrigeración apta para estas, siendo la refrigeración líquida una de las propuestas más interesantes.

## 14. Bibliografía

- [1] Institution of Mechanical Engineers , «HISTORY OF FORMULA STUDENT,» [En línea]. Available: <https://www.imeche.org/events/formula-student/about-formula-student/history-of-formula-student>.
- [2] Wikipedia, «Fórmula Student,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula\\_Student](https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula_Student).
- [3] TCM MotorSports , «TCM MotorSports,» [En línea]. Available: <https://tcmotorsports.es/>.
- [4] Formula Student Spain, «Formula Student Spain,» [En línea]. Available: <https://www.formulastudent.es/>. [Último acceso: 2024 5 21].
- [5] Formula Student Portugal, «Formula Student Portugal,» [En línea]. Available: <https://www.formulastudent.pt/>. [Último acceso: 21 05 2024].
- [6] Formula Student Germany, «Formula Student rules 2024,» [En línea]. Available: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2024/rules/FS-Rules\\_2024\\_v1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.0.pdf). [Último acceso: 9 1 2024].
- [7] 이. y. 박병학, «THERMAL MANAGEMENT SYSTEM OF BATTERY FOR ELECTRIC VEHICLE». Patente KR102120157B1, 2020.
- [8] M. CHONGMAO, Y. XIAOQING, W. XIHONG y H. YONGHAN, «Electric vehicle battery thermal management device and thermal management method». China Patente CN111312954A, 2020.
- [9] C. B. R. [US] y H. C.-C. [US], «Method for thermal management and mitigation of thermal propagation for batteries using a graphene coated polymer barrier substrate». Estados Unidos Patente US9196939B2, 2015.
- [10] G. de la Ossa, Disseny d'un BMS per a un monoplaça elèctric de FSAE, 2023.
- [11] F. Leotta, «Design of a Battery Pack for a Formula SAE Racing car,» [En línea]. Available: <https://webthesis.biblio.polito.it/15660/1/tesi.pdf>. [Último acceso: 7 1 2024].

- [12] G. Giraldo, «CFD Modeling, Analysis, and Online Simulation For Beginners,» [En línea]. Available: <https://www.simscale.com/blog/cfd-analysis-for-beginners/>.
- [13] Y. A. Ç. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa*, Mc Graw Hill, 2011.
- [14] Moricel, «INR 21700-P45B Datasheet,» Moricel, [En línea]. Available: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2023/news/20230919\\_Tesla/INR21700P45B.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/news/20230919_Tesla/INR21700P45B.pdf). [Último acceso: 7 1 2024].
- [15] COSMX, «95B0D0HD Datasheet,» COSMX, [En línea]. Available: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2023/news/20230919\\_Tesla/CA95B0D0HD.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/news/20230919_Tesla/CA95B0D0HD.pdf). [Último acceso: 7 1 2024].
- [16] COSMX, «82D6J7 Datasheet,» COSMX, [En línea]. Available: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2023/news/20230919\\_Tesla/CA82D6J7.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/news/20230919_Tesla/CA82D6J7.pdf). [Último acceso: 7 1 2024].
- [17] SUNON, «Datasheet PMD1208PMB1-A (2).GN,» 13 06 2014. [En línea]. Available: <https://www.farnell.com/datasheets/1921286.pdf>. [Último acceso: 2024 04 13].
- [18] DELTA ELECTRONICS, «Datasheet AFB0824GHE,» 05 05 2008. [En línea]. Available: <https://www.farnell.com/datasheets/3093110.pdf>. [Último acceso: 2024 04 13].
- [19] emtez, «emtez,» [En línea]. Available: <https://www.emtez.es/blog/el-impacto-ambiental-de-las-bater%C3%ADas-de-iones-de-litio#:~:text=Un%20incendio%20de%20iones%20de,de%20destruir%20extensas%20%C3%A1reas%20forestales..>
- [20] Oficina Regional en Argentina / Fundación Humedales, «Wetlands international,» [En línea]. Available: <https://lac.wetlands.org/noticia/extraccion-de-litio-en-argentina-su-impacto-en-el-ambiente-y-los-seres-humanos/#:~:text=La%20extracci%C3%B3n%20de%20litio%20por,agua%20dulce%20al%20entrar%20en.>
- [21] INE, «Instituto Nacional de Estadística,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t00/mujeres\\_hombres/tablas\\_1/10/&file=d06001.px#\\_tabs-grafico.](https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?path=/t00/mujeres_hombres/tablas_1/10/&file=d06001.px#_tabs-grafico)

- [22] J. S. PÉREZ, «MODELADO DE SISTEMAS DE GESTIÓN,» 2021. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/174149/Sanchez%20-%20Modelado%20de%20sistemas%20de%20gestion%20termica%20en%20baterias%20para%20vehiculos%20hibridos%20mediante%20el...pdf?sequence=1>.