

# Máster Universitario en Ingeniería Industrial

## Trabajo Fin de Máster

### **Empaquetamiento y refrigeración del sistema de baterías de una moto eléctrica de competición"**

Autor/a: Justo López Palomo

Tutor/a: Viana Lida Guadalupe Suárez

*La publicación de este Trabajo Fin de Máster solo implica que el estudiante ha obtenido al menos la nota mínima exigida para superar la asignatura correspondiente, no presupone que su contenido sea correcto, aunque si aplicable. En este sentido, la ULL no posee ningún tipo de responsabilidad hacia terceros por la aplicación total o parcial de los resultados obtenidos en este trabajo. También pone en conocimiento del lector que, según la ley de protección intelectual, los resultados son propiedad intelectual del alumno, siempre y cuando se haya procedido a los registros de propiedad intelectual o solicitud de patentes correspondientes con fecha anterior a su publicación.*

## Índice general

Objetivo .....	5
Alcance .....	5
Especificaciones .....	5
Introducción.....	5
Estado del arte .....	6
Metodología.....	7
Análisis del circuito .....	8
Selección de celdas .....	11
Modelo térmico .....	12
Material.....	12
Potencia calorífica .....	12
Conductividad térmica.....	13
Experimento con termistores .....	13
Modelo térmico para una celda .....	16
Estudio térmico sistema de baterías.....	19
Pack de 24 unidades .....	19
Pack de 10x24 celdas.....	22
Pack de 30x24 celdas.....	25
Sistema de refrigeración .....	29
Estudio térmico del sistema de refrigeración .....	33
Transferencia de calor de un cilindro por convección forzada.....	37
Comparación estudio analítico frente a simulación de calor disipado .....	38
Resultados.....	40
Estudio térmico en condiciones de funcionamiento reales.....	40
Soluciones alternativas .....	45
Conclusiones.....	49

Bibliografía .....	51
Anexo 1 - Código Matlab: Cálculo analítico de transferencia de calor del paquete de baterías .....	52

## Índice de figuras

Figura 1 Sectorización circuito Motorland Aragón .....	9
Figura 2 Diagrama esfuerzos en el avance de una moto de rueda delantera, trasera y chasis .	10
Figura 3 Experimento con termistores sobre celda. Colocación de los termistores. ....	13
Figura 4 Experimento con termistores sobre celda. Colocación final de los termistores. ....	14
Figura 5 Experimento con termistores sobre celda. Realización del experimento. ....	15
Figura 6 Experimento con termistores sobre celda. Resultados. ....	15
Figura 7 Evolución de temperatura de una celda (Proyecto TH2.0.1).....	18
Figura 8 Disposición del pack de 24 unidades.....	19
Figura 9 Comparación de flujo de aire para diferentes niveles de mallado.....	20
Figura 10 Distribución de temperaturas en el pack de 24 celdas para una temperatura ambiente de 30 °C .....	21
Figura 11 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para el pack de 24 celdas sin separación.....	21
Figura 12 Distribución del paquete 10x24 celdas .....	22
Figura 13 Temperatura final y líneas de flujo para el pack 10x24 celdas con temperatura ambiente de 17 °C .....	23
Figura 14 Distribución del pack 10x24 con rejilla de unión.....	23
Figura 15 Distribución de temperatura pack 10x24 celdas con rejilla.....	24
Figura 16 Distribución flujo pack 10x24 celdas con rejilla .....	25
Figura 17 Distribución pack 30x24 celdas.....	26
Figura 18 Comparación de flujo para distintos niveles de mallado.....	27
Figura 19 Distribución de temperatura de cada bloque 10x24 que componen el pack 30x24	29
Figura 20 Ventilador SANYO DENKI 978-9WL1448P5G001 .....	30
Figura 21 Modelo completo de la caja de baterías.....	31
Figura 22 Antecámara y elementos que la componen .....	31
Figura 23 Simulación de velocidad de aire en la antecámara .....	33
Figura 24 Modelo caja de baterías .....	34

Figura 25 Área efectiva de entrada de aire (área en blanco) .....	35
Figura 26 Distribución de temperatura y velocidad de aire.....	36
Figura 27 Condiciones ejemplo 7-5 .....	37
Figura 28 Resultados de transferencia de calor de la simulación del ejemplo 7-5.....	38
Figura 29 Potencia calorífica disipada frente a velocidad de aire entre canales .....	39
Figura 30 Potencia calorífica disipada frente a velocidad de aire entre canales (área efectiva corregida).....	40
Figura 31 Curvas características del motor ENGIRO-MS1920 .....	41
Figura 32 Introducción en Solidworks de fuente volumétrica de calor variable en el tiempo .	43
Figura 33 Evolución de temperatura máxima en condiciones realistas de descarga con refrigeración .....	44
Figura 34 Evolución de temperatura máxima en condiciones realistas de descarga sin refrigeración .....	45
Figura 35 Diseño alternativo 1 .....	46
Figura 36 Diseño alternativo 2 .....	46
Figura 37 Diseño alternativo 3 .....	47
Figura 38 Distribución de temperatura máxima del sólido y velocidad del aire. Alternativa 1. ....	48
Figura 39 Distribución de temperatura máxima del sólido y velocidad del aire. Alternativa 2 .....	48
Figura 40 Distribución de temperatura máxima del sólido y velocidad del aire. Alternativa 3 .....	49
Figura 41 Variación de la temperatura máxima del sistema de baterías con y sin sistema de refrigeración .....	50

## Índice de tablas

Tabla 1 Parámetros de diseño de la motocicleta.....	10
Tabla 2 Resultados del análisis de vuelta al circuito .....	11
Tabla 3 Características de la celda Samsung 21700.....	12
Tabla 4 Características físicas del material de una batería Ion-Litio .....	12
Tabla 5 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para una sola celda.....	17
Tabla 6 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para el pack de 24 celdas .....	20
Tabla 7 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para el pack de 10x24 celdas ....	22

Tabla 8 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para el pack de 10x24 celdas con rejilla de unión .....	24
Tabla 9 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para el pack de 30x24 celdas....	28
Tabla 10 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para el pack de 30x24 celdas con refrigeración .....	35
Tabla 11 Resultados de calor disipado por el sistema de refrigeración .....	36
Tabla 12 Resultados de par motor y potencia calorífica producida en una vuelta.....	42

## Objetivo

El objetivo del presente Trabajo Fin de Máster (TFM) es realizar el análisis de evolución de temperatura del paquete de baterías de una motocicleta eléctrica a lo largo del tiempo que dura la carrera en la que ésta competirá, así como evaluar la necesidad de instalar un sistema de refrigeración forzada. Se busca finalizar la sesión sin alcanzar la temperatura de seguridad marcada en 65 °C a la vez que se intentará no superar la temperatura de funcionamiento óptimo de 50° C. Este análisis se realizará mediante herramientas CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), validando los resultados obtenidos analítica y experimentalmente.

## Alcance

El alcance del presente TFM llega hasta la determinación de la necesidad de la instalación de un sistema de refrigeración. El proceso hasta este punto engloba los pasos que parten desde el desarrollo de un modelo válido para una celda individual y la progresiva escalada hasta el paquete completo de baterías, así como su validación experimental y analítica.

## Especificaciones

La herramienta CFD utilizada es el paquete *Fluids* del software Solidworks. Este programa es referente en diseño CAD, mientras que su módulo CFD, pese a no ser su principal característica, resulta ser potente y adecuado para las necesidades a estudiar en el presente trabajo.

Se utiliza, además, el software Matlab con el que se realizará un código para diferentes cálculos.

## Introducción

La Universidad de La Laguna se ha involucrado en el año 2019 en la competición académica denominada Motostudent, concretamente en la categoría de motocicletas eléctricas. Este evento anual consiste en el diseño y fabricación de un prototipo con el cual los alumnos de las universidades involucradas pueden aplicar los conocimientos adquiridos durante sus estudios. El prototipo fabricado será puesto a competir en una serie de pruebas en un evento presencial que se celebrará en el circuito Motorland Aragón.

El objeto de este Trabajo Fin de Máster es el de realizar un estudio térmico del sistema de baterías que alimentará al citado prototipo eléctrico. Se ha de garantizar que el paquete de baterías no supera la temperatura límite de trabajo, analizando si para ello es conveniente la instalación de un sistema de refrigeración forzada. Se utilizará parte del trabajo previo realizado por integrantes del equipo, el cual se refleja en este documento en los apartados correspondientes. Este estudio se realizará, principalmente, mediante herramientas CFD.

## Estado del arte

La electrificación de vehículos en un sector en auge en la actualidad. La necesidad de avanzar hacia un modo de transporte sostenible y con una baja huella de carbono está haciendo que, no solo los grandes fabricantes del sector sino toda la industria, esté apostando por ello. El mundo de la competición está adoptando esta tecnología, tanto con motorización híbrida (Formula 1, LMP1) hasta competiciones totalmente eléctricas (Formula E, Moto E). En este ámbito, surge la categoría eléctrica de la competición universitaria Motostudent.

La propulsión eléctrica se compone de dos elementos principales, el motor eléctrico y el sistema de baterías que alimentan a éste. El presente TFM se centra en este segundo elemento. Mientras el diseño de motores eléctricos es una tecnología muy avanzada y optimizada, mejorar los sistemas de baterías es, actualmente, la obsesión principal de la industria.

La bibliografía consultada para este trabajo puede diferenciarse en dos grupos principales. El primero es aquel que engloba a los textos y artículos centrados en los propios sistemas de baterías, mientras que el segundo grupo reúne tutoriales de software o conceptos físico-térmicos generales. Respecto al primer grupo de textos consultados, es posible subdividirlo a su vez en tres subgrupos.

El primero de ellos son aquellos artículos que hablan sobre los diferentes tipos de baterías y su fabricación en la industria del automóvil. En [2], Wayne Cai hace un pequeño repaso a los tipos de baterías que se han utilizado en la industria del automóvil hasta la actualidad, centrándose en las de ion-litio, que son las más utilizadas hoy en día. Plasma en su texto los principales fabricantes y la composición de los principales tipos de celdas comercializadas. Los principales tipos son las celdas cilíndricas, las prismáticas y el tipo *pouch*. Por último, realiza una exposición de métodos de unión de celdas para fabricar paquetes de baterías. Este subgrupo lo



completa [4]. Este artículo trata más en profundidad los métodos de unión de celdas y las ventajas y desventajas de éstos.

El segundo subgrupo son los artículos que estudian la composición y características físicas de las baterías. En orden de desarrollar un modelo térmico con el que diseñar la refrigeración del paquete de baterías a desarrollar, es imprescindible caracterizar las celdas con las que vamos a trabajar. [1] propone un método para determinar el calor específico de una batería ion-litio, y a partir de los resultados expuestos en este artículo se ha realizado el modelo térmico.

Por último, el tercer subgrupo reúne los artículos centrados en el estudio térmico de baterías. [8] es un trabajo de fin de grado realizado en la Universidad de Chile en el cual se comparan los resultados de un análisis térmico de un paquete de baterías cilíndricas obtenidos mediante el software de simulación Ansys y el estudio analítico realizado en Matlab. En [7] se desarrolla un modelo 3D para estudiar el comportamiento térmico de celdas litio y titanio (LTO) tipo *pouch*. [5] presenta un modelo electro-térmico tridimensional con el que estudiar el comportamiento de una batería ion-litio tipo *pouch*, tanto con una distribución de corriente continua como no uniforme. También estudia el efecto térmico del tamaño de la costura de este tipo de celdas. El cuarto artículo consultado es [6], donde desarrollan un modelo para un conjunto de hasta tres celdas ion-litio (tipo *pouch*). Concretar que el primer tipo de celdas que se planteó utilizar para el prototipo eran tipo *pouch*, aunque finalmente se decidió utilizar unas cilíndricas.

Otra bibliografía consultada ha sido [3], libro de cabecera para temas de transferencia de calor, así como varios tutoriales del software Solidworks [9], [10].

## Metodología

El proceso a seguir parte del análisis del circuito y de una vuelta a éste. El objetivo es conocer los primeros parámetros de diseño para la motocicleta. Con los resultados obtenidos, el quipo puede calcular las necesidades energéticas a satisfacer, eligiendo el sistema de almacenamiento de energía a instalar.

Definido el tipo de celda a utilizar, se desarrolla un modelo térmico que satisfaga los resultados obtenidos experimentalmente para el calentamiento de una de estas celdas. Este experimento se realiza en unas condiciones de descarga constantes y máximas. Una vez hallado dicho

modelo, el problema se escalará hasta el paquete completo de baterías. Para garantizar el funcionamiento de este modelo, se hará una nueva comparación con el estudio analítico del problema.

Finalmente, con un modelo completo, se comprobará el efecto y la idoneidad de la instalación de un sistema de refrigeración forzada, además de la evolución de temperatura esperada con un funcionamiento realista hallado a partir del análisis de una vuelta.

### **Análisis del circuito**

Para conocer las exigencias a la que será sometida la moto en su puesta en pista, se realiza un análisis de una vuelta al circuito Motorland Aragón. Para ello, se utiliza una vuelta *on board* del piloto Andi Farid a lomos de una Moto3 realizada en el año 2017 en condiciones de pista estándar (seco y soleado). Se toma esta referencia ya que las prestaciones de una Moto3 se presuponen muy similares a las del prototipo a diseñar.

Se divide el trazado en diferentes sectores representativos, diferenciando zonas de aceleración y zonas de deceleración. El resultado son 28 sectores de los cuales se han tomado los siguientes datos:

- Velocidad media (a partir de velocidad inicial y velocidad final).
- Longitud.
- Tiempo.

Pese a que en esta vuelta la Moto3 alcanza velocidades superiores a los 210 km/h, el prototipo no superará los 170 km/h marcados por el reglamento. Aun así, los datos que se reflejan en la tabla de resultados (tabla 2) son los registrados en la vuelta con la Moto3, ya que es la referencia real más cercana y un buen punto de partida para comenzar el diseño de la motocicleta.

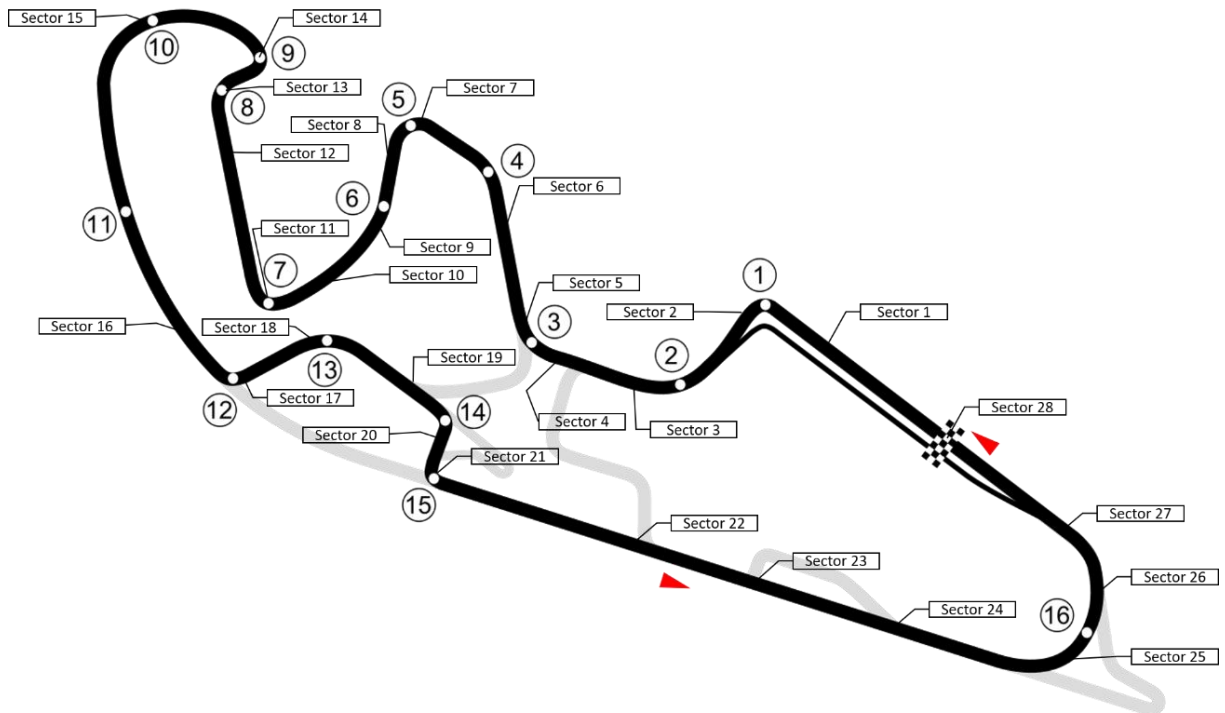


Figura 1 Sectorización circuito Motorland Aragón

El recorrido total de la sesión de carrera está estipulado en 38 km o 7,5 vueltas (Vuelta de formación, 6 vueltas de carrera, media vuelta de regreso a boxes). Las vueltas de formación y regreso se realizarán con una exigencia mínima, centrándonos en las vueltas de carrera. La velocidad utilizada para los cálculos de cada sector será la velocidad media de cada sector.

El momento motriz de la moto ha de vencer dos fuerzas para avanzar, que son la fuerza que el aire ejerce sobre el área frontal y el momento generado por la excentricidad de la huella del neumático en el eje trasero (despreciamos el efecto de este momento en el eje delantero), como se ve en el diagrama de fuerzas (figura 2).

$$M_m = F_a \cdot R_r + N_t \cdot e \tag{1}$$

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot C_x \cdot A \cdot v^2 \tag{2}$$

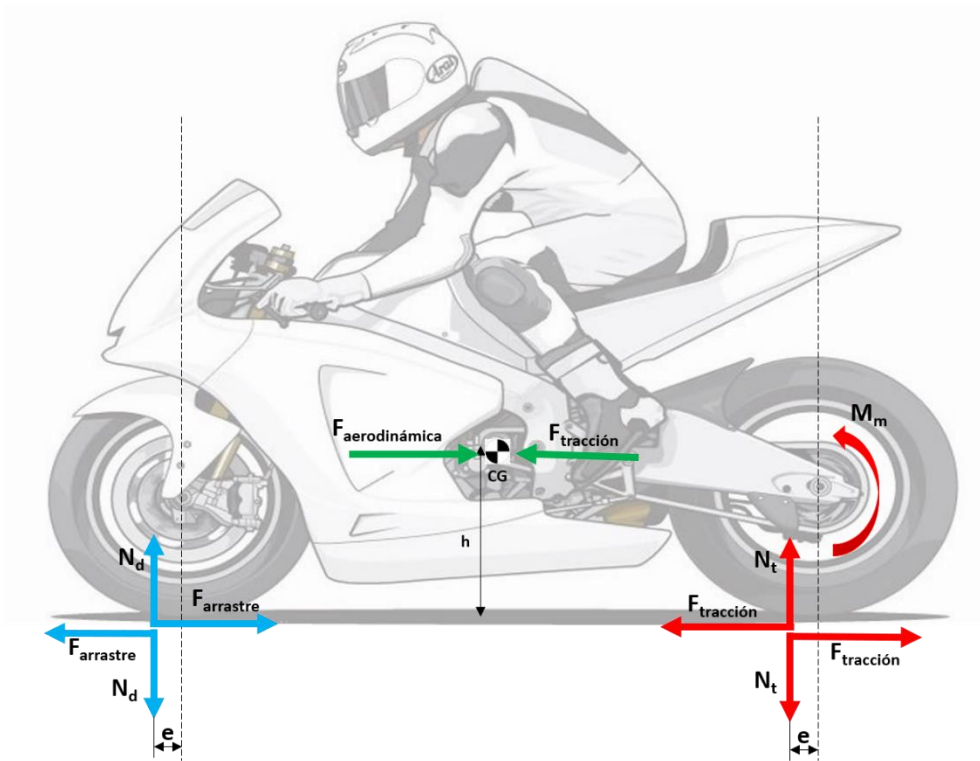


Figura 2 Diagrama esfuerzos en el avance de una moto de rueda delantera, trasera y chasis

Radio rueda [m]	$R_r$	0,296
excentricidad [m]	$e$	0,03
Rel. Transmisión	$R_t$	4,5
Masa [kg]	$m$	200
Peso rueda trasera [N]	$N_T$	1054.575
Densidad aire [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$\rho_{\text{aire}}$	1,226
Coefficiente aerodinámico	$C_x$	0,46
Área frontal [ $\text{m}^2$ ]	$A$	0,6

Tabla 1 Parámetros de diseño de la motocicleta

Se calcula la energía consumida y el par motor necesario en cada uno de los sectores estudiados:

$$E = P \cdot \Delta t = M_m \frac{v}{R_r} \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$T = \frac{(F_a \cdot R_r + N_T \cdot e)}{R_t} \quad (4)$$

Como fruto del análisis realizado surge la tabla 2, donde se plasman todos los resultados obtenidos. Desarrollada esta tabla automatizada en Excel, es posible trasladarla a las características concretas del prototipo y obtener, como se hace en puntos posteriores, la corriente de descarga de las baterías en cada sector. El calentamiento de las baterías está íntimamente ligado a su corriente de descarga. Este punto se desarrollará más adelante en este documento.

Sector	Régimen	Longitud [m]	Tiempo [s]	Tiempo acumulado [s]	Vel. media [m/s]	Aceleración [m/s <sup>2</sup> ]	Fa [N]	Par motor (Nm)	Potencia [kW]	Energía [kJ]
1	Acelerador	98,00	1,75	1,75	59,03	0,79	589,50	46,461	41,001	71,752
2	Freno	184,30	4,90	6,65	42,78	-6,92	309,60	0,000	17,740	86,928
3	Acelerador	239,00	6,90	13,55	36,53	3,10	225,74	22,130	12,085	83,328
4	Acelerador	99,11	2,13	15,67	48,47	1,18	397,52	33,620	24,363	51,772
5	Freno	78,00	2,33	18,00	47,08	-2,27	375,06	0,000	22,608	52,677
6	Acelerador	214,00	4,56	22,56	48,06	1,59	390,71	33,165	23,827	108,531
7	Freno	220,00	5,57	28,12	37,64	-5,04	239,69	0,000	12,978	72,221
8	Acelerador	96,59	3,70	31,82	31,81	4,44	171,15	18,478	8,786	32,466
9	Acelerador	69,65	1,34	33,15	42,36	3,54	303,60	27,338	17,313	23,113
10	Acelerador	106,50	2,15	35,30	47,08	2,20	375,06	32,118	22,608	48,607
11	Freno	133,50	4,19	39,49	38,19	-5,38	246,81	0,000	13,441	56,252
12	Acelerador	232,56	6,18	45,66	37,50	3,42	237,92	22,945	12,864	79,432
13	Freno	152,00	4,99	50,65	36,81	-4,51	229,19	0,000	12,304	61,335
14	Freno	53,19	1,25	51,90	22,92	-4,22	88,85	0,000	4,445	5,556
15	Acelerador	254,95	5,58	57,47	32,36	4,33	177,18	18,882	9,135	50,928
16	Acelerador	451,63	10,91	68,38	50,28	1,07	427,68	35,638	26,787	292,118
17	Freno	166,28	5,25	73,63	41,67	-5,50	293,73	0,000	16,618	87,245
18	Acelerador	152,76	4,45	78,08	34,44	3,25	200,73	20,457	10,534	46,878
19	Acelerador	142,28	2,61	80,68	44,31	2,03	332,11	29,245	19,371	50,462
20	Freno	121,30	4,41	85,09	36,39	-4,79	224,03	0,000	11,977	52,818
21	Freno	69,50	2,77	87,86	24,44	-1,00	101,10	0,000	5,040	13,937
22	Acelerador	115,62	4,60	92,46	32,36	4,05	177,18	18,882	9,135	42,022
23	Acelerador	242,20	5,04	97,50	48,61	2,76	399,80	33,773	24,544	123,702
24	Acelerador	488,87	7,83	105,33	60,00	1,14	609,08	47,771	42,851	335,524
25	Freno	225,97	4,34	109,67	52,22	-5,63	461,40	0,000	29,584	128,396
26	Acelerador	177,12	3,40	113,07	40,00	0,00	270,70	25,137	15,032	51,110
27	Acelerador	133,15	3,07	116,14	43,89	2,53	325,90	28,829	18,916	58,073
28	Acelerador	337,64	6,55	122,68	53,06	1,61	476,25	38,886	30,844	201,874

Tabla 2 Resultados del análisis de vuelta al circuito

## Selección de celdas

Debido a limitaciones de stock y a su disponibilidad, finalmente las celdas elegidas para componer el pack de baterías del prototipo son las Samsung 21700. El equipo ha calculado que, para cubrir las necesidades energéticas, en total serán necesarias un total de 720 unidades. Éstas son celdas cilíndricas con las siguientes características:

<b>SAMSUNG 21700</b>	
Diámetro	21 mm
Longitud	70 mm
Capacidad (I <sub>N</sub> )	4 Ah
R <sub>interna</sub>	12 mΩ
Ratio máximo descarga	9C

Tabla 3 Características de la celda Samsung 21700

## Modelo térmico

### Material

A la hora de definir el modelo térmico a simular mediante el software específico de Solidworks, el primer paso es definir las características físicas de la celda unidad. Los experimentos sobre baterías Ion-Litio reflejados en [1] arrojan una serie de valores que tomaremos como referencia para nuestras baterías.

Calor específico	C <sub>p</sub>	981 J/kgK
Resistencia térmica interna	R <sub>in</sub>	1,4 K/W
Densidad	ρ	4167 kg/m <sup>3</sup>

Tabla 4 Características físicas del material de una batería Ion-Litio

Estos parámetros serán utilizados a la hora de definir un material en Solidworks, que será aplicado al sólido como aproximación a la composición real de la celda.

### Potencia calorífica

La potencia calorífica emitida por una celda depende de su estado de descarga y de su intensidad nominal. Así, hemos tomado como punto de partida un ratio de descarga de 4C, lo que equivale a 16 A en estas celdas Samsung 21700. A partir de este valor y de la resistencia interna obtenemos:

$$Q_R = I^2 \cdot R_{interna} = 16^2 \cdot 0,012 = 3 \text{ W} \quad (5)$$

### Conductividad térmica

El coeficiente de convección es un parámetro altamente dependiente de la geometría del cuerpo del cual se va a disipar el calor. Para un cuerpo cilíndrico como la celda de estudio, suponiendo uniformidad de material para todo el volumen, este tiene un valor de:

$$\lambda = \frac{r}{A} \cdot R_{in} = \frac{1,4 \text{ K/W}}{2 \cdot \pi \cdot 0,07 \text{ m}} = 3,18 \text{ W/mK} \quad (6)$$

### Experimento con termistores

Ya en posesión de las celdas, se realizó un experimento práctico sobre una unidad consistente en la colocación de 5 termistores sobre ella, tres sobre el cuerpo y los dos restantes sobre cada uno de sus extremos (figura 3, figura 4), midiendo la evolución de temperatura registrada por éstos desde temperatura ambiente (17 °C) a un ratio de descarga de 4C (16 A), valor tomado como límite a utilizar durante la fase de competición.

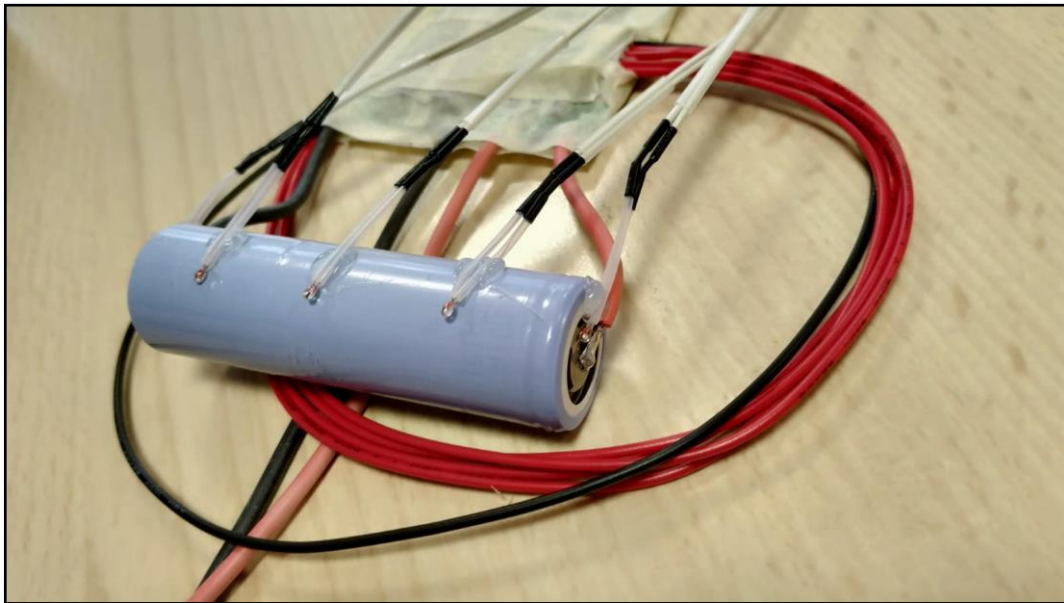
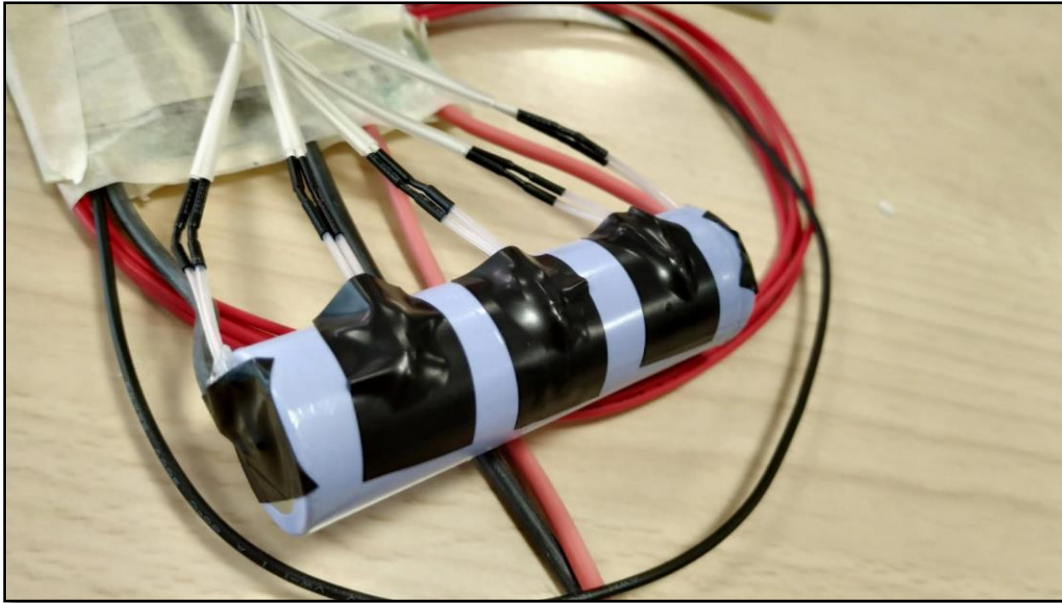


Figura 3 Experimento con termistores sobre celda. Colocación de los termistores.



*Figura 4 Experimento con termistores sobre celda. Colocación final de los termistores.*

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6. Este gráfico muestra la evolución de la temperatura registrada por cada uno de los cinco termistores a lo largo del tiempo (El termistor S55 se separó de la base de la celda durante el experimento) hasta que la descarga programable cortó la corriente cuando la tensión alcanzó 2,8 V. Atendiendo a las recomendaciones del fabricante, la celda no ha de superar los 50°C de temperatura de funcionamiento para garantizar un funcionamiento óptimo, lo que sucede en distintos momentos para cada termistor. Se puede tomar, como valor aproximado, un tiempo de 12 minutos hasta llegar a este punto. Se observa, así mismo, como el enfriamiento una vez se desconecta la celda sucede de forma rápida, no tomando más de dos minutos la vuelta a la temperatura ambiente.



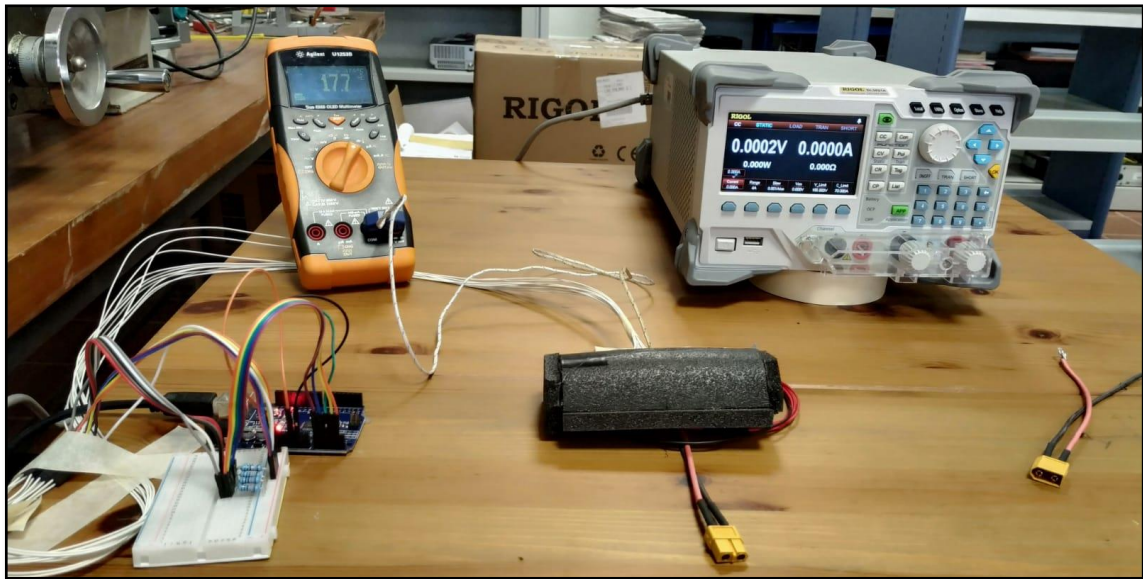


Figura 5 Experimento con termistores sobre celda. Realización del experimento.

Atendiendo a la telemetría reflejada en la vuelta *on board* analizada, las fases de aceleración máxima corresponden a un 67% de la vuelta, que en tiempo estimado corresponde a 82,70 segundos. Multiplicando por el número total de vueltas de carrera más formación y regreso a boxes, las cuales no exigen exprimir las baterías, arrojan un tiempo de utilización de las baterías en estas condiciones de descarga máxima de 10,34 minutos. Siempre desde el lado de la seguridad, los cálculos y simulaciones futuras no estacionarias se realizarán para un tiempo de funcionamiento de 12 minutos a un ratio de descarga de 4C.

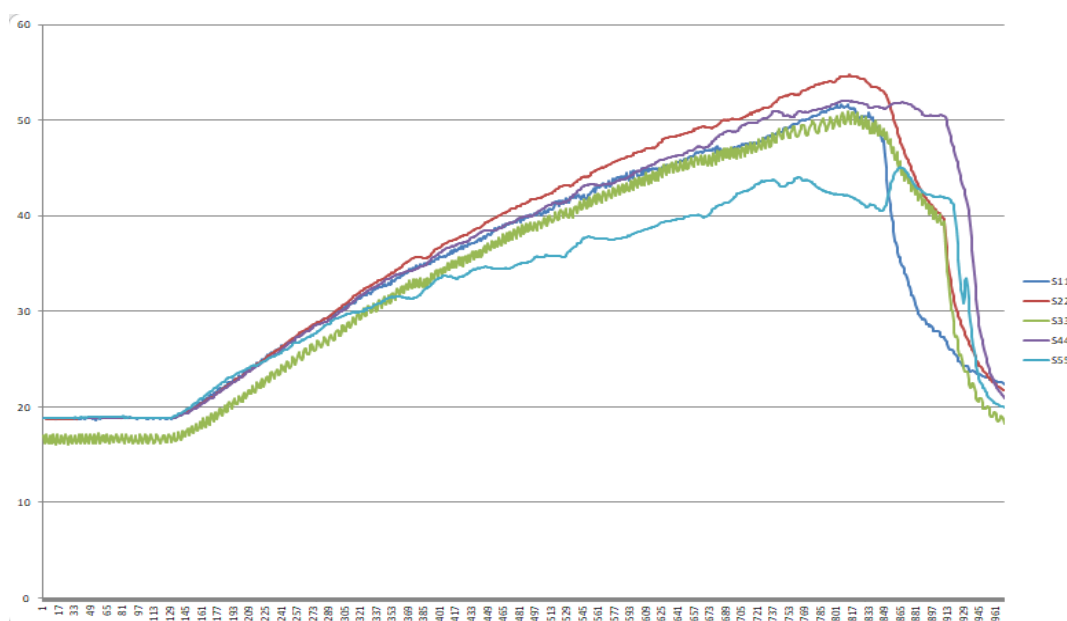


Figura 6 Experimento con termistores sobre celda. Resultados.

## **Modelo térmico para una celda**

El primer objetivo es replicar los resultados obtenidos en el experimento mediante el software Solidworks para una celda. Con un modelo aplicable a una sola celda, la escalada a todo el paquete de baterías será viable.

Para realizar el ajuste del modelo, se parte de un modelo en CAD de la celda compuesto de dos partes, una interna a la que se le aplica el material definido por los parámetros obtenidos de [1] y una cubierta exterior de 0.1 mm de espesor que, en principio, será considerada de aluminio. Las condiciones iniciales serán una temperatura ambiente y del sólido de 17°C, la celda estará posicionada de forma horizontal y el método de disipación de temperatura del sólido al ambiente será mediante convección natural (velocidad inicial del aire nula).

Como fuente de calor, se establece una fuente volumétrica de potencia en todo el sólido interno de 3 W (5).

Todos los estudios se realizan para un tiempo de 720 s (12 minutos). El primer estudio no estacionario se realiza con un total de 72 iteraciones, obteniendo una evolución de temperatura desde los 17 °C iniciales hasta los 37,38 °C. El modelo ha de ser ajustado para hacerlo semejante al experimento realizado. Tenemos tres parámetros que adaptar para llegar a la solución deseada:

- **Mallado e iteraciones:** un mallado defectuoso o un número de iteraciones pequeño pueden inducir un error de cálculo, por lo que se refina el mallado y se disminuyen las iteraciones para comprobar si la variación de los resultados es reseñable. El refinado se hace variando el nivel de refinado que ofrece el programa, definido por niveles del 1 al 7. Para mejores refinamientos, es necesario ajustar los parámetros manualmente.
- **Material:** las características intrínsecas de los materiales utilizados afectan a la distribución de la temperatura y, por ende, al resultado final. Se comprueba si existe una diferencia entre diferenciar material exterior e interior o no hacerlo, ya que el espesor del material externo es muy pequeño.
- **Potencia producida:** el cálculo de potencia calorífica producido en la batería tiene en cuenta únicamente la intensidad de descarga y la resistencia interna de la batería facilitada por el fabricante. El proceso químico que se da en el interior de la batería también produce un calentamiento difícilmente medible en la práctica, pero que puede

aplicarse en CFD mediante un valor añadido que haga comportarse el modelo del mismo modo que en la realidad.

Se realizan así varios estudios, reflejando los resultados en la tabla a continuación (tabla 5). Los primeros estudios se han realizado buscando la malla y el número de iteraciones ideales para obtener unos resultados estables sin comprometer la potencia de cálculo del ordenador. Un mallado de refinado 4 y steps de 10 segundos (72 iteraciones) es el modelo elegido.

En segundo lugar, se han comparado distintas combinaciones de materiales, llegando a la conclusión de que un modelo compuesto por un único sólido del material definido para el estudio no difiere de forma significativa. Esto facilita el estudio en sí, por lo que será la opción finalmente seleccionada.

Por último, para llegar a la temperatura final de 50°C, se aumenta el valor de potencia calorífica producida en la celda hasta los 5W.

Con un valor de 4,9W, material uniforme para toda la celda, mallado de nivel 4 y steps de 10 segundos obtenemos los resultados deseados, siendo este el modelo a escalar para posteriores análisis.

CELDA INDIVIDUAL	PROYECTO	Ti [°C]	POTENCIA [W]	MAT. INTERNO	MAT. EXTERNO	STEP [s]	NIVEL REFINAMIENTO	CELIDAS TOTALES	Tmáx SÓLIDO [°C]	DELTA T [°C]
AFINAR MALLA E ITERACIONES	TH0	17	3	Batería	Aluminio	10	3	41072	37,38	20,38
	TH1	17	4,5	Batería	Aluminio	10	3	41072	45,89	28,89
	TH2	17	4,5	Batería	Aluminio	10	4	72296	46,8	29,8
	TH3	17	4,5	Batería	Aluminio	20	4	72296	46,2	29,2
	TH4	17	4,5	Batería	Aluminio	10	5	131816	46,7	29,7
MATERIALES	TH2.1	17	4,5	Batería	Batería	10	4	72296	46,6	29,6
VARIACIÓN POTENCIA	TH2.0.1	17	5	Batería	Aluminio	10	4	72296	50,5	33,5
	TH2.0.2	17	4,9	Batería	Aluminio	10	4	72296	49,9	32,9

Tabla 5 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para una sola celda

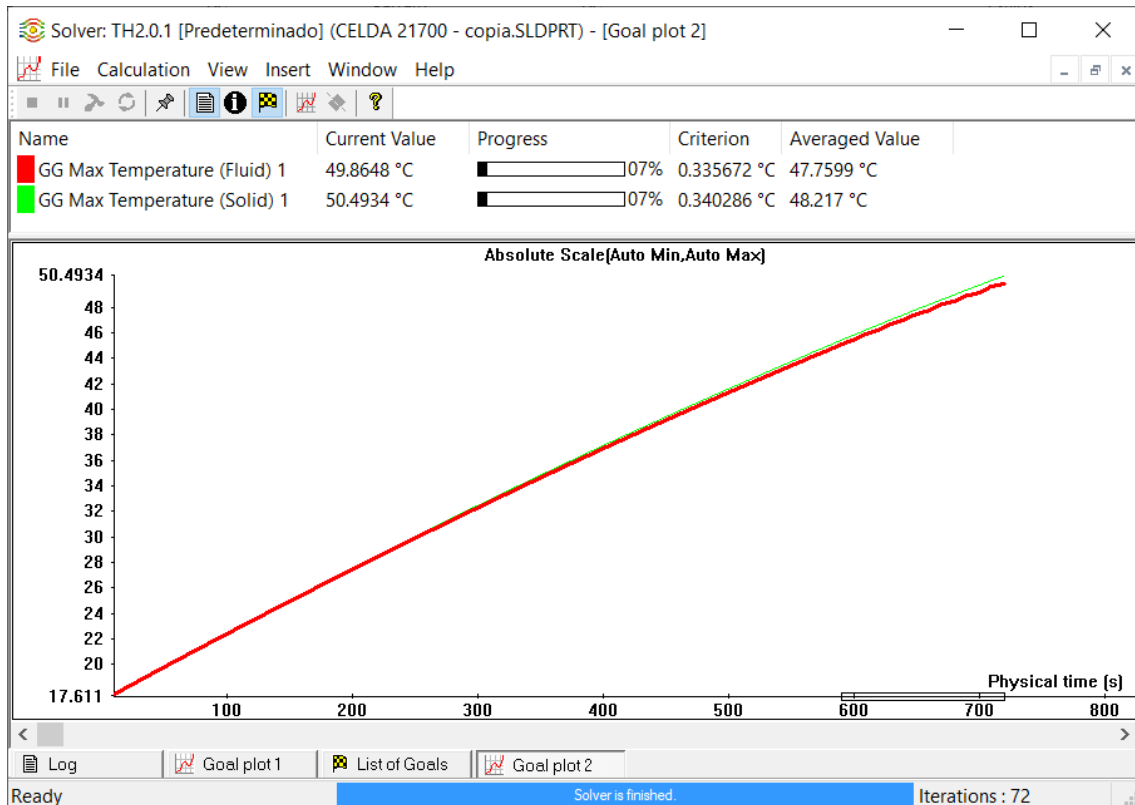


Figura 7 Evolución de temperatura de una celda (Proyecto TH2.0.1)

Estos resultados reflejan que la potencia calorífica que emiten las celdas tiene dos fuentes. La resistividad interna  $Q_R$  produce 3 W (5) de potencia calorífica, mientras que el restante, hasta los 4,9 W, son debidos a la reacción química dentro de las celdas  $Q_q$ . Suponiendo una evolución cuadrática de este último parámetro, al igual que  $Q_R$ , podemos obtener una ecuación que la defina:

$$Q_q = I^2 \cdot a \quad (7)$$

donde

$$a = \frac{1,9}{16^2} = 0.0074 \Omega \quad (8)$$

Podemos establecer que la potencia calorífica total que se produce en las celdas responde a la siguiente ecuación:

$$Q = Q_R + Q_q = I^2 \cdot (R_{interna} + a) \quad (9)$$

Esta propuesta habría de ser verificada mediante un experimento futuro.

## Estudio térmico sistema de baterías

Una vez en posesión de un modelo funcional para una celda individual, se procede a escalar el problema hasta analizar el paquete de baterías final. El proceso será gradual, para conocer cómo se comporta en diferentes tamaños de empaquetado. La orientación de las celdas seguirá siendo horizontal para todos los estudios, mientras que la temperatura inicial del sólido será igual a la temperatura ambiente.

### Pack de 24 unidades

El diseño final acordado en el equipo para el sistema de baterías del prototipo se compondrá de hileras de 24 celdas en línea con una separación de 1 mm entre ellas, tal como se aprecia en la figura 8.

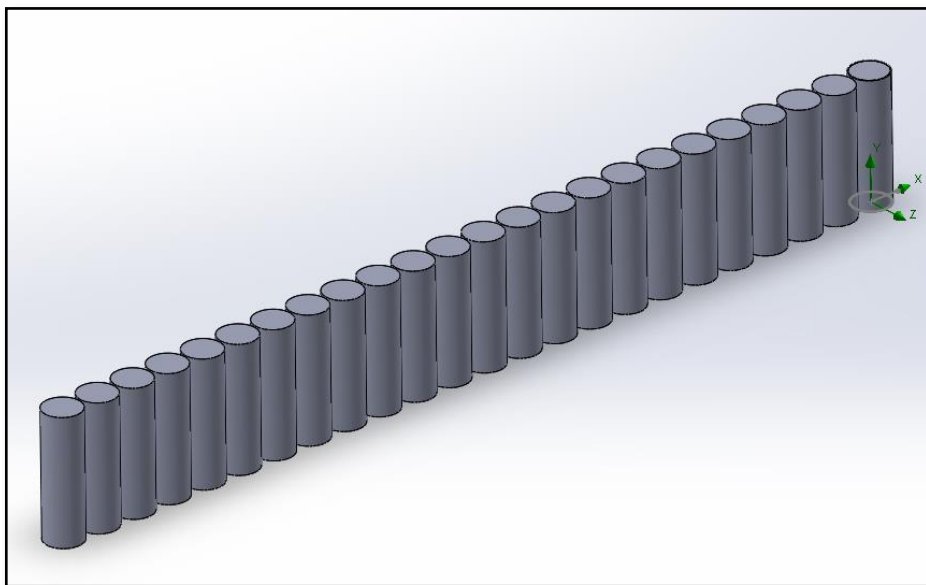


Figura 8 Disposición del pack de 24 unidades

Esta escalada conlleva la aparición de un nuevo punto a tener en cuenta, el mallado en las zonas de separación, que ha de ser refinado en la zona límite entre sólido y fluido ambiente. Como observación, SolidWorks divide el valor de la fuente volumétrica de potencia calorífica entre todos los sólidos emisores, motivo por el cual la potencia aplicada es de 117,6 W. Se han realizado un total de 5 simulaciones con diferentes mallados, dando como resultado más desfavorable el mallado automático de nivel 5, por lo que será el utilizado en posteriores

estudios ya que alivia la carga de cálculo y la diferencia de temperatura máxima en el sólido respecto a mejores mallados es asumible.

La figura 9 muestra cómo el refinamiento del mallado permite a las líneas de flujo asemejarse más a la silueta del sólido. En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos con estos diferentes mallados además de dos simulaciones con temperatura ambiente de 30°, más cercana a lo que se espera encontrar en condiciones de pista.

PACK 24 SEP 1mm								
PROYECTO	Ti [°C]	POTENCIA [W]	MATERIAL	STEP [s]	NIVEL REFINAMIENTO	CELDA TOTALS	Tmáx SÓLIDO [°C]	DELTA T [°C]
TH24.1	17	117,6	Batería	5	4	40714	51,34	34,34
TH24.1.5	17	117,6	Batería	5	5	82612	52	35
TH24.1.6	17	117,6	Batería	5	6	481422	51,56	34,56
TH24.2	17	117,6	Batería	10	Boundary 4	292666	50,15	33,15
TH24.3	17	117,6	Batería	10	40x20x20	292666	47,47	30,47
TH24.1.1	30	117,6	Batería	5	4	43318	63,74	33,74
TH24.1.1.5	30	117,6	Batería	5	5	82612	63,83	33,83

Tabla 6 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para el pack de 24 celdas

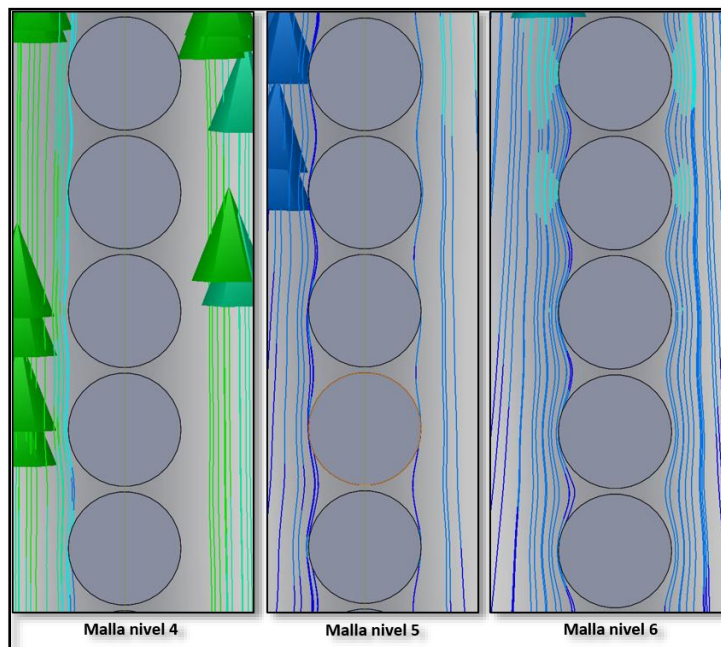


Figura 9 Comparación de flujo de aire para diferentes niveles de mallado

Se observan unos resultados muy parecidos a los obtenidos en el experimento con los termistores, lo que induce a pensar que la acumulación de celdas no incrementa ostensiblemente la temperatura final máxima. La figura 10 muestra la distribución de temperaturas en el sólido para una temperatura ambiente de 30°C. Las zonas centrales y superiores adquieren mayor temperatura.

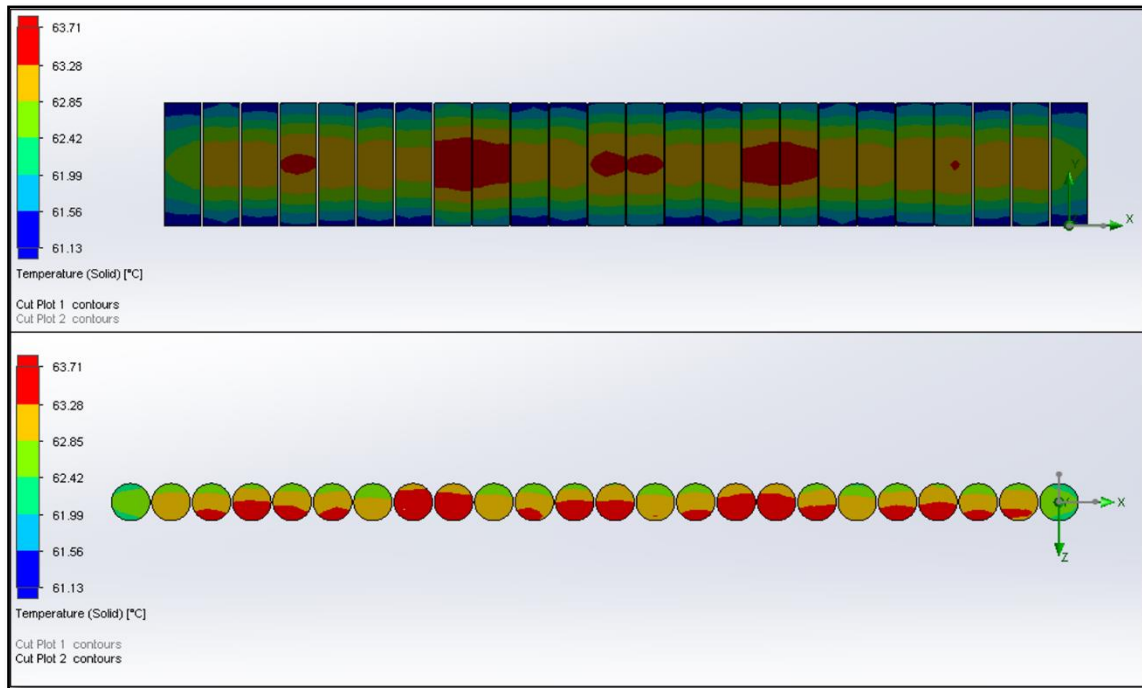


Figura 10 Distribución de temperaturas en el pack de 24 celdas para una temperatura ambiente de 30 °C

Se realiza también el estudio para estas dos temperaturas suprimiendo la separación entre celdas, lo que incluye transmisión por conducción en la ecuación. Los resultados (tabla 7) muestran que, de este modo, la temperatura si sube de manera apreciable.

PACK 24 SEP 0mm								
PROYECTO	Ti [°C]	POTENCIA [W]	MATERIAL	STEP [s]	NIVEL REFINAMIENTO	CELDAS TOTALES	Tmáx SÓLIDO [°C]	DELTA T [°C]
TH24U.1	17	117,6	Batería	10	4	40714	63,57	46,57
TH24U.1,1	30	117,6	Batería	10	4	43348	73,3	43,3

Figura 11 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para el pack de 24 celdas sin separación

### Pack de 10x24 celdas

El siguiente nivel de empaquetamiento se compone de 10 hileras de paquetes de 24 celdas. La separación entre hileras es de 14 mm, creando canales para el paso del aire entre ellas como se aprecia en la figura 11.

Se realizan dos simulaciones con diferentes temperaturas ambiente, y se aprecia que esta configuración si muestra temperaturas máximas en el sólido mayores que en anteriores configuraciones. Esto es debido, lógicamente, al calentamiento extra de las celdas centrales.

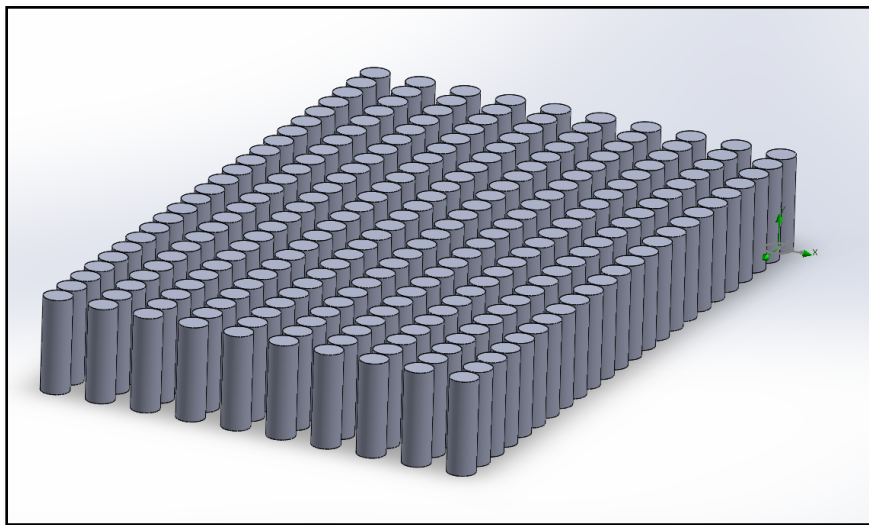


Figura 12 Distribución del paquete 10x24 celdas

PACK 10x24								
PROYECTO	Ti [°C]	POTENCIA [W]	MATERIAL	STEP [s]	NIVEL REFINAMIENTO	CELDA TOTAL	T <sub>máx</sub> SÓLIDO [°C]	DELTA T [°C]
TH10.1	17	1176	Batería	10	5	65532	55,67	38,67
TH10.2	30	1176	Batería	10	5	65532	68,73	38,73

Tabla 7 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para el pack de 10x24 celdas

A continuación, se muestra la distribución de temperatura para las celdas y el flujo de aire sobre el sólido a una temperatura ambiente de 17°C (figura 13). Se aprecia como el mallado es suficiente para contemplar el flujo pasando por los canales entre hileras.



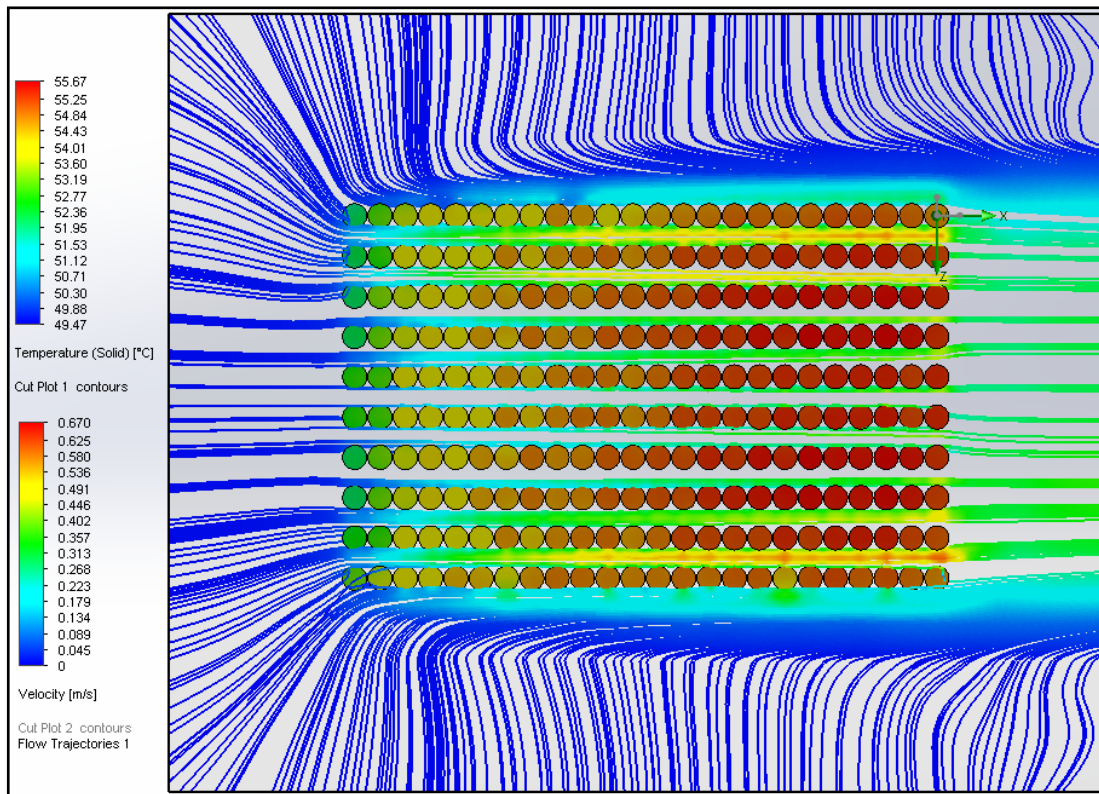


Figura 13 Temperatura final y líneas de flujo para el pack 10x24 celdas con temperatura ambiente de 17 °C

Por último, se ha colocado, a modo de nexo de unión entre celdas, una rejilla donde encajar éstas que será fabricada mediante impresión 3D. Para conocer cómo afecta a la distribución de temperatura, se ha simulado aplicándole policarbonato como material. El grosor de esta rejilla es de 15 mm, introduciendo las celdas 5 mm en ella (figura 14).

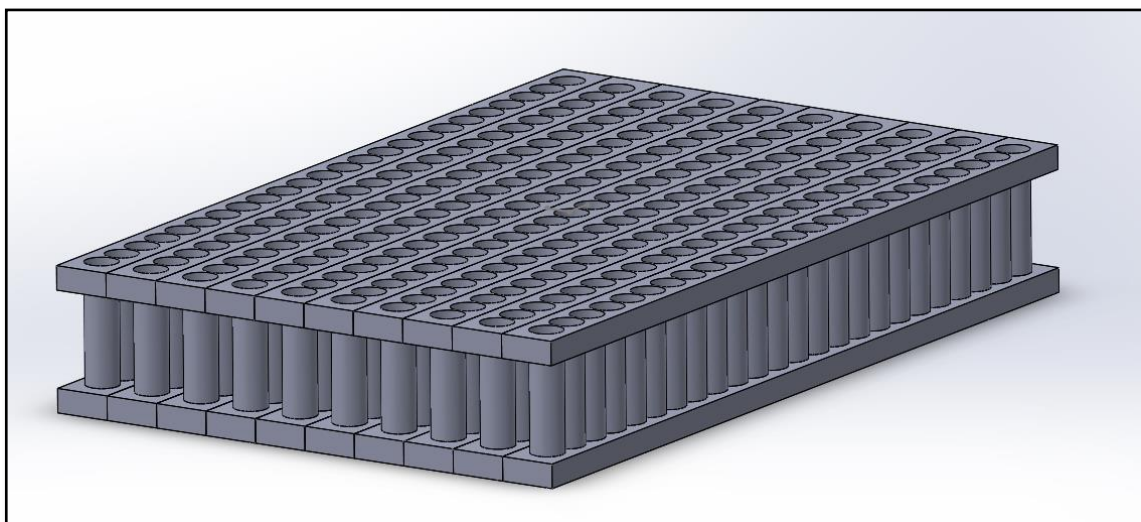


Figura 14 Distribución del pack 10x24 con rejilla de unión

Los resultados de las simulaciones se muestran en la tabla 8, mientras que la distribución de temperaturas y flujo de aire en la figura 15 y la figura 16 respectivamente.

PACK 10x24 + BASE										
PROYECTO	Ti [°C]	POTENCIA [W]	MATERIAL	MAT. BASE	T. FÍSICO [s]	STEP [s]	NIVEL REFINAMIENTO	CELDAΣ TOTALES	Tmáx SÓLIDO [°C]	DELTA T [°C]
THB10.1	17	1176	Batería	Polycarbonato	720	10	5	121009	54,17	37,17
THB10.2	30	1176	Batería	Polycarbonato	720	10	5	121009	67,21	37,21

Tabla 8 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para el pack de 10x24 celdas con rejilla de unión

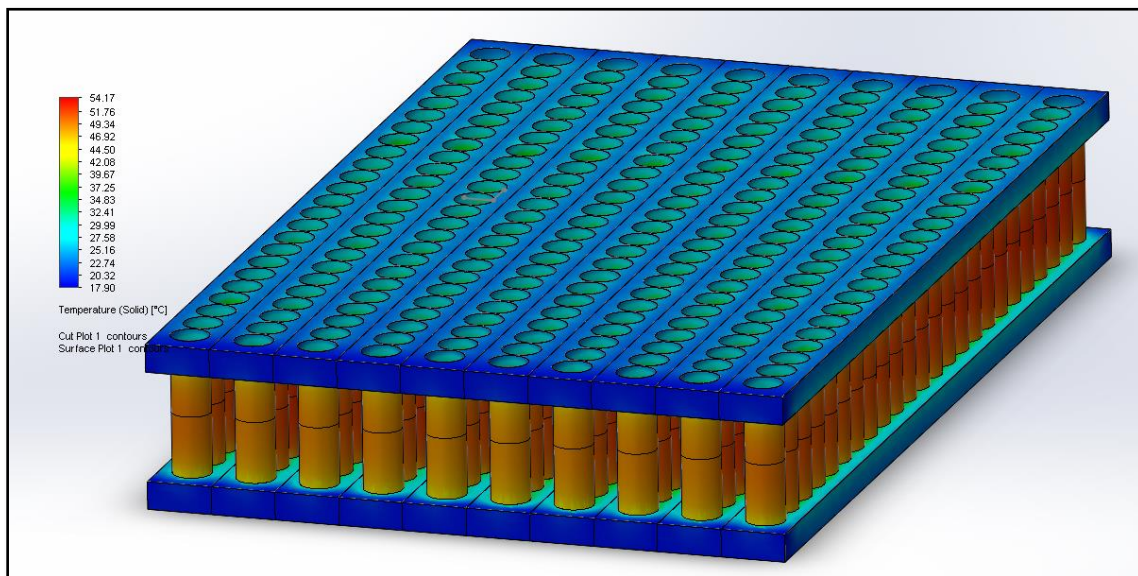
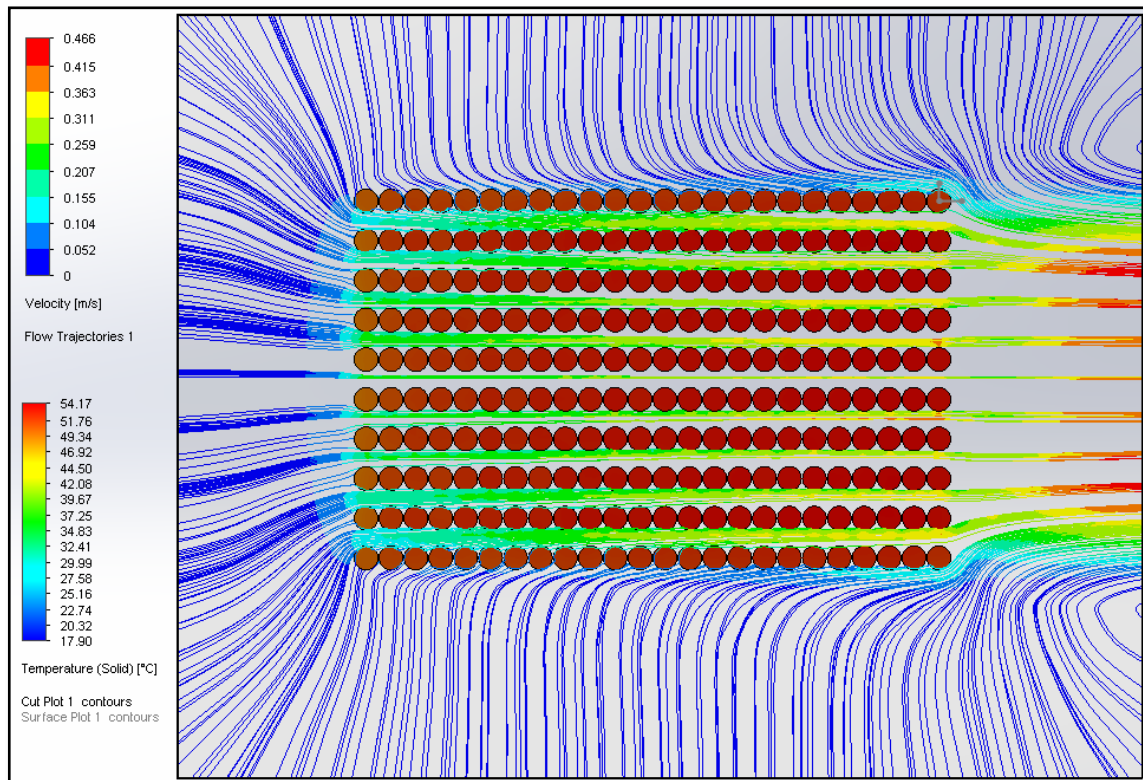


Figura 15 Distribución de temperatura pack 10x24 celdas con rejilla

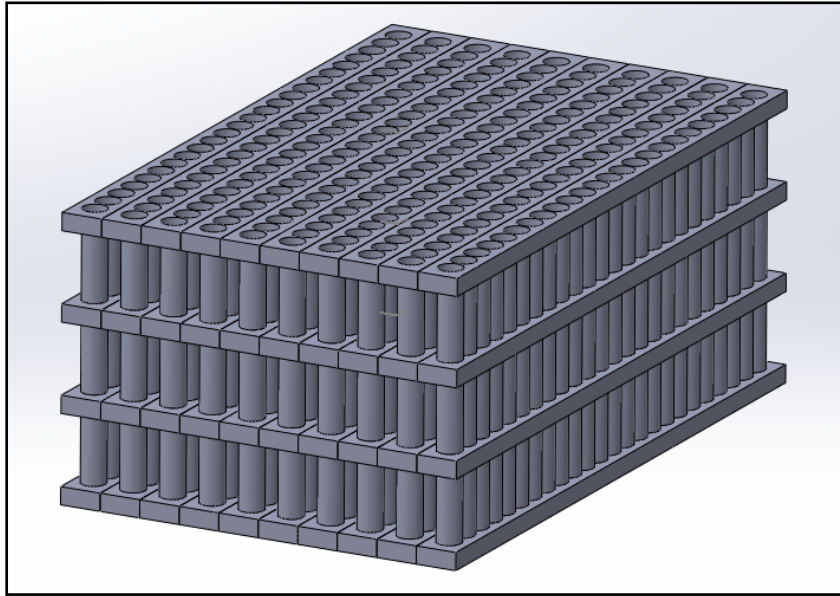


*Figura 16 Distribución flujo pack 10x24 celdas con rejilla*

Se aprecia que la rejilla ejerce de disipador de temperatura de una forma leve. La temperatura máxima de las celdas disminuye en torno a un grado respecto al modelo sin ésta. Nos movemos en unas temperaturas no adecuadas para el óptimo funcionamiento de las baterías, pero tampoco se desvía en exceso de los valores recomendados. No obstante, estamos suponiendo unas condiciones de descarga constantes a 4C que no se van a dar durante la competición.

### **Pack de 30x24 celdas**

El empaquetamiento final se compone de un total de 720 celdas distribuidas en 3 packs 10x24 unidas mediante una rejilla de policarbonato (figura 17). Se espera alcanzar unas temperaturas superiores a las simuladas en modelos anteriores debido a la acumulación de celdas, sobre todo en el pack central.



*Figura 17 Distribución pack 30x24 celdas*

Se han realizado unos primeros estudios térmicos con las condiciones utilizadas en los modelos anteriores, obteniendo unos resultados de temperatura excesivamente altos. Analizando los flujos de aire, se aprecia que el mallado utilizado no es suficientemente fino para la complejidad de este paquete (figura 18). Se aprecia como, con un mallado de nivel 5, el flujo de aire no se adapta a la geometría en las canalizaciones entre hileras. Mejores mallados mejoran la simulación del comportamiento del flujo de aire.

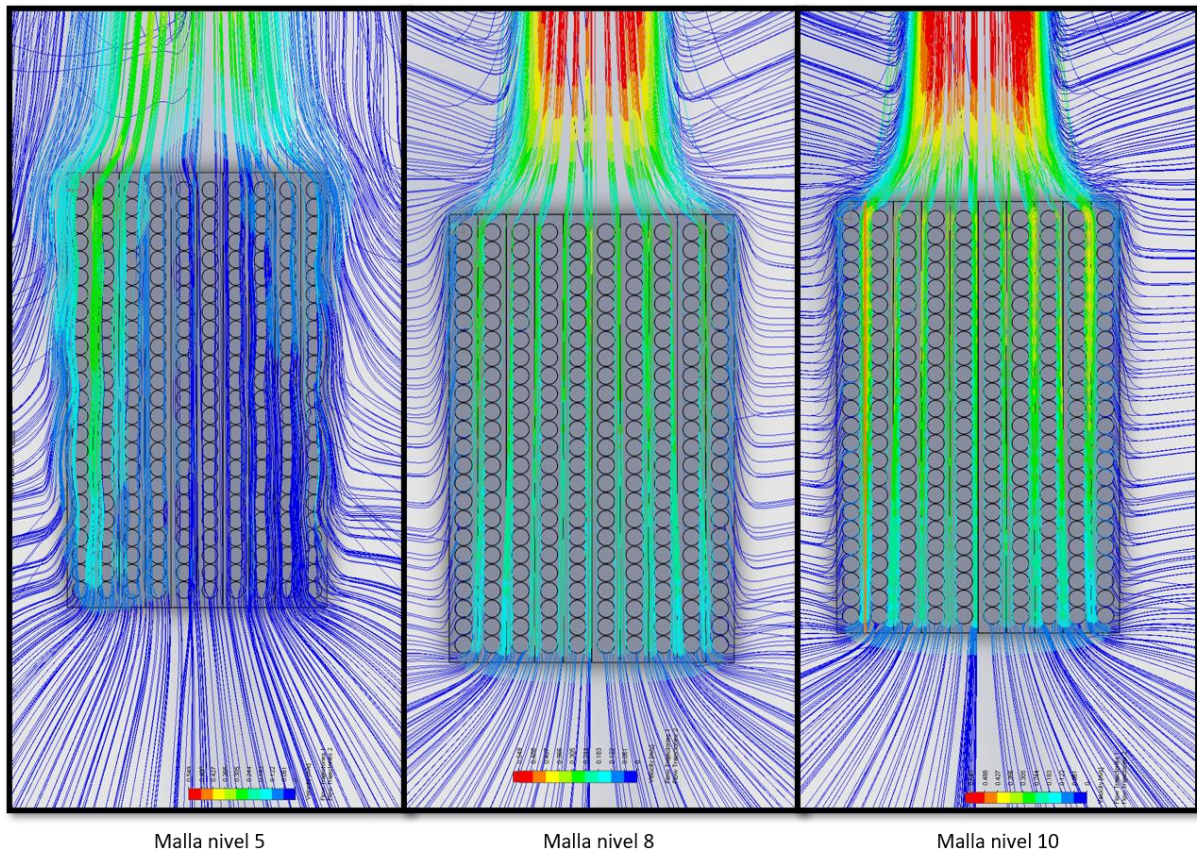


Figura 18 Comparación de flujo para distintos niveles de mallado

La tabla 9 muestra los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones. Los dos primeros análisis se han realizado con el mallado utilizado de nivel 5, comparando temperaturas máximas alcanzadas para diferentes temperaturas ambiente. El tercero se trata del estudio objetivo: desde el equipo se pide desarrollar un sistema de refrigeración mediante ventilación forzada que extraiga 1,5W de cada celda. Este estudio aplica esa fuente de calor objetivo (2520 W en total) para conocer cuál es la temperatura que alcanzará el sistema con el sistema de refrigeración.

Como se ha comentado anteriormente, el mallado ha tenido que ser refinado hasta obtener unos resultados que comiencen a converger, siempre buscando el equilibrio entre resultados y potencia de cálculo necesaria. Así, se han obtenido resultados satisfactorios para un mallado equivalente a un nivel 8 (el software solo permite hasta el nivel 7 de forma automática, por lo que niveles superiores de refinamiento han de hacerse manualmente). Al refinar el mallado, la temperatura máxima calculada ha disminuido 18°C para las mismas condiciones, mostrando la importancia de este factor. El nivel 10 de mallado aun disminuye 1°C la temperatura respecto al nivel 8, pero el tiempo de cálculo se dispara exponencialmente.

Tomando el nivel 8, finalmente, como mallado de referencia, se ha realizado el estudio para temperatura ambiente de 30°C. Los resultados arrojan que un sistema de refrigeración capaz de extraer 1,5W de cada celda puede disminuir la temperatura final en más de 10°C, manteniendo las baterías dentro de un rango de funcionamiento seguro.

PACK 30x24 + BASE										
PROYECTO	Ti [°C]	POTENCIA [W]	MAT. INTERNO	MAT. BASE	T. FÍSICO [s]	STEP [s]	MALLA	CELDA TOTAL	T <sub>máx</sub> SÓLIDO [°C]	DELTA T [°C]
THB30.1	17	3528	Batería	Polycarbonato	720	10	5	88576	79,05	62,05
THB30.2	30	3528	Batería	Polycarbonato	720	10	5	88576	91,1	61,1
THB30.3	30	2520	Batería	Polycarbonato	720	10	5	88576	74,65	44,65
THB30.4	30	2520	Batería	Polycarbonato	720	10	6	189937	65,1	35,1
THB30.5	30	2520	Batería	Polycarbonato	720	10	7	374620	58,24	28,24
THB30.6	30	2520	Batería	Polycarbonato	720	10	80x70x70	596954	56,65	26,65
THB30.7	30	3528	Batería	Polycarbonato	720	10	80x70x70	596954	67,21	37,21
THB30.8	30	2520	Batería	Polycarbonato	720	10	100x100x100	1,5E+07	55,6	25,6

Tabla 9 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para el pack de 30x24 celdas

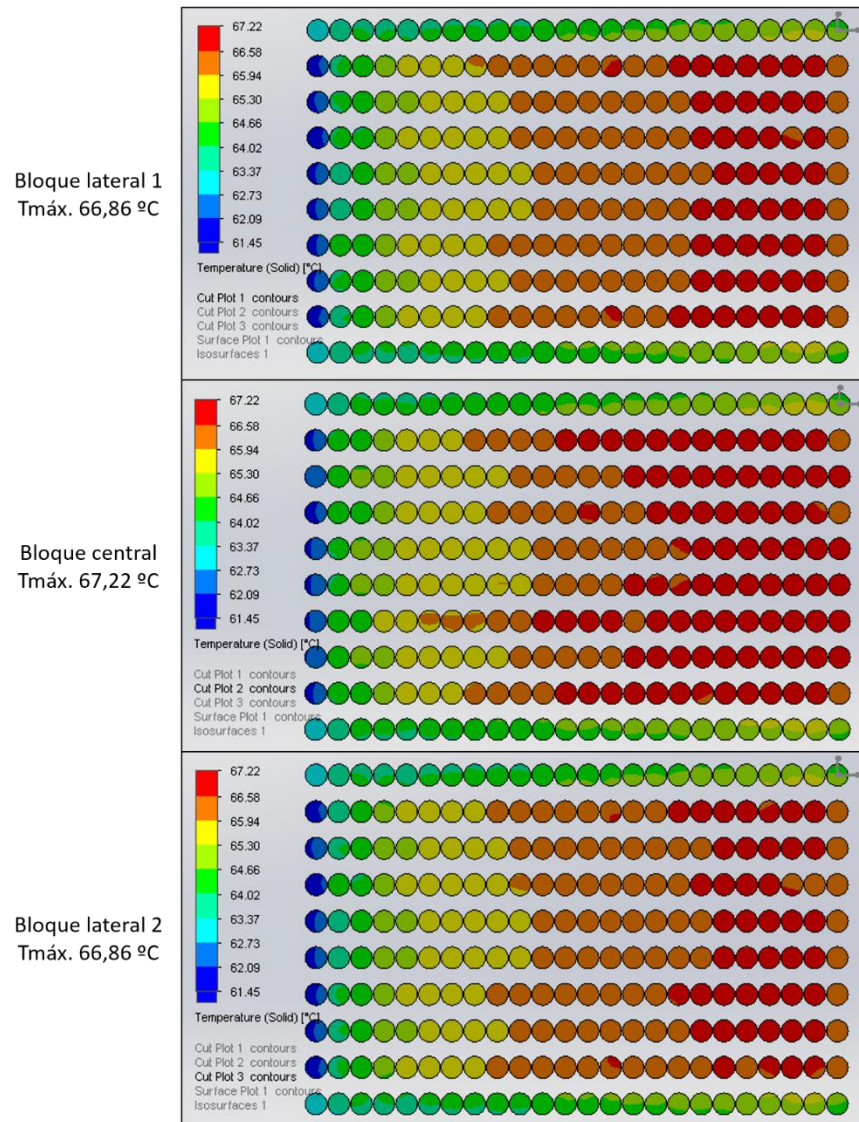


Figura 19 Distribución de temperatura de cada bloque 10x24 que componen el pack 30x24

La distribución de temperaturas se puede apreciar en la figura 19. Las celdas interiores y superiores (en rojo) sufren las temperaturas máximas, siendo ligeramente superior en el bloque central. La diferencia de temperatura entre las celdas externas y las internas alcanza hasta los 5,8 °C, mientras que la diferencia de temperatura máxima entre el bloque central y los laterales apenas es de 0,4 °C.

### Sistema de refrigeración

Por motivos de seguridad, el equipo ha decidido proceder a la colocación de un sistema de refrigeración del sistema de baterías mediante la colocación de un ventilador axial.



Figura 20 Ventilador SANYO DENKI 978-9WL1448P5G001

El modelo elegido es el SANYO DENKI 978-9WL1448P5G001 (figura 20) de dimensiones 140x140x51 mm y una masa de 930 g. Trabajos de simulación y diseño por parte del grupo asignado han desarrollado un modelo de caja de baterías (figura 21). Básicamente, se compone de tres partes principales: la antecámara, por donde accede el aire y es impulsado por el ventilador a través de un difusor que lo reparte entre las diferentes hileras de celdas, el paquete de baterías que se ha analizado hasta este punto y, por último, el *outlet* por donde el aire es expulsado y se han de imponer las condiciones de flujo de aire bajo la moto representando la velocidad de ésta. La geometría de este elemento ha de posibilitar las necesidades de inclinación de la moto.



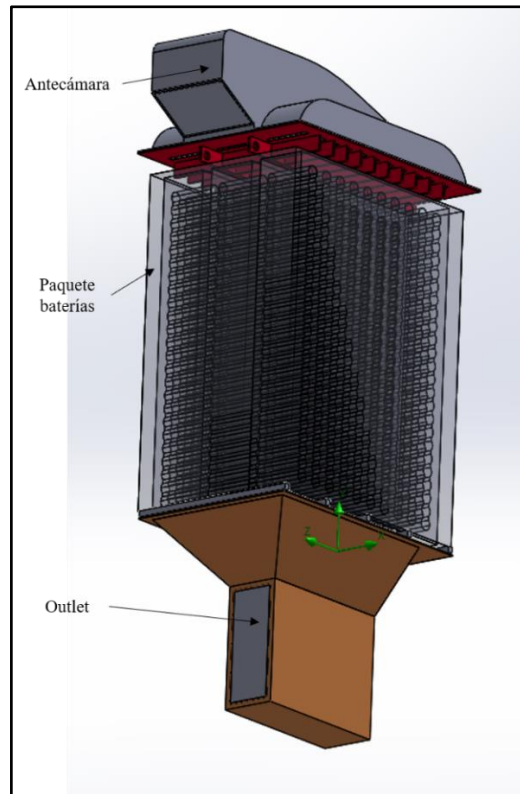


Figura 21 Modelo completo de la caja de baterías

El ventilador se encuentra en la entrada del ensamblaje de la caja de baterías, introduciendo aire a una velocidad de hasta 2 m/s a una antecámara que distribuye el flujo entre los diferentes canales formados entre las hileras de baterías. En la figura 22 se aprecian diferentes capturas de la antecámara, con el ventilador en color verde, el difusor en gris y la rejilla difusora en rojo.

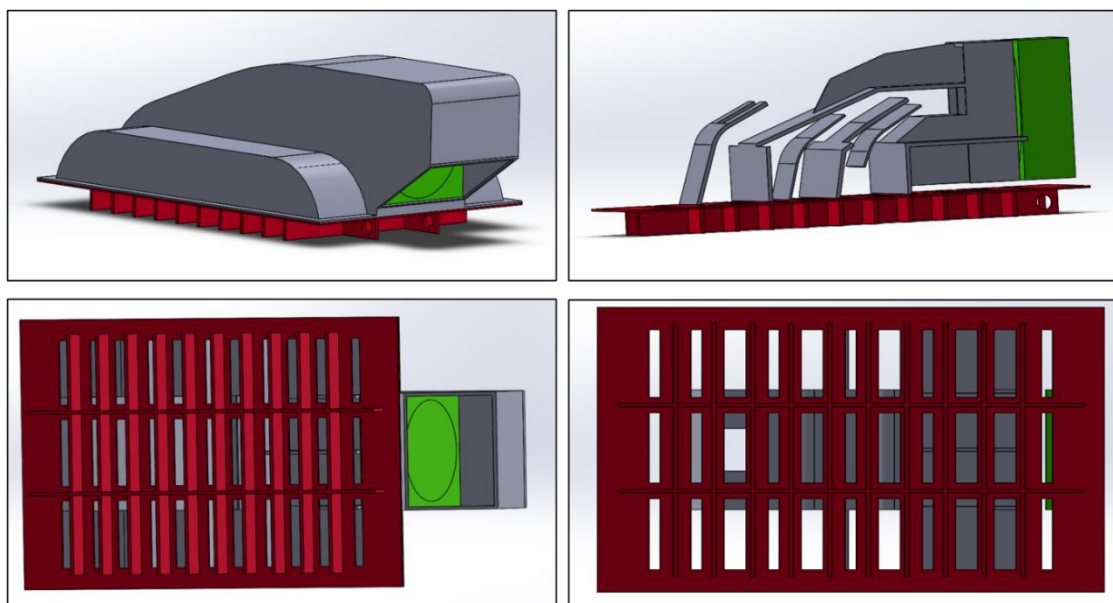


Figura 22 Antecámara y elementos que la componen

Tras refinar el diseño de la antecámara y su difusor, las simulaciones arrojan una velocidad de aire entre canalés máxima de 1,8 m/s.

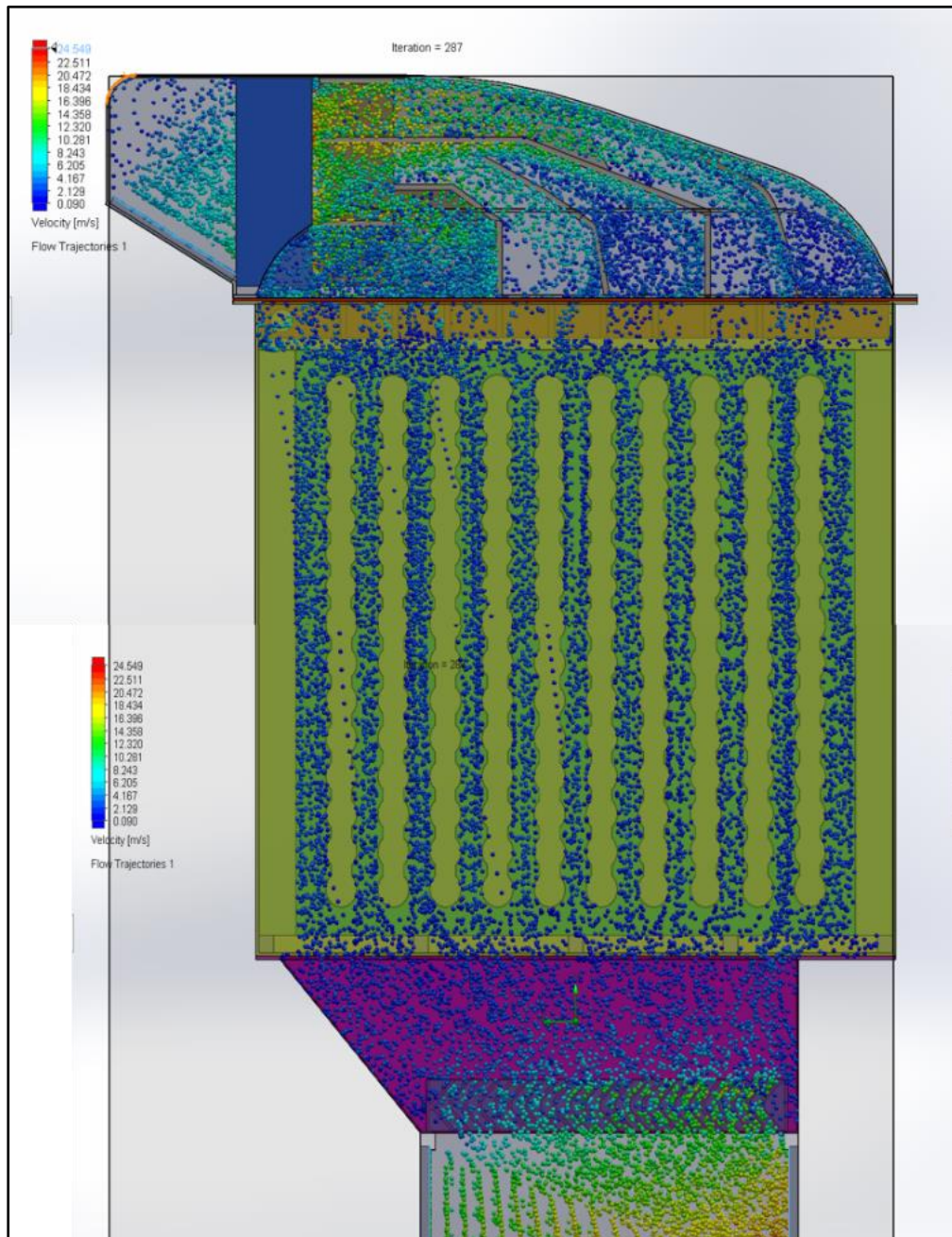


Figura 23 Simulación de velocidad de aire en la caja de baterías

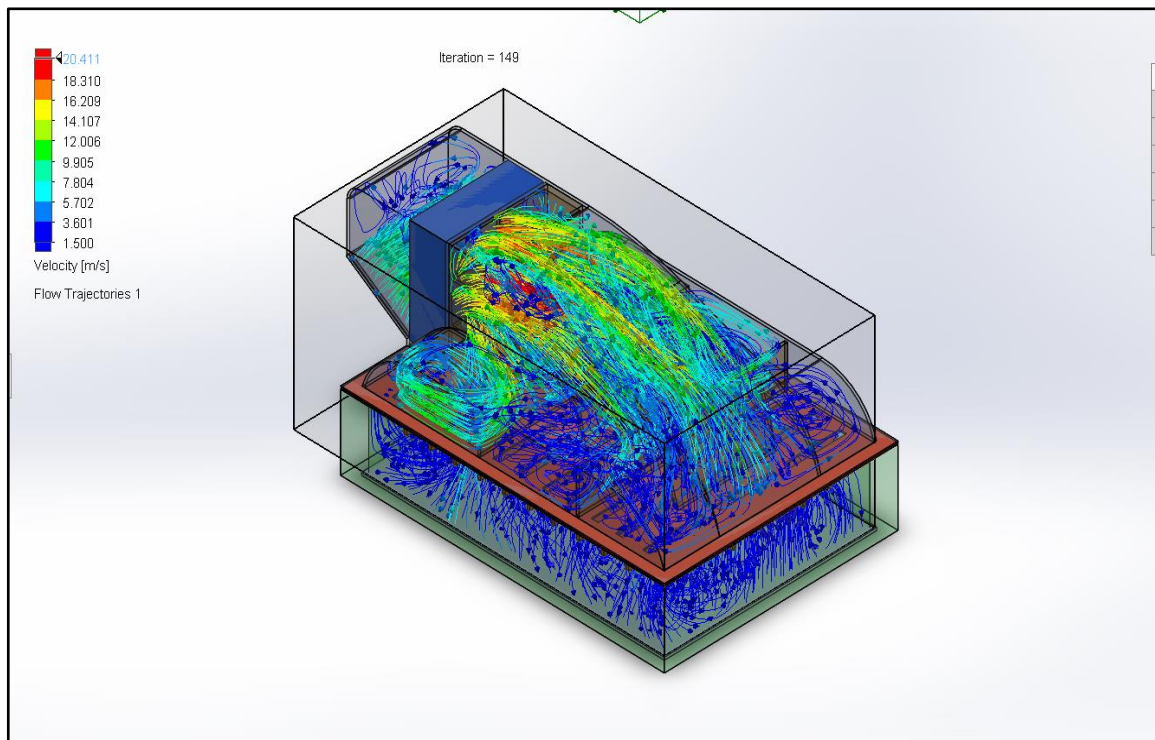


Figura 234 Simulación de velocidad de aire en la antecámara

Conociendo la cantidad de aire que es posible canalizar para la refrigeración de la batería, es posible simular en base al modelo térmico qué cantidad de calor es capaz de disipar. El objetivo inicial es eliminar 1,5 W de cada batería, lo que se traduce en obtener una temperatura final, tras los 12 minutos, de 55,6 °C.

### Estudio térmico del sistema de refrigeración

El estudio térmico no requiere de la utilización del modelo de caja completo. Conocemos la velocidad objetivo a conseguir entre canales de 1,8 m/s, por lo que procedemos a realizar una caja de policarbonato de 4 mm de espesor alrededor del paquete de baterías, dejando un espacio de 10 mm entre éstas y la caja y sin tapa superior e inferior (figura 25).

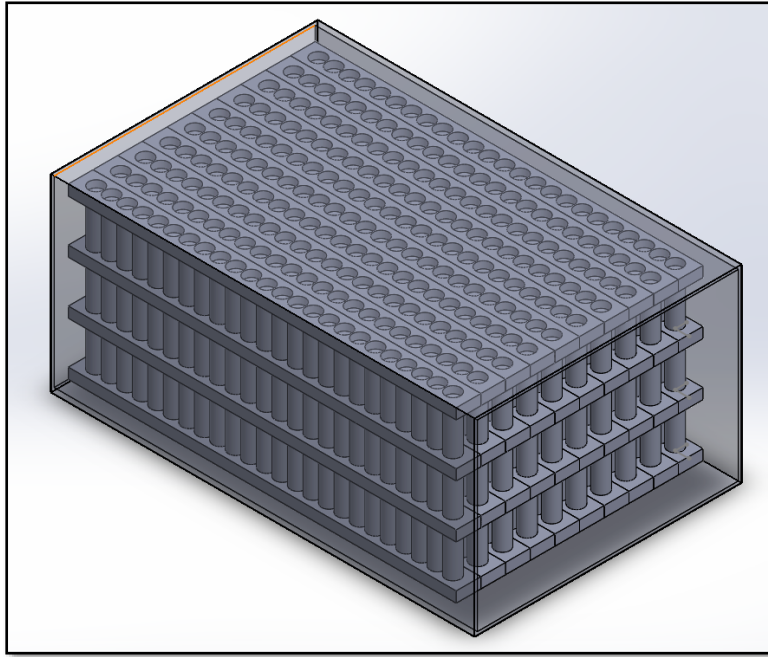


Figura 24 Modelo caja de baterías

Se realiza entonces un estudio de flujo interno, utilizando la propia caja como dominio de cálculo. Se colocan dos LIDS a modo de tapa superior (*inlet*) e inferior (*outlet*) a las cuales se les aplica las siguientes características:

- *Outlet*: condición de presión atmosférica a la salida (101235 Pa).
- *Inlet*: velocidad de entrada de aire y presión de aire. El estudio de flujo de aire de refrigeración muestra que la presión del aire puede ascender hasta un 20% respecto a la presión atmosférica (121590 Pa).

Se realiza un cálculo preliminar para estimar qué valor de velocidad de aire introducir en el *inlet* para conseguir los valores objetivo entre canales según la siguiente fórmula:

$$v_{inlet} = \frac{v_{m\acute{a}x} \cdot A_{efectiva}}{A_{inlet}} = \frac{2 \cdot 0.02049793}{0.10197973} = 0.402 \text{ m/s} \quad (10)$$

Donde

- $v_{inlet}$  es el valor de velocidad de aire a colocar en el LID superior [m/s].
- $v_{m\acute{a}x}$  es el valor de velocidad máximo capaz de entregar el ventilador [m/s].
- $A_{efectiva}$  es el área libre dentro de la caja para la circulación de aire [m<sup>2</sup>] (figura 26).

- $A_{inlet}$  es el área total del LID superior [m<sup>2</sup>]

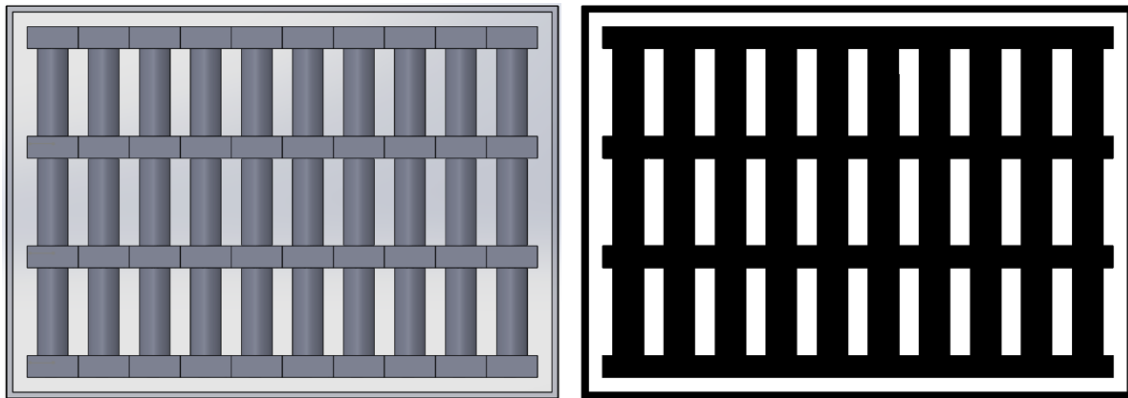


Figura 25 Área efectiva de entrada de aire (área en blanco)

El resto de parámetros de la simulación son los validados anteriormente en el modelo térmico. Cada celda produce 4,9 W, la temperatura ambiente e inicial del sólido se fija en 30 °C y el tiempo físico de simulación son 12 minutos. La principal problemática de este análisis ha sido el refinado del mallado, ya que un análisis interno de flujo laminar y turbulento difiere del estudio externo de régimen laminar realizado hasta ahora. Se han realizado varias simulaciones hasta hallar una malla que haga converger los valores de temperatura y de velocidad máxima del aire. Una vez hemos conseguido esto, se ha iterado con diferentes velocidades de entrada de aire hasta obtener unos valores entre canales similares al objetivo.

CAJA BATERÍAS								
PROYECTO	Ti [°C]	POTENCIA [W]	VEL. IN [m/s]	STEP [s]	MALLA	CELDAS TOTALES	Tmáx SÓLIDO [°C]	DELTA T [°C]
BOX1	30	3528	0,604	10	80x70x70	3460156	61,36	31,36
BOX2	30	3528	0,402	10	100x70x100	1167800	63,4	33,4
BOX3	30	3528	0,402	10	100x60x100	1056842	63,4	33,4
BOX4	30	3528	0,402	10	120x70x120	1776172	62,74	32,74
BOX5	30	3528	0,502	10	120x70x120	1776172	62,17	32,17
BOX8	30	3528	0,402	10	150x120x150	3822999	62,27	32,27
BOX6	30	3528	0,45	10	150x120x150	3822999	62,1	32,1
BOX7	30	3528	0,42	10	150x120x150	3822999	62,2	32,2
COLD	24	3528	0,45	10	150x120x150	3822999	56,9	32,9

Tabla 10 Resultados de las simulaciones del modelo térmico para el pack de 30x24 celdas con refrigeración

Los valores más cercanos al objetivo de velocidad entre canales los hemos conseguido con una velocidad en el *inlet* de 0,450 m/s (figura 27). Sin embargo, durante todas las simulaciones se

observa que el sistema de refrigeración no es capaz de disminuir la temperatura máxima hasta los 55.6 °C que se obtendrían extrayendo 1,5 W de cada celda. El valor límite se encuentra sobre los 62,1 °C, esto es, el sistema de refrigeración es capaz de disminuir durante los 12 minutos la temperatura final en 5 grados. Esta disminución de temperatura se traduce, a su vez, en la disipación de 448 W (tabla 11).

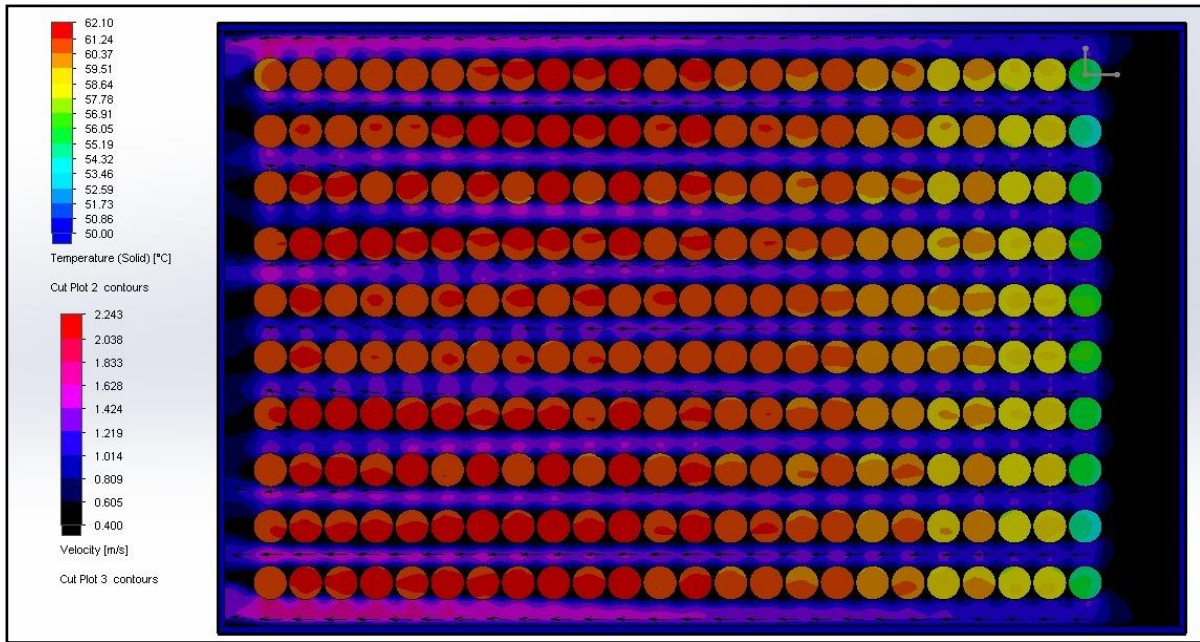


Figura 26 Distribución de temperatura y velocidad de aire

PACK 30x24 + BASE										
PROYECTO	Ti [°C]	POTENCIA [W]	MAT. INTERNO	MAT. BASE	T. FÍSICO [s]	STEP [s]	MALLA	CELDAS TOTALES	Tmáx SÓLIDO [°C]	DELTA T [°C]
THB30.1	17	3528	Batería	Polycarbonato	720	10	5	88576	79,05	62,05
THB30.2	30	3528	Batería	Polycarbonato	720	10	5	88576	91,1	61,1
THB30.3	30	2520	Batería	Polycarbonato	720	10	5	88576	74,65	44,65
THB30.4	30	2520	Batería	Polycarbonato	720	10	6	189937	65,1	35,1
THB30.5	30	2520	Batería	Polycarbonato	720	10	7	374620	58,24	28,24
THB30.6	30	2520	Batería	Polycarbonato	720	10	80x70x70	596954	56,65	26,65
THB30.7	30	3528	Batería	Polycarbonato	720	10	80x70x70	596954	67,21	37,21
THB30.8	30	2520	Batería	Polycarbonato	720	10	100x100x100	1,5E+07	55,6	25,6
THB30.7,1	30	3000	Batería	Polycarbonato	720	10	80x70x70	596954	61,66	31,66
THB30.7,1	30	3080	Batería	Polycarbonato	720	10	80x70x70	596954	62,52	32,52

Tabla 11 Resultados de calor disipado por el sistema de refrigeración

Es muy importante mantener la temperatura de las baterías por debajo de los 65 °C, valor de temperatura límite de funcionamiento que permite la electrónica de control de la moto.

## Transferencia de calor de un cilindro por convección forzada

Todo el trabajo de simulación realizado hasta este punto ha de ser comparado con un modelo analítico que certifique que los resultados obtenidos son correctos. Como primera aproximación, se compara la transferencia de calor de un cilindro sometido a convección forzada.

Para ello, tomando como referencia [3], se sigue el ejemplo 7-5 de éste. El objetivo es conocer la transferencia de calor por unidad de distancia de un cilindro de diámetro 10 cm que se encuentra a 110 °C y sometido a la acción del viento a 10 °C y 8 m/s de velocidad (presión atmosférica 1 atm).

Suposiciones: existen condiciones estacionarias de operación. Los efectos de la radiación son despreciables. El aire es un gas ideal.

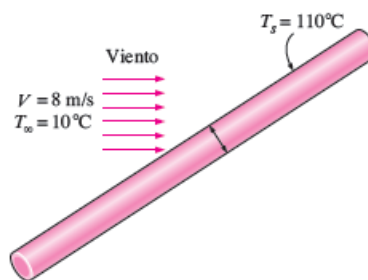


Figura 27 Condiciones ejemplo 7-5

El libro calcula que la tubería transmite calor a razón de 1093 W/m.

Replicamos esto en SolidWorks, modelando un cilindro de 1 m de longitud y aplicando una fuente volumétrica de temperatura al sólido de 110 °C con el objetivo de que esta temperatura no disminuya por el efecto del aire frío. La figura 29 muestra los resultados obtenidos de transferencia de calor, con un valor una vez la simulación converge de 1060 W/m. Esto supone una variación del 3% respecto al cálculo analítico de [3] y la posibilidad de aceptar las simulaciones realizadas como correctas.

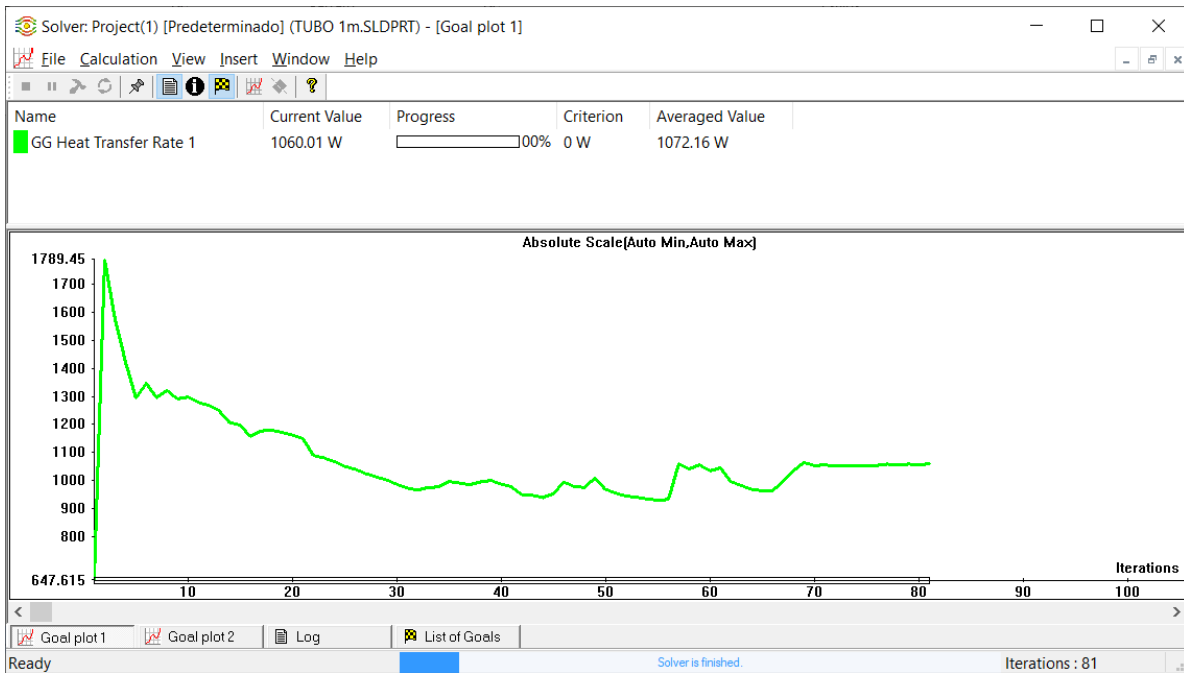


Figura 28 Resultados de transferencia de calor de la simulación del ejemplo 7-5

## Comparación estudio analítico frente a simulación de calor disipado

Tras validar el modelo para un cilindro simple, es momento de comparar el estudio analítico y de simulación del paquete de baterías completo.

Para el estudio analítico, se ha tomado como referencia el ejemplo 7-7 de [3], ya que trata de calcular la transferencia de calor de un banco de tubos hacia un flujo externo de aire. Para ello, un código ha sido creado en Matlab (Anexo 1) con el que conocer la transferencia de calor desde los tubos al aire en función de la velocidad del flujo.

Para adecuar el ejemplo del libro al caso objeto de este documento, se han tomado las siguientes medidas.

- El paquete de baterías se compone de tres packs colocados en tres pisos. Se toma una longitud equivalente de celda de 22 mm con el objetivo de tomar los tres bloques como un único bloque.
- Se supone que el área efectiva de las celdas en contacto con el aire es de un 80%.

El resultado obtenido en Matlab para una velocidad del aire de 1,8 m/s es de 2444,7 W (figura 30).



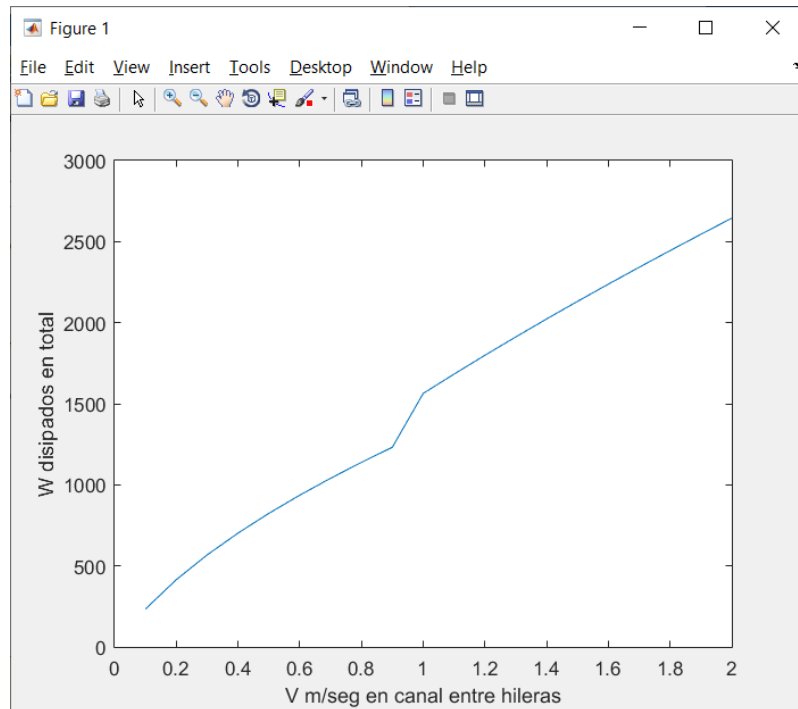


Figura 29 Potencia calorífica disipada frente a velocidad de aire entre canales

Como se muestra en puntos anteriores, la simulación de SolidWorks calcula que la disipación de calor obtenida por el flujo de aire a 1,8 m/s es de tan solo 448 W. Existe, pues, una gran diferencia entre los resultados analíticos y de simulación.

La explicación a este fenómeno se puede encontrar analizando de nuevo la figura 27. En negro se muestran las zonas donde el flujo de aire tiene una velocidad baja (aire lento), mientras que las zonas en púrpura muestran dónde se alcanza la velocidad objetivo de 1,8 m/s (aire rápido), que es básicamente en los canales de separación entre hileras.

Los cálculos analíticos toman en consideración que el 80% del área efectiva de las baterías están en contacto con el aire rápido, lo que no se ajusta a la realidad. Modificando este parámetro, obtenemos analíticamente los mismos resultados que en la simulación suponiendo que tan solo un 11% del área efectiva de las celdas está en contacto con el aire rápido (figura 31).

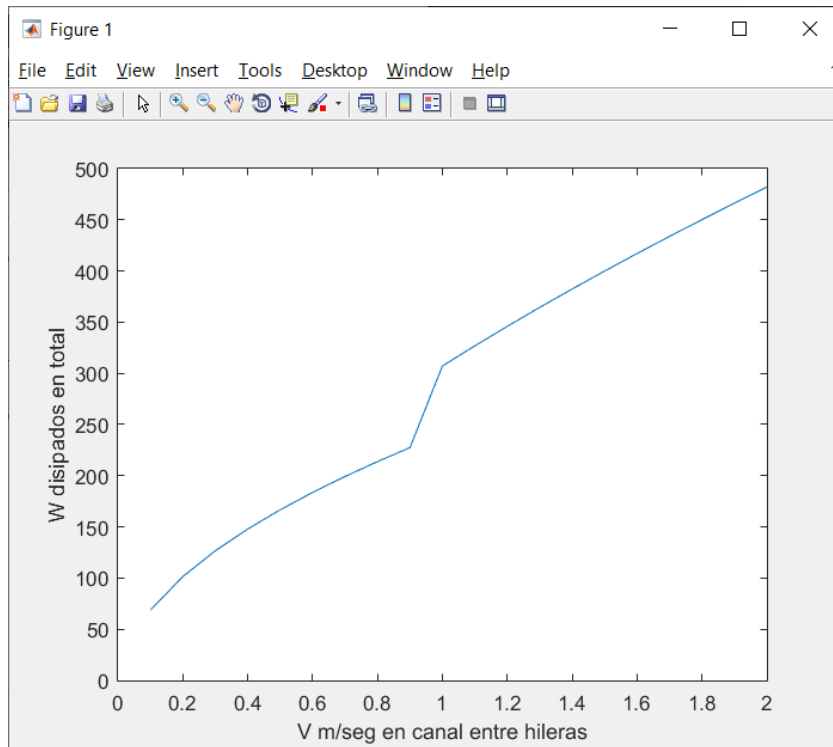


Figura 30 Potencia calorífica disipada frente a velocidad de aire entre canales (área efectiva corregida)

Las limitaciones de espacio en el vehículo nos obligan a hacer un paquete de baterías compacto, con una separación entre celdas de la misma hilera muy pequeña (1 mm) y disposición lineal. Esto dificulta el paso de aire entre ellas para su refrigeración. Como se puede observar mediante los cálculos expuestos, una mayor área efectiva en contacto con aire rápido mejoraría enormemente la refrigeración del paquete, así como una disposición diferente de las celdas.

## Resultados

### Estudio térmico en condiciones de funcionamiento reales

Hasta ahora, todas las simulaciones se han realizado suponiendo un régimen de descarga de 4C constantes durante los 12 minutos de carrera. Sin embargo, las condiciones de descarga reales esperadas no son tan exigentes, ya que durante una vuelta al trazado existen zonas de frenada y zonas donde no se exige la máxima aceleración posible.

Tomando los datos del apartado *Análisis del circuito*, es posible conocer aproximadamente la exigencia al motor durante la duración de una vuelta. Para ello, a partir de la velocidad media marcada en cada sector se obtiene el régimen de giro del motor y el par motor que éste entrega. La curva del motor (figura 32) enfrenta el par y la corriente de fase frente a las rpm, por lo que es posible conocer la corriente a que están siendo sometidas las celdas.

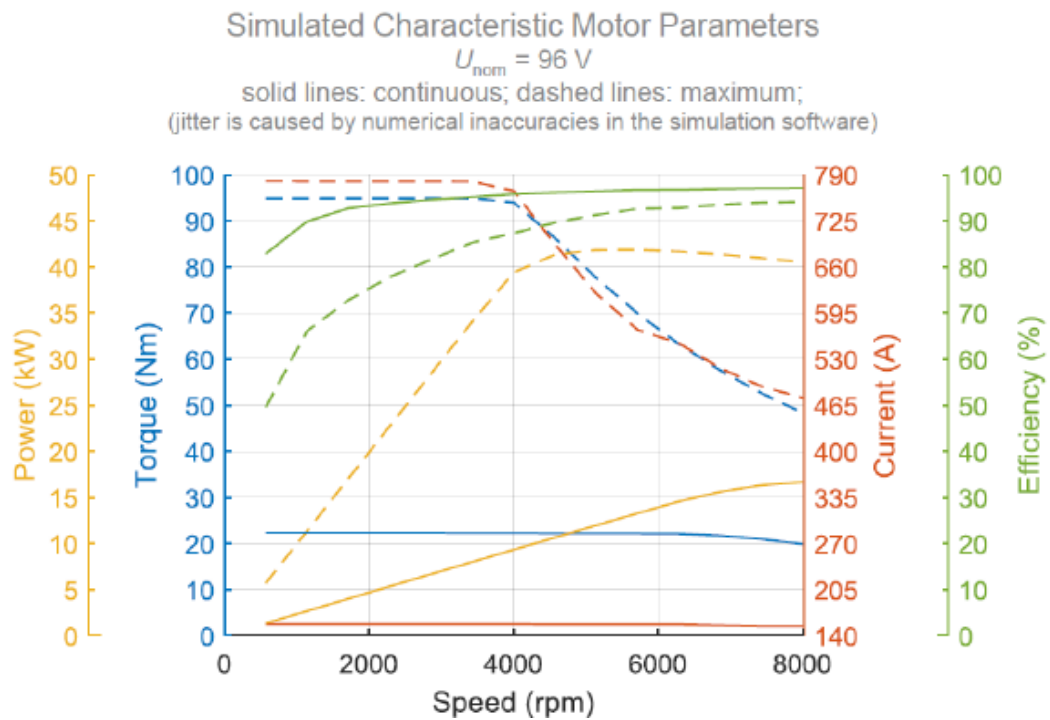


Figura 31 Curvas características del motor ENGIRO-MS1920

En este caso, para la velocidad máxima se toma la que tendrá el prototipo, marcada en 170 km/h. A partir del valor de corriente de fase, obtenido interpolando para el par y régimen de giro obtenido en cada sector, se calcula la corriente de cada celda:

$$I_{celda} = \frac{I_{fase} \cdot \sqrt{3}}{24} \tag{11}$$

Con este valor de corriente, se calcula la potencia calorífica producida por cada celda y por el paquete completo (9). Los resultados se muestran en la tabla 12.

Sector	Régimen	Longitud [m]	Tiempo [s]	Tiempo acumulado	Vel. media [m/s]	Aceleración [m/s <sup>2</sup> ]	rpm motor	Fa [N]	Par motor (Nm)	Corriente fase [A]	Corriente por celda [A]	Q [W]
1	Acelerador	98,00	1,75	1,75	47,222	0,000	6742	377,279	32,266	257,04	18,55	4806,56
2	Freno	184,30	4,90	6,65	36,528	-4,365	5215	225,744	22,130	0,00	0,00	0,00
3	Acelerador	239,00	6,90	13,55	36,528	3,102	5215	225,744	22,130	156,00	11,26	1770,44
4	Acelerador	99,11	2,13	15,67	47,222	0,000	6742	377,279	32,266	257,04	18,55	4806,56
5	Freno	78,00	2,33	18,00	45,833	-1,192	6543	355,412	30,804	0,00	0,00	0,00
6	Acelerador	214,00	4,56	22,56	45,833	0,610	6543	355,412	30,804	240,52	17,36	4208,58
7	Freno	220,00	5,57	28,12	35,417	-4,243	5056	212,219	21,226	0,00	0,00	0,00
8	Acelerador	96,59	3,70	31,82	31,806	4,435	4541	171,149	18,478	131,02	9,46	1248,84
9	Acelerador	69,65	1,34	33,15	42,361	3,537	6048	303,602	27,338	205,11	14,80	3060,60
10	Acelerador	106,50	2,15	35,30	45,972	1,163	6563	357,570	30,948	243,51	17,57	4313,87
11	Freno	133,50	4,19	39,49	37,083	-4,845	5294	232,663	22,593	0,00	0,00	0,00
12	Acelerador	232,56	6,18	45,66	37,083	3,284	5294	232,663	22,593	160,20	11,56	1867,06
13	Freno	152,00	4,99	50,65	36,389	-4,346	5195	224,030	22,016	0,00	0,00	0,00
14	Freno	53,19	1,25	51,90	22,917	-4,222	3272	88,853	12,974	0,00	0,00	0,00
15	Acelerador	254,95	5,58	57,47	32,361	4,335	4620	177,181	18,882	133,89	9,66	1304,16
16	Acelerador	451,63	10,91	68,38	45,833	0,255	6543	355,412	30,804	240,52	17,36	4208,58
17	Freno	166,28	5,25	73,63	37,222	-3,810	5314	234,409	22,710	0,00	0,00	0,00
18	Acelerador	152,76	4,45	78,08	34,444	3,246	4917	200,728	20,457	145,06	10,47	1530,83
19	Acelerador	142,28	2,61	80,68	44,306	2,026	6325	332,113	29,245	223,97	16,16	3649,33
20	Freno	121,30	4,41	85,09	36,389	-4,787	5195	224,030	22,016	0,00	0,00	0,00
21	Freno	69,50	2,77	87,86	24,444	-1,005	3490	101,095	13,793	0,00	0,00	0,00
22	Acelerador	115,62	4,60	92,46	32,361	4,046	4620	177,181	18,882	133,89	9,66	1304,16
23	Acelerador	242,20	5,04	97,50	44,444	1,102	6345	334,199	29,385	225,12	16,25	3686,90
24	Acelerador	488,87	7,83	105,33	47,222	0,000	6742	377,279	32,266	257,04	18,55	4806,56
25	Freno	225,97	4,34	109,67	43,611	-1,664	6226	321,784	28,554	0,00	0,00	0,00
26	Acelerador	177,12	3,40	113,07	40,000	0,000	5711	270,701	25,137	184,70	13,33	2481,80
27	Acelerador	133,15	3,07	116,14	43,611	2,353	6226	321,784	28,554	220,34	15,90	3531,99
28	Acelerador	337,64	6,55	122,68	47,222	0,000	6742	377,279	32,266	257,04	18,55	4806,56

Tabla 12 Resultados de par motor y potencia calorífica producida en una vuelta

Se observa que la corriente máxima de descarga de las celdas puede llegar a superar ligeramente los 4C (16 A). Solidworks permite la opción de introducir una fuente volumétrica de potencia variable con el tiempo, tal como se refleja en la figura 33. Parametrizada una vuelta completa, se toma como curva periódica para el resto de vueltas de carrera.

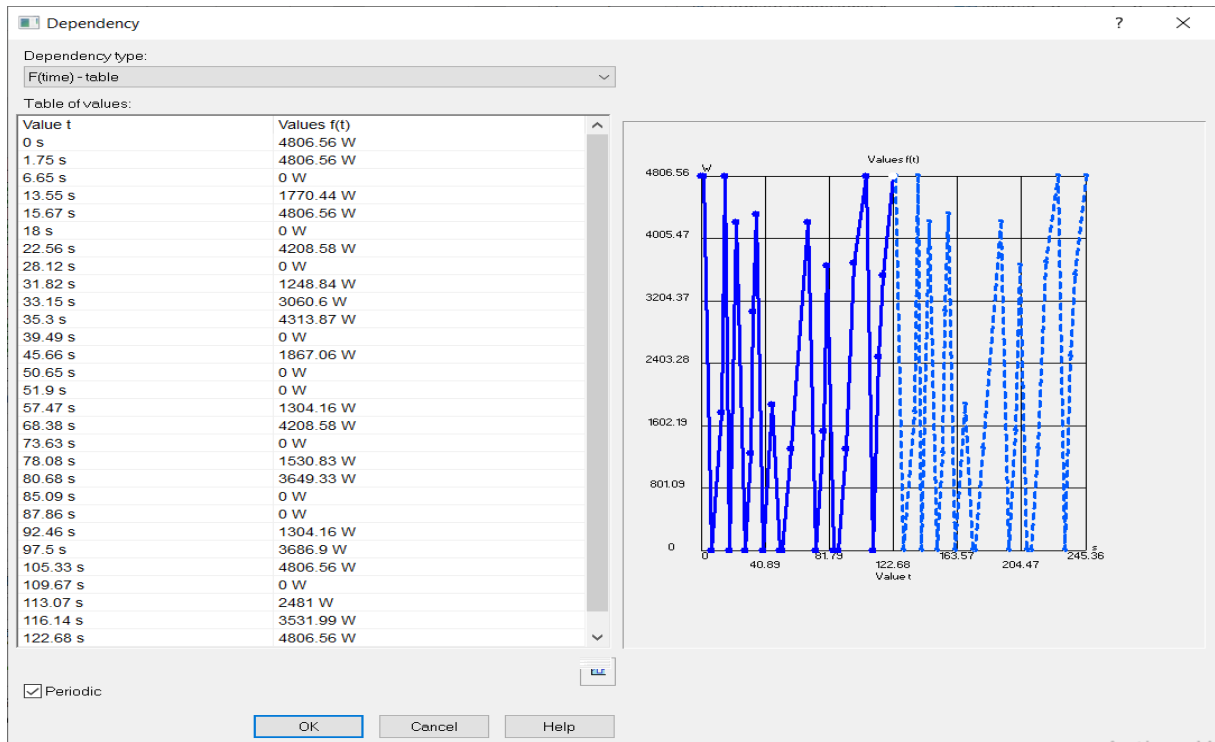


Figura 32 Introducción en Solidworks de fuente volumétrica de calor variable en el tiempo

Se lanza la simulación con las mismas condiciones que en el estudio “BOX6” reflejado en la tabla 10, exceptuando la mencionada fuente volumétrica de calor. Se obtiene así la evolución realista esperada de la temperatura del paquete de baterías con sistema de refrigeración incorporado (figura 34).

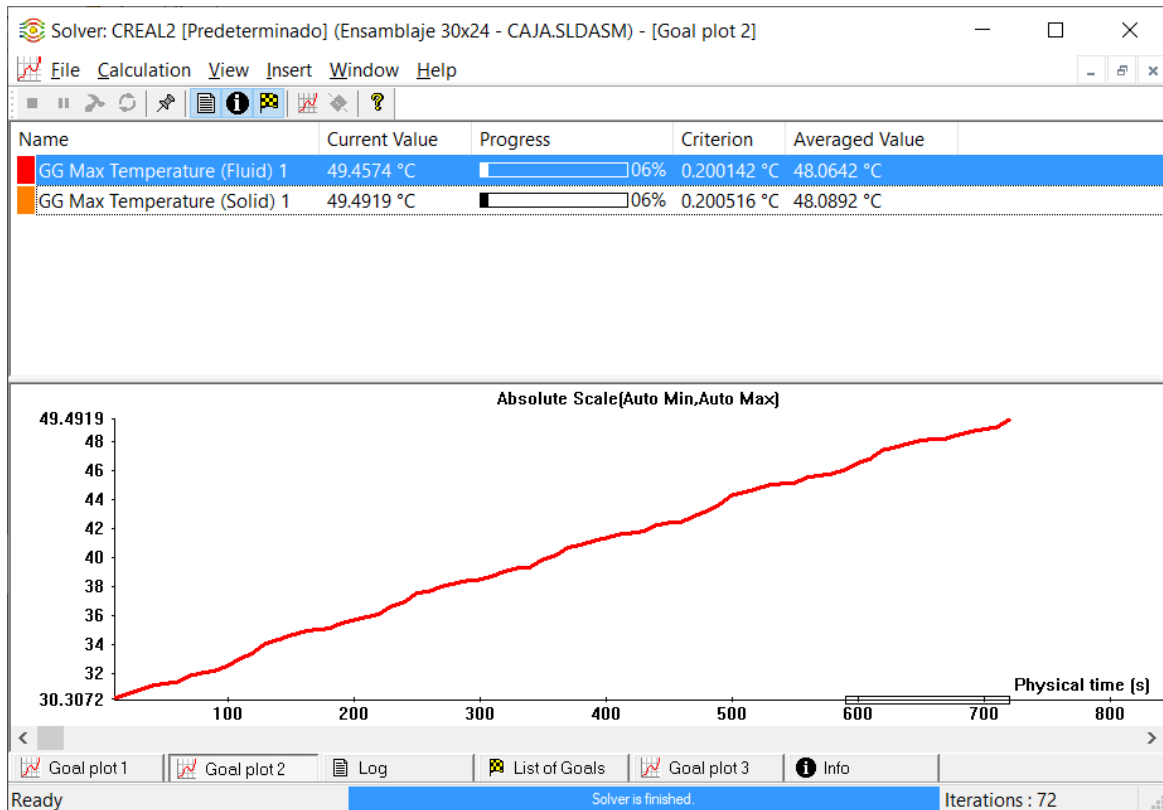


Figura 33 Evolución de temperatura máxima en condiciones realistas de descarga con refrigeración

La temperatura final del sistema de baterías sería de 49,5 °C. Estos resultados de temperatura suponen cumplir no solo con el límite de 65 °C fijados electrónicamente, sino con la temperatura de 50 °C recomendada por el fabricante para el funcionamiento óptimo de las celdas.

Este resultado se compara con el caso de que no existiese sistema de refrigeración (figura 35). La temperatura alcanzada en este supuesto es de 50,9 °C, por lo que el sistema de refrigeración extrae únicamente 1,4 °C. Obviamente, el sistema tiene un mayor efecto a medida que el gradiente de temperatura entre el sistema de baterías y el aire ambiente aumenta.

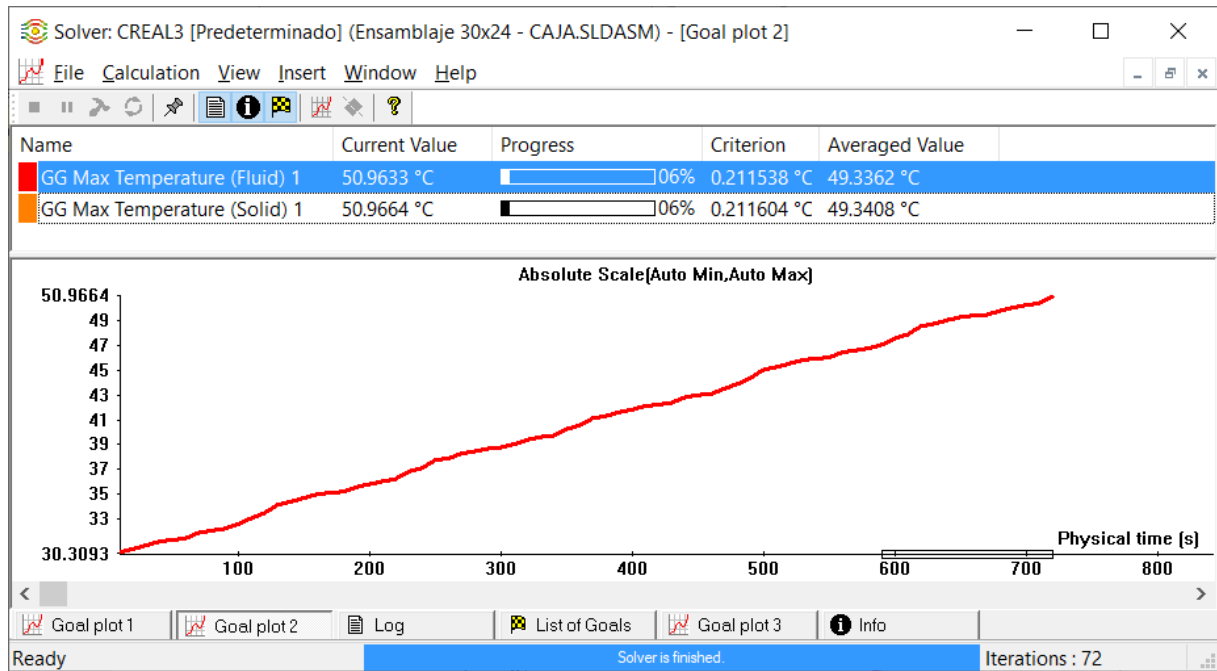
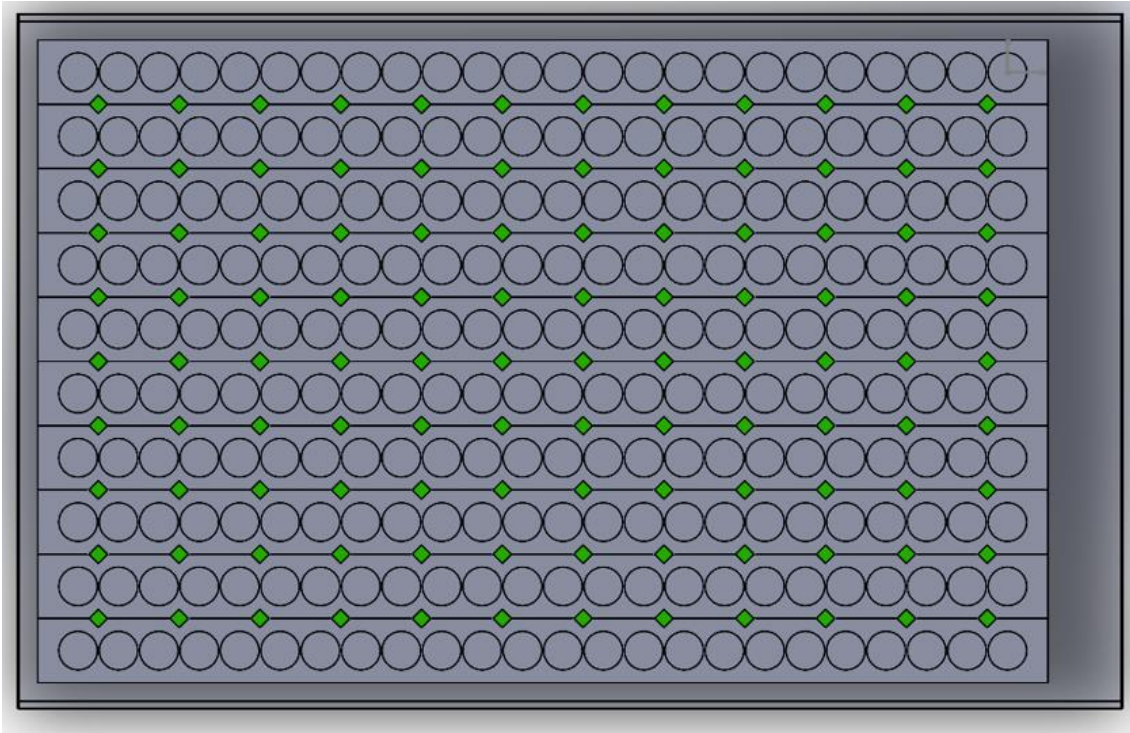


Figura 34 Evolución de temperatura máxima en condiciones realistas de descarga sin refrigeración

## Soluciones alternativas

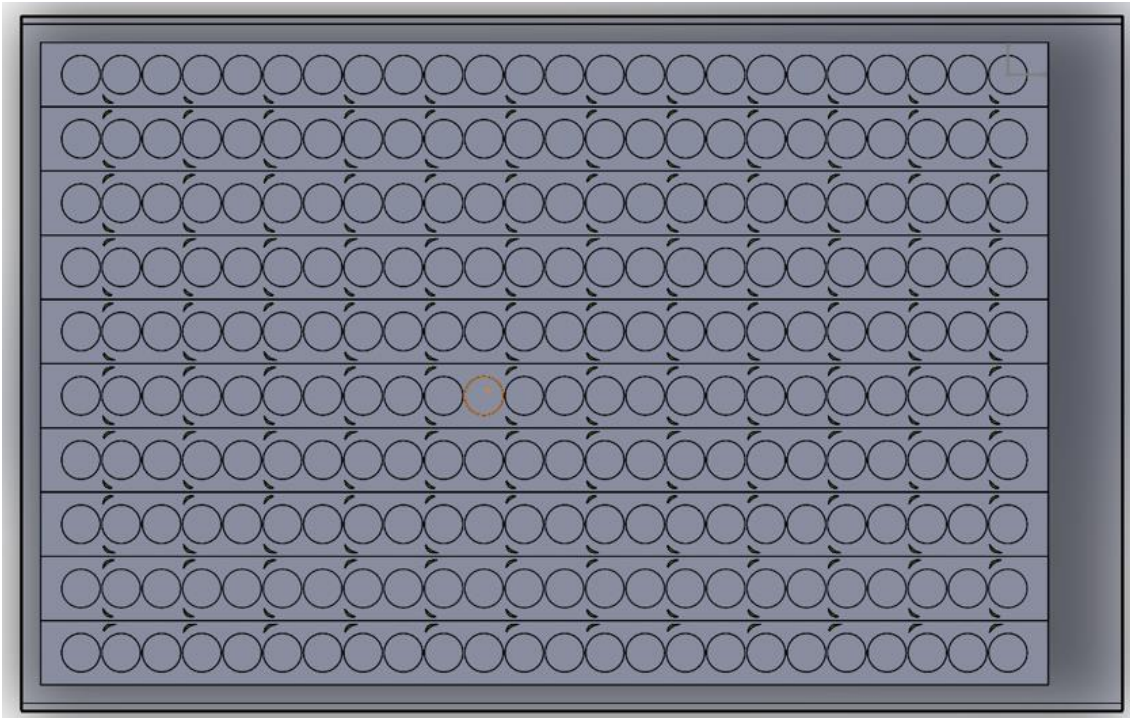
Conociendo el funcionamiento del paquete simple de baterías, se proponen tres modelos distintos para comprobar si la temperatura máxima puede ser disminuida. Para ello, se propone instalar una serie de difusores en los canales entre hileras que hagan al aire rápido desviarse hacia las zonas estrechas de separación entre celdas de una misma hilera, donde el aire tiene menor velocidad. Los modelos alternativos se presentan en las figuras 35, 36 y 37.

Estas alternativas se han simulado en las mismas condiciones que el estudio “BOX6”, y los resultados de temperatura final, para los tres casos, ha sido superior al modelo sin ningún tipo de difusor. La temperatura asciende hasta los 62,42 °C frente a los 62,1 °C originales. Por ende, estos diseños alternativos son desechados. Los motivos de este aumento de temperatura pueden ser achacados a la disminución de velocidad del aire general, factor que prevalece sobre la disminución de área con aire excesivamente lento.



Alternativa 1: Difusor en forma de rombo

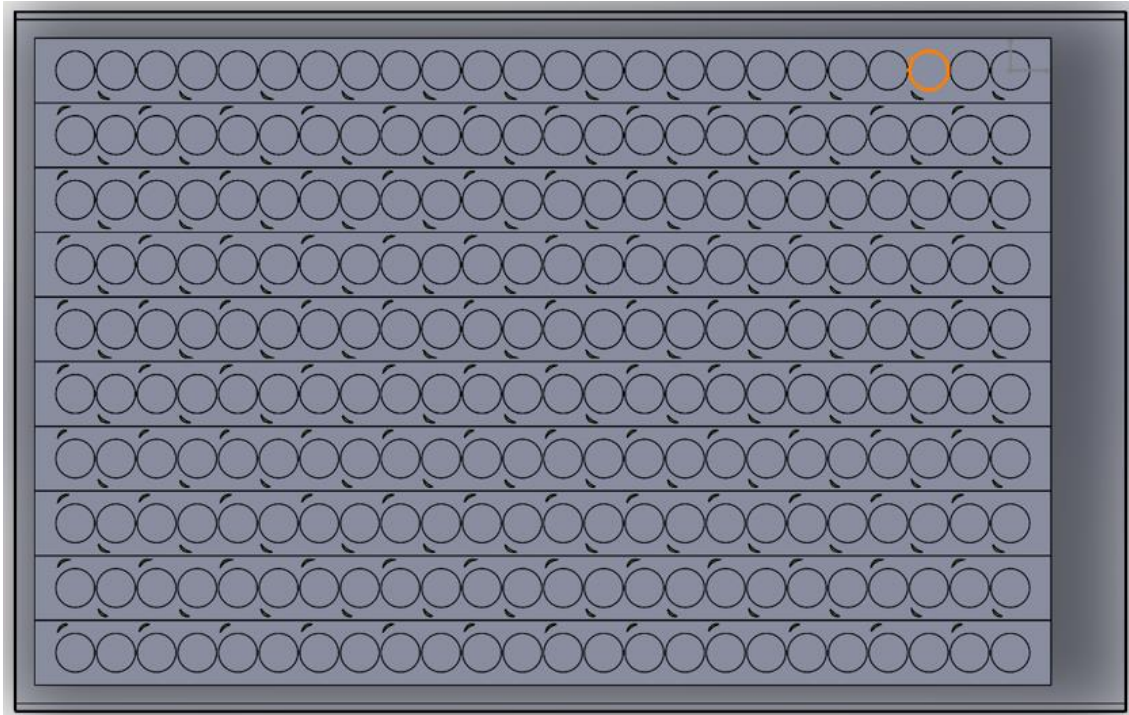
Figura 35 Diseño alternativo 1



Alternativa 2: Difusor aleta doble

Figura 36 Diseño alternativo 2





Alternativa 3: Difusor aleta a tresbolillos

*Figura 37 Diseño alternativo 3*

Las figuras 38, 39 y 40 muestran la distribución de temperatura y velocidad de aire en los tres modelos. Se aprecia claramente como la velocidad del aire es inferior en los canales entre hileras, y aunque la velocidad aumenta en las zonas más estrechas, no es suficiente para mejorar la refrigeración general.

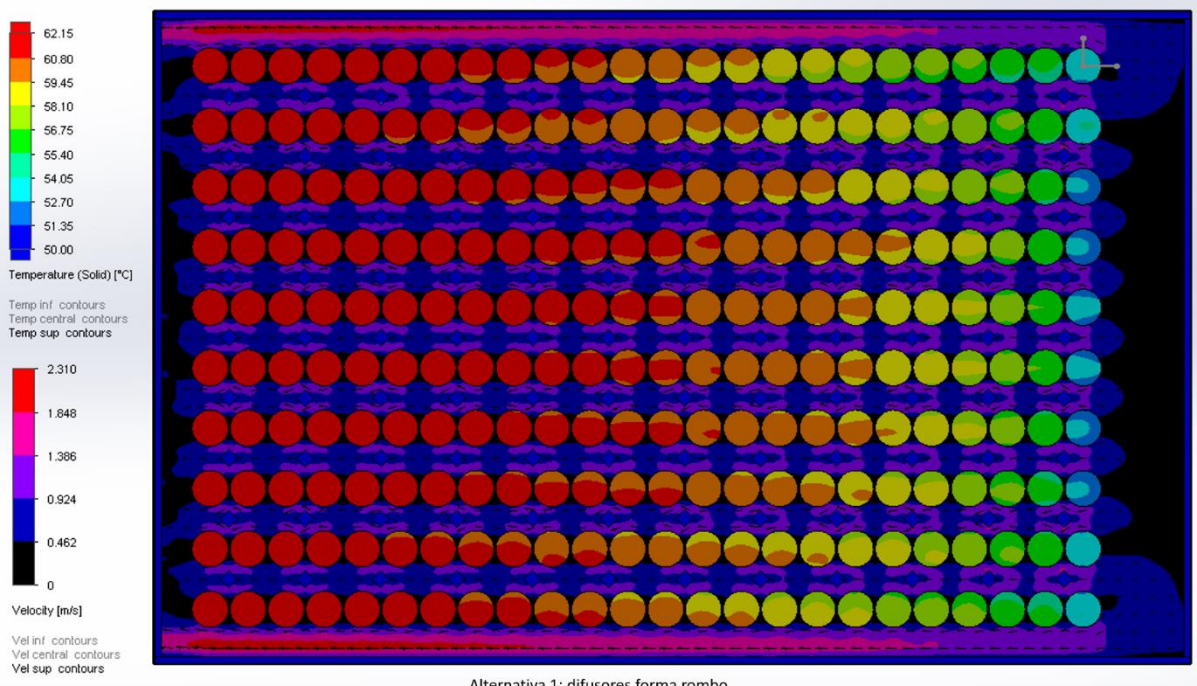


Figura 38 Distribución de temperatura máxima del sólido y velocidad del aire. Alternativa 1.

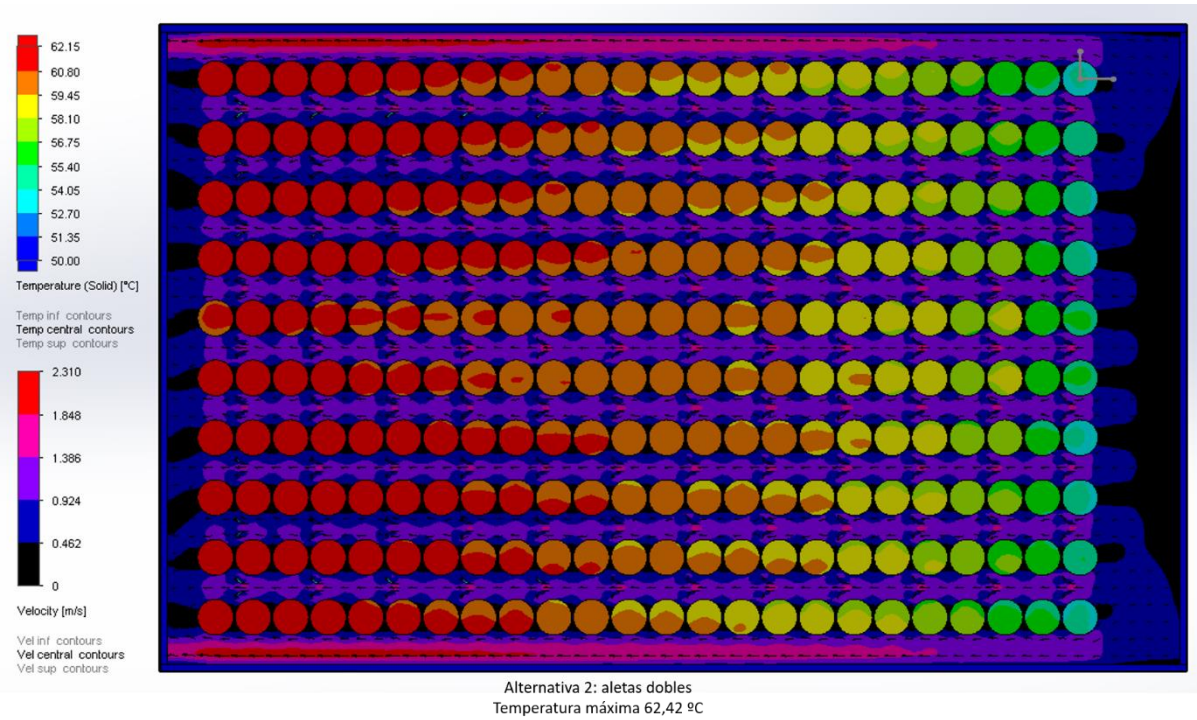


Figura 39 Distribución de temperatura máxima del sólido y velocidad del aire. Alternativa 2

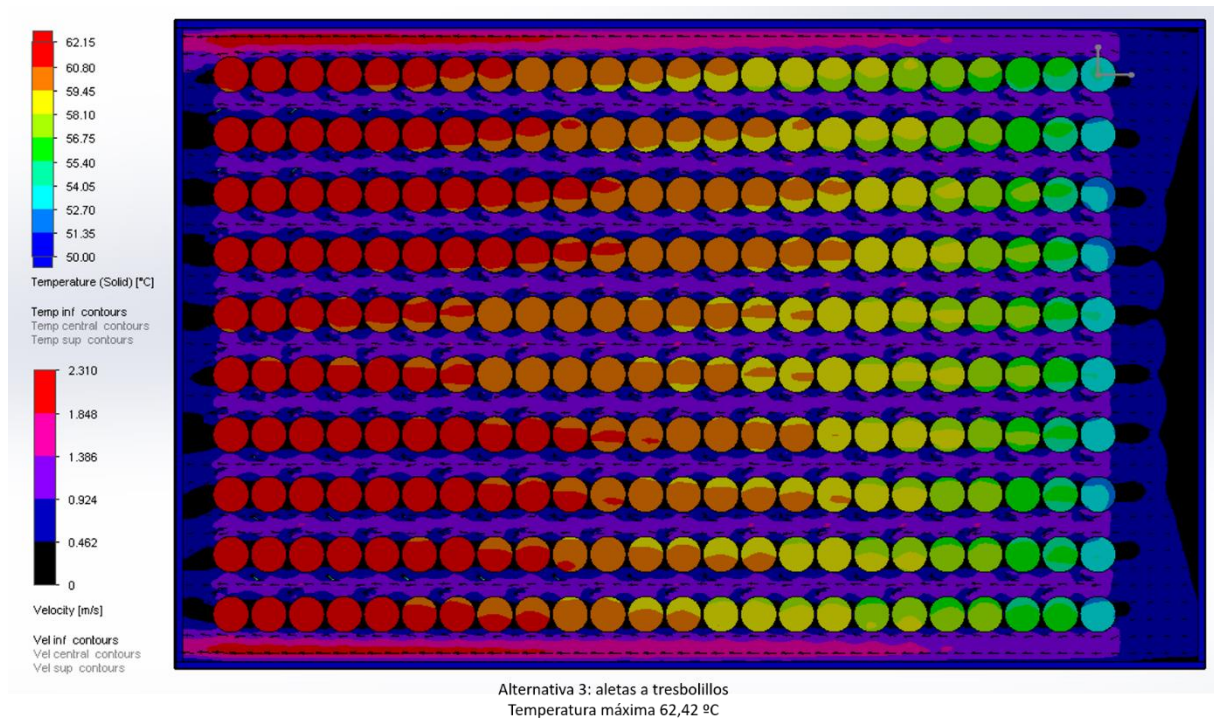


Figura 40 Distribución de temperatura máxima del sólido y velocidad del aire. Alternativa 3

## Conclusiones

Los objetivos marcados al comienzo de este trabajo han sido satisfechos. Se ha desarrollado y verificado un modelo térmico con el que analizar la evolución de temperatura del paquete de baterías y cómo varía este factor al instalar un sistema de refrigeración.

Los resultados obtenidos muestran que, tanto la distribución del conjunto de baterías, como el diseño del sistema de refrigeración por ventilación forzada, garantizan una temperatura de trabajo adecuada para la prueba más exigente a realizar por la motocicleta prototipo que la ULL presentará a competir en el campeonato Motostudent. La decisión de instalar o no un sistema de refrigeración ha de ser tomada desde el punto de vista de la seguridad. La figura 36 muestra como el efecto del sistema de refrigeración gana importancia a medida que las baterías alcanzan una temperatura mayor y el gradiente de temperatura respecto al aire ambiente aumenta.

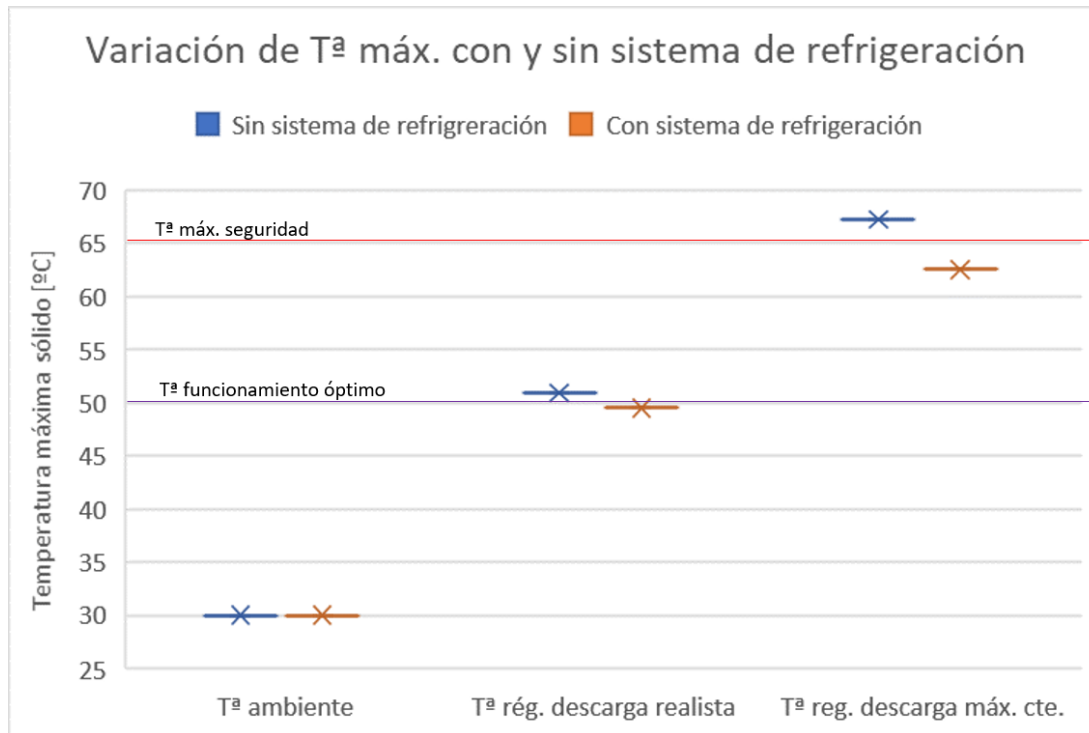


Figura 41 Variación de la temperatura máxima del sistema de baterías con y sin sistema de refrigeración

Desde la autoría de este TFM se recomienda su instalación. La temperatura ambiente puede ser más severa o puede producirse algún sobrecalentamiento no esperado. El sistema de refrigeración otorga un mayor margen de seguridad, mientras que el peso añadido no es un hándicap significativo.

Además, se han probado tres alternativas al ensamblaje del paquete de baterías con el fin de mejorar el rendimiento del sistema de refrigeración. Sin embargo, ninguna alternativa ha resultado satisfacer su cometido y han presentado unos resultados ligeramente peores a los obtenidos sin su implementación, por lo que son desechados.

Otra observación que se extrae del trabajo realizado, específicamente del experimento con termistores, es que la alta generación calorífica de las baterías en determinados periodos de tiempo se ve contrarrestada por la facilidad de pérdida de temperatura de éstas cuando no están entregando energía al motor.

Todo el trabajo de simulación realizado ha mostrado el potencial del CFD, concretamente de la herramienta que aporta el software Solidworks. Se ha demostrado la confiabilidad de los resultados que arroja comparándolos tanto con experimentos prácticos, como con supuestos analíticos de diversa complejidad. Las posibilidades que ofrecen estas herramientas se

vislumbran como el presente y futuro en el diseño térmico, ya que a los resultados certeros hay que sumarle las ventajas que ofrecen en cuestión de tiempos de diseño y rendimiento económico en comparación con métodos analíticos o experimentales.

## Bibliografía

- [1] Thomas S. Bryden, Borislav Dimitrov, George Hilton, Carlos Ponce de León, Peter Bugryniec, Solomon Brown, Denis Cumming, Andrew Cruden, *“Methodology to determine the heat capacity of lithium-ion cells”* (2018).
- [2] Wayne Cai, *“Lithium-Ion battery manufacturing for electric vehicles: a contemporary overview”*. Manufacturing Systems Research Laboratory, General Motors Global R&D Center. 2017.
- [3] Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar, *“Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones”*. Cuarta edición (2011).
- [4] Abhishek Das, Dezhi Li, David Williams and David Greenwood. *“Joining Technologies for Automotive Battery Systems Manufacturing”*. The University of Warwick. 2018.
- [5] S. Goutam, A. Nikolian, J. Jagemont, J. Smekens, N. Omar, P. Van Dan Bossche, J. Van Mierlo, *“Three-dimensional electro-thermal model of li-ion pouch cell: Analysis and comparison of cell design factors and model assumptions”*. 2017.
- [6] Meng Guo, Gi-Heon Kim, Ralph E. White, *“A three-dimensional multi-physics model for a Li-ion battery”*. 2013.
- [7] J. Jagemont, N. Omar, F. Martel, P. Van den Bossche, J. Van Mierlo, *“Streamline three-dimensional thermal model of a lithium titanate pouch cell battery in extreme temperature conditions with module simulation”*. 2017.
- [8] S. E. Fuenzalida Ramírez. *“Análisis térmico de sistemas de almacenamiento energético basados en baterías de ion-litio”*. Universidad de Chile. 2014.
- [9] Dassault Systemes. Solidworks Tutorials *“Solidworks fluid simulations 2019”*.

[10] Dassault Systemes. Solidworks Tutorials “*Enhanced turbulence modeling in SOLIDWORKS FLOW SIMULATION*”. 2013.

## Anexo 1 - Código Matlab: Cálculo analítico de transferencia de calor del paquete de baterías

```
%Claculo termico enfriamiento baterias.
clear all
clc
% Consideraremos una hilera de 24 tubos los centros de las hileras separados
% Seguimos capitulo 7 . 7.4 flujo sobre bancos de tubos
Ts= 62;%grados centigrados temperatura superficie bateria
Ti= 30;%grados centigrados temperatura input aire
Te= 62;% grados, temperatura exit aire
cc=0.014;%metros, distancia entre hileras
D=0.021;%metros, diametro bateria
% L=0.07;%metros, longitud de la bateria
L=0.22; %metros, longitud de la batería contando los tres paquetes y espacio
SL=D+0.001;%distancia longitudinal entre celdas
ST=cc+D;% distancia transversal entre tubos
NL=24;% tubos en linea
NT=10;% tubos en paralelo

nu=2.008E-5;% viscocidad
ro60=1.059;% kg/m3
ro30=1.16;% kg/m3
k=0.02808;% W/m K difusion termica del aire
Cp=1007;%kJ/kg K Calor especifico a presion constante del aire
% Pr=0.7202; % Prandtl

Vin=0.45; %m/s, velocidad entrada a la caja

%% Calculamos la velocidad máxima, el número de Reynolds y Nusselt
dVmax=0.1;

for i=1:20

    Vmax=0.1+(i-1)*dVmax;%m/seg OJO a verificar luego
    VV(i)=Vmax;
    Re=ro60*Vmax*D/nu;
    Pr=0.7202;
    Prs=Pr; % a la salida el gas mas caliente tendra un prandtl menor

    % Numero de Nusselt promedio de tabla 7.2 pag 441d
    if Re <=100
```

```

    NuD=0.9*Re^0.4*Pr^0.36*(Pr/Prs)^0.25;
end
if Re > 100 && Re<=1000
    NuD=0.52*Re^0.5*Pr^0.36*(Pr/Prs)^0.25;
end
if Re > 1000 && Re <= 2E5
    NuD=0.27*Re^0.63*Pr^0.35*(Pr/Prs)^0.25;
end

%% Coeficiente h
h=NuD*k/D;
As=NL*NT*pi*D*L*0.11;%m2 Asumo que solo el 85% del área es efectiva
m_dot=ro60*Vmax*(NT*ST*L);%flujo masico a traves de todos los tubos

Te_real=Ts-(Ts-Ti)*exp(-((As*h)/(m_dot*Cp)));

DT_log=((Ts-Te_real)-(Ts-Ti))/log((Ts-Te_real)/(Ts-Ti));
Q_dot(i)=m_dot*Cp*(Te_real-Ti);%watts

Te_real
Q_dot

end

plot(VV,Q_dot,VV,1,'r');
xlabel('V m/seg en canal entre hileras');
ylabel('W disipados en total')

```

