

Proyecto Fin de Carrera

Cálculo diseño y construcción de un sistema de refrigeración para los cofres de baterías de vehículo eléctrico.

Autor

Guillermo Monreal Elorza

Directores

Emilio Larrodé Pellicer
Juan Bautisa Arrollo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura EINA-Universidad de Zaragoza
Ingeniería Industrial
2014

Agradecimientos

La realización de este proyecto no habría sido posible sin la ayuda y el apoyo que me han ofrecido mi director de proyecto, Emilio Larrodé y el subdirector Juan Bautista Arroyo, permitiéndome participar en el proyecto que están llevando a cabo y resolviéndome las dudas que han surgido durante estos meses, habiéndome ayudado a afianzar mi formación como Ingeniero Industrial.

Además, en estos años de carrera ha sido de especial importancia el apoyo y la comprensión de todas esas personas que han estado siempre a mi lado tanto en los mejores como en los peores momentos. Por eso me gustaría dar las gracias en un primer lugar a mis padres, a mi hermana y al resto de mis familiares. También una especial mención a mi novia, a mis amigos y a mis compañeros de carrera, y de otras carreras que siempre podrán contar conmigo como yo he podido contar con ellos.

A todos, muchísimas gracias.

Cálculo diseño y construcción de un sistema de refrigeración para los cofres de baterías de vehículo eléctrico.

RESUMEN

Este proyecto nace de la colaboración entre la Universidad de Zaragoza y la empresa aragonesa Zytel Automoción. El proyecto tiene como objetivo principal el estudio de la generación de calor en los diferentes paquetes de baterías de un vehículo eléctrico y la realización si fuera necesario de un intercambiador de calor para la evacuación del mismo y cumplir con los objetivos de seguridad y confort dentro del habitáculo. Este proyecto se sitúa en el marco de uno mayor cuyo objetivo es la transformación de un vehículo con motor térmico a uno de tracción eléctrica con cero emisiones capaz de realizar largos recorridos y disponer de altas prestaciones.

La realización del proyecto conllevará diversos estudios. En un primer lugar se estudia el tipo de baterías que se disponen en el vehículo, cuya elección ya fue realizada en un proyecto anterior, centrándonos en las causas que producen la generación de calor. El estudio se basa en los valores de tensión e intensidad que son capaces de suministrar las baterías según el fabricante, con el fin de realizar el estudio de las mismas en las distintas condiciones de operación. Uno de los pasos esenciales se centra en la realización de un modelo teórico del comportamiento térmico de las baterías, que sea lo suficientemente aproximado a la realidad como para poder utilizarlo para los cálculos de la cantidad de calor a evacuar. Este modelo se apoya sobre ciertos experimentos realizados con las baterías, descargando estas a diferentes intensidades durante distintos periodos de tiempo. Una vez realizado el cálculo de la temperatura alcanzada por el sistema gracias a dicho modelo, se procede al diseño e implementación de un intercambiador capaz de mantener la temperatura del habitáculo contenedor de las baterías en unos valores aceptables indicados anteriormente. Se estudia también la posibilidad de implantar el sistema calculado, debiendo ser este modificado en el caso de que la geometría del sistema, la cual vendrá determinada de antemano, no permita su implementación. Se realizará el montaje del sistema final calculado y por último se comprobarán experimentalmente las condiciones térmicas en los diferentes grupos de baterías para verificar que cumplen con los requisitos de seguridad tanto para los ocupantes del vehículo como para su propio funcionamiento.

Índice

1.Introducción.....	1
1.1. Justificación	1
1.2. Alcance y objetivos.....	1
1.3. Supuestos e hipótesis.....	1
1.4. Restricciones.....	2
1.5. Organización del proyecto.....	3
2. Estado del arte.....	5
2.1. Celdas electroquímicas.....	5
2.1.1. Introducción.....	5
2.1.2. Reacción óxido-reducción.....	6
2.1.3. Equilibrio o parámetros termodinámicos	6
2.1.4. Generación de calor.....	8
2.2. Baterías LiFePO ₄	9
2.2.1. Funcionamiento.....	9
2.2.2. Características.....	10
2.3. Efectos de la temperatura.....	12
2.3.1. Efectos sobre el habitáculo.....	12
2.3.2. Efectos sobre las baterías.....	13
2.4. Disposición de las baterías en el vehículo	15
2.4.1. Grupos.....	16
2.4.2. Conexión	16
3. Análisis del calor generado y de la temperatura alcanzada.....	19
3.1 Hipótesis de cálculo.....	19
3.1.1. Condiciones de uso.....	19
3.1.2. Constantes, características y modelo teórico del sistema.....	20

3.2. Procedimiento de cálculo.....	22
3.3. Resultados	24
3.4. Comparaciones con los resultados experimentales	25
4.Cálculo del sistema de refrigeración.....	27
4.1. Evaluación de la necesidad de refrigeración	27
4.2. Descripción del sistema de refrigeración propuesto.....	28
4.3.1. Parámetros generales.....	28
4.3.2. Geometría del sistema.....	30
5.Instalación.....	33
5.1. Viabilidad del sistema de refrigeración	33
5.2. Sistema definitivo a instalar.....	34
5.2.1. Necesidad de refrigeración.....	34
5.2.2. Geometría del sistema.....	35
5.2.3. Sistema definitivo.....	36
5.3 Instalación.....	37
6. Protocolo validación.....	41
7. Conclusiones	43
8. Bibliografía.....	45

Anexos

Anexo 1	A1
Anexo 2	A4
Anexo 3.....	A5
Anexo 4	A17
Anexo 5	A18
Anexo 6	A22
Anexo 7	A37

Anexo 8A41

Anexo 9A49

Anexo 10A57

Anexo 11.....A59

1. Introducción

1.1. Justificación

En el marco de la Zero Race, carrera en la que un vehículo eléctrico deberá dar la vuelta al mundo con cero emisiones de CO₂ (en colaboración con la empresa ZYTEL), en un primer lugar, y del concurso EDP University Challenge, en segundo lugar, el Grupo de Investigación en Transporte y Logística se propone el diseño de todos los componentes de un vehículo eléctrico todoterreno para su uso en investigación y pruebas, teniendo como objetivo el buen funcionamiento del conjunto.

La existencia de grandes demandas de energía a las baterías por tratarse de un vehículo todoterreno que se verá sometido a condiciones extremas de temperatura, existiendo una necesidad primordial de conservar los sistemas de almacenamiento de dicha energía en unas condiciones óptimas de funcionamiento y almacenamiento, justifica el cálculo e instalación de un sistema de refrigeración capaz de realizar esta función.

1.2. Alcance y Objetivos

El presente proyecto trata de proporcionar una solución aproximada para la refrigeración del cofre de baterías más voluminoso, y así pues, el que se supone que alcanza la mayor temperatura. No se calcula la temperatura alcanzada de forma exacta, sino a través de ciertos modelos aproximados sencillos que se ajusten a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, pero sí que se calculan e instalan todos los elementos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema propuesto.

El objetivo principal es el mantenimiento de los diferentes grupos de baterías a una temperatura inferior a la máxima recomendada para su correcto funcionamiento. Para ello se precisa la instalación de un sistema de refrigeración que se adapte a la complicada geometría de los cofres donde están instaladas las baterías, la cual no puede ser modificada en ningún caso debido a los elementos ya instalados.

1.3. Supuestos e hipótesis

Para el cálculo y diseño del sistema de refrigeración se ha partido de una serie de suposiciones y limitaciones dadas por diseños anteriores a este proyecto, las cuales se enumeran a continuación.

- Se calcula la temperatura alcanzada en cada celda a partir de la generación térmica producida en cada una de ellas, que viene dada por la resistencia interna de dicha batería (se puede modelar el calor generado en la reacción del litio como las pérdidas debidas a la resistencia interna de la célula).

- Se deben considerar todos los métodos de transferencia de calor, con lo que el calor se transmite por conducción en el interior de las celdas, por convección entre la superficies de estas y el fluido exterior (aire) y por radiación desde la superficie. Se consideran en primer lugar todos los métodos, despreciando aquellos cuya aportación lo permita.
- La refrigeración se realiza por convección forzada, utilizando aire a temperatura ambiente como refrigerante.
- La temperatura de las células debe ser lo más uniforme posible con el fin de no dañar la vida de las baterías.
- Los cálculos de la temperatura alcanzada así como de la refrigeración se basan en la condiciones más extremas que puedan darse, con el fin de asegurar la correcta refrigeración del conjunto en cualquier situación potencial, obteniéndose de la hoja de características del fabricante.
- Se busca que la temperatura de las baterías supere lo menos posible a la temperatura máxima de trabajo recomendada (55°C), y que no supere en ningún punto la temperatura máxima admisible de 75°C, a partir de la cual se vería gravemente afectada la vida de las baterías.
- El estudio se basa únicamente en la refrigeración del sistema de baterías. Se considera que las condiciones de operación nunca serán tales que se deba instalar un sistema de calefacción para que la temperatura de las baterías esté dentro del rango de operación.

1.4. Restricciones

Las restricciones de este proyecto son el punto más importante, ya que determinan el alcance máximo del mismo y las condiciones de contorno del problema. La mayor restricción se puede encontrar en la geometría e indica cuales son los sistemas de ventilación que pueden instalarse. Esto es, no se permite modificar la geometría de los cofres que contienen las baterías ya que estos ya han sido previamente diseñados. En el caso de que ésta no permita la instalación de un sistema de refrigeración adecuado, éste no se diseñará para su construcción, pero sí que se propondrá la solución adecuada en el caso de poder realizar modificaciones.

Se busca el método de refrigeración más simple, que consiste en la instalación de un cierto número de ventiladores y/o extractores de aire a la temperatura ambiente según una configuración óptima dentro de las restricciones geométricas.

La refrigeración se lleva a cabo teniendo en cuenta las siguientes restricciones geométricas.

1. Los grupos 1 y 2 no pueden refrigerarse por aire debido a la falta de espacio para la instalación de un sistema de estas características. No se lleva a cabo esta tarea, pero sí que se proponen los sistemas de refrigeración adecuados tanto en el caso de que se pueda modificar la disposición de las células.
2. En el grupo 3 de baterías sí que se calcula e instala dicho sistema debido a la mayor disponibilidad de espacio. Sin embargo, la refrigeración sólo afecta a la

superficie superior de las células, donde se encuentran los bornes, que si bien es incapaz de refrigerar el conjunto por completo y da lugar a una temperatura no del todo uniforme en el grupo, está refrigerando la zona de la batería en la que se alcanza mayor temperatura, y por lo tanto la más crítica.

3. Los ventiladores/extractores a instalar no pueden superar los 10cm de diámetro y se deben instalar los suficientes para que el flujo de aire sea lo más uniforme posible a lo largo de toda la superficie.

1.5. Organización del proyecto

El proyecto se ha organizado según 7 capítulos, incluyendo la introducción que nos ocupa, y la bibliografía como último capítulo.

En el segundo capítulo se realiza una descripción general de las baterías, su funcionamiento y cómo se ven afectadas por los diferentes cambios en el entorno o en su régimen de funcionamiento. Se hará una breve descripción de las baterías de Litio-Fosfato de hierro 4, citando sus principales características, así como de los cofres donde han sido instaladas.

En tercer capítulo se ocupará del cálculo de las temperaturas alcanzadas en función de los diferentes regímenes de funcionamiento a partir de la deducción de un modelo teórico de las baterías obtenido gracias a ciertos ensayos de laboratorio, de los cuales también se realizará su descripción.

El capítulo 4 abordará la elección más importante del presente proyecto, determinando si es necesaria o no la instalación de un sistema de refrigeración. En el caso de que sea necesaria su implantación, se calcularán varios sistemas, eligiendo aquel que resulte más óptimo para el objetivo perseguido.

En el capítulo 5 se discute si va a ser posible instalar el sistema de refrigeración calculado debido a las limitaciones geométricas impuestas, así como las modificaciones que podrían ser necesarias en dicho sistema, describiendo la geometría, potencia y magnitud del intercambiador de calor elegido finalmente. Se describe también la instalación de dicho sistema, así como los elementos auxiliares que serán necesarios para su correcto funcionamiento.

El capítulo 6 describe el método que deberá seguirse para la comprobación del correcto funcionamiento del sistema tras su instalación. Se describirán los pasos a seguir de manera teórica debido a la no disponibilidad de todos los elementos del vehículo para poder realizar dichas pruebas.

En el último capítulo se resumen las principales conclusiones y logros obtenidos durante el proyecto, proponiendo posibles líneas de investigación para el trabajo futuro.

Se especifican, después de la bibliografía, los anexos, donde se pueden encontrar las gráficas, tablas y cálculos en los que se ha apoyado este proyecto.

2. Estado del arte

Las baterías de ión-litio han recibido una atención considerable en los últimos años para su aplicación en la electrónica así como en vehículos eléctricos debido a su relativamente alta densidad de energía y su alto ciclo de vida. Con el fin de alcanzar la potencia requerida, se necesita un gran número de células conectadas o bien en serie o en paralelo. En el caso que nos ocupa, la cuestión de la seguridad debido al aumento de temperatura en las células durante su funcionamiento debe tenerse muy en cuenta. Hay una fuerte interdependencia entre la variación de la temperatura en las baterías y su comportamiento electroquímico. En general, un aumento en la temperatura durante la carga o la descarga es perjudicial para su comportamiento ya que acelera la degradación del electrolito, los electrodos y los separadores. Por consiguiente, la distribución de la temperatura y la disipación del calor son factores cruciales en el desarrollo de las baterías ión-litio.

El trabajo previo en que se apoya este PFC es el conjunto de proyectos, tanto de fin de carrera como de máster que se realizaron para la transformación completa de un vehículo térmico (Suzuki Jimmy) en un vehículo eléctrico de competición y pruebas.

2.1. Celdas electroquímicas

2.1.1. Introducción.

Una batería es un dispositivo que convierte la energía química contenida en su material activo directamente en energía eléctrica, por medio de una reacción electroquímica de oxidación y reducción; en este tipo de reacción ocurre una transferencia de electrones de un material a otro.

La energía eléctrica juega un papel importante en nuestras vidas diarias. Esta puede ser fácilmente convertible en calor o energía mecánica. Sin embargo, un problema general es que la energía eléctrica no puede almacenarse fácilmente. Los condensadores permiten almacenar energía eléctrica directamente, pero la cantidad de energía que pueden almacenar es muy pequeña comparada con la demanda en un vehículo eléctrico. En general, el almacenamiento de energía eléctrica requiere una conversión en otra forma de energía. En las baterías, sus compuestos químicos son utilizados como medio de almacenamiento energético, en la que durante su descarga se produce un proceso químico donde se genera energía que puede extraerse en forma de corriente eléctrica a una determinada tensión. Este proceso puede ser reversible y la batería ser recarga mediante la introducción de una corriente a una determinada tensión restaurando la estructura química original [1].

2.1.2. Reacción Oxido-reducción.

Una batería está caracterizada por su reacción química. Se denomina batería al conjunto de una o más celdas conectadas en serie o paralelo, dependiendo del valor de tensión y capacidad.

La celda está formada por el electrodo, los separadores, el electrolito, el envase y los terminales (Figura 2.1) [2],[3].

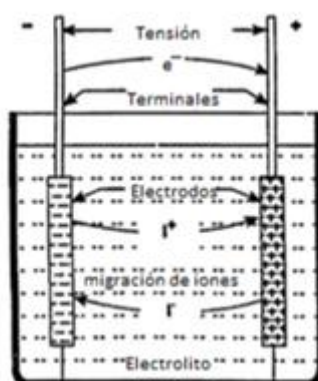


Figura 2.1: Célula electroquímica

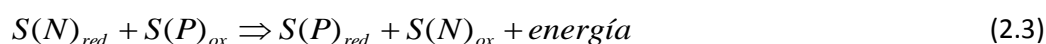
Un electrodo positivo y otro negativo se sumergen en el electrolito y las sustancias reactivas (el material activo) por lo general se almacenan dentro de los electrodos, a veces también en el electrolito. Durante la descarga, el electrodo negativo contiene la sustancia que es oxidada, mientras que el electrodo positivo contiene el oxidante, es decir, acepta los electrones. Así, la oxidación del electrodo negativo $S(N)_{red}$ se produce de acuerdo a:



mientras que $S(P)_{ox}$ se reduce en el electrodo positivo



Los dos juntos forman la reacción de la célula:



Cuando se recarga la batería, esta reacción es invertida y la cantidad de energía correspondiente debe ser suministrada a la célula [2].

2.1.3. Equilibrio o parámetros Termodinámicos.

Las leyes de la termodinámica se aplican en general al estado de equilibrio, por lo que los parámetros termodinámicos no dependen del camino realizado para llegar a estos puntos de equilibrio sino que depende solo de los diferentes niveles de energía entre los componentes

iniciales y finales (los productos y los reactivos de la reacción electroquímica). Los parámetros termodinámicos describen el posible límite superior del rendimiento.

Los parámetros termodinámicos de una reacción electroquímica son:

- La entalpía de la reacción ΔH representa la cantidad de energía liberada o absorbida. ΔH describe la generación de calor máxima, siempre que la energía química se convierta al 100% en calor.
- Entalpía libre de la reacción ΔG , también llamada “energía libre de Gibbs”, representa la cantidad (máxima) de energía química que se puede convertir en energía eléctrica y viceversa.
- Entropía de la reacción ΔS ; caracteriza la energía reversible perdida o ganada relacionada con la reacción electroquímica.

Las relaciones más importantes entre los tres parámetros son:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.4)$$

$$\Delta H - \Delta G = T\Delta S \quad (2.5)$$

donde

T Temperatura [K]

La diferencia entre ΔH y ΔG , el producto de $T\Delta S$, se denomina efecto calórico reversible. Este representa el intercambio de calor con el entorno cuando el proceso se produce de forma reversible, lo que significa que todos los estados están equilibrados. $T\Delta S$ puede ser positivo o negativo, siendo positivo cuando la energía adicional es generada por un enfriamiento del entorno, o bien, negativo cuando proporciona calor adicional. La tensión de equilibrio de la célula $U_0(V)$ está determinada por:

$$U^0 = -\frac{\Delta G}{nF} \quad (2.6)$$

donde

n Es el número de cargas electrónicas intercambiadas

F Constante de Faraday, igual a 96485 C/mol Con lo que, el producto de $nF.U^0$ representa la energía eléctrica generada en kJ.

Como conclusión, los parámetros termodinámicos describen los valores fundamentales de una batería, como la tensión de equilibrio y la capacidad de almacenamiento energético. Los valores termodinámicos como ΔH y ΔG dependen de las concentraciones de los componentes reactivos. En la medida que estos están disueltos, la expresión que los relaciona es:

$$\Delta G = \Delta G_s + RT(\sum \ln[(a_i)^{j_i}]_{prod} - \sum \ln[(a_i)^{j_i}]_{react}) \quad (2.7)$$

donde

- a_i : Actividad del componente reactivo (aproximadamente la concentración en [mol/cm³])
- j_i : Número de equivalentes del compuesto que toman parte en la reacción
- R : Constante molar de los gases ideales ($R = 8,3145 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)
- T : Temperatura [K]

Combinando las Ecuaciones (2.6) y (2.7), obtenemos la llamada "Ecuación de Nernst":

$$U^0 = U^{0,s} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{\prod (a_i)^{j_{\text{react}}}}{\prod (a_i)^{j_{\text{prod}}}} [\text{V}] \quad (2.8)$$

Esta ecuación es utilizada para calcular el potencial de reducción de un electrodo cuando las condiciones no son estándar (concentración 1M, presión 1 atm y temperatura de 298 K). El "potencial de reducción" es como se conoce a la tendencia de las especies químicas en una reacción redox o de un electrodo en una celda galvánica a adquirir electrones. Se produce por la reacción de dos semiceldas que no están en equilibrio y se mide en milivoltios por comparación con un electrodo de referencia como el de hidrógeno [3].

2.1.4 Generación de calor.

La realización de este proyecto se basa en el estudio de la generación de calor en las baterías y sus efectos sobre la misma y el entorno. Por ello debemos comprender adecuadamente cuál es el proceso por el cual se genera dicho calor en la batería dada.

Las reacciones químicas descritas anteriormente liberan una cierta cantidad de energía que puede calcularse a través de la variación de entalpía química como:

$$\Delta H_R = \sum n_p \Delta H_f^p - \sum n_R \Delta H_f^R \quad (2.9)$$

Siendo

R: reactivos

P: productos

H: entalpía (J/mol)

n: moles del elemento (mol)

La mayor parte de esta energía se recupera en forma de electricidad, y el resto produce calor que es disipado en el ambiente [3].

Para el cálculo de esta entalpía sería pues necesario conocer el número de moles intercambiados en el transcurso de la reacción. Este dependerá asimismo de la intensidad que

sea requerida por el circuito, o el flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre el interior de la batería.

$$I = \frac{q}{t} \quad (2.10)$$

$q = I.t$ en Culombios; y como 1C corresponde a $6,241\,509 \times 10^{18}$ electrones; obtenemos el número de electrones intercambiados como

$$n = 6,241509 \times 10^{18} . q$$

De forma práctica, se determinará el calor generado durante la reacción a través de la resistencia interna de la batería y aplicando la ley de Joule.

2.2. Baterías LiFePO4.

2.2.1. Funcionamiento.

Las baterías de tracción instaladas en el todoterreno son baterías de litio-fosfato de hierro 4 (LiFePO4). Estas baterías poseen ciertas características que las hacen muy útiles para su utilización en este tipo de aplicaciones, donde se necesita una gran densidad de energía y capacidad de descarga, ya que pueden sufrir grandes descargas en un corto plazo de tiempo y en condiciones extremas de temperatura.

Las baterías LiFePO4 ("LFP" en su forma abreviada) están formadas por un cátodo compuesto por una matriz de fosfato de hierro 4, en la que se encuentran intercalados cierto número de átomos de Litio. Por su parte, el ánodo se compone de grafito de Litio, y está separado del cátodo por un electrolito en forma de gel, formado por una solución ácida de agua destilada y ácido sulfúrico ,como se puede ver en la Figura 2.2. [4].

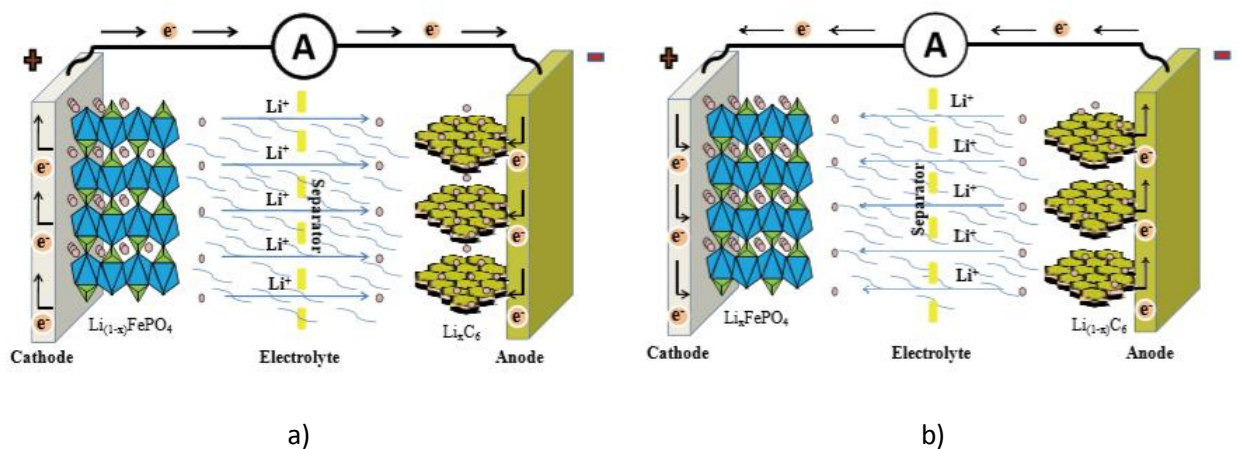
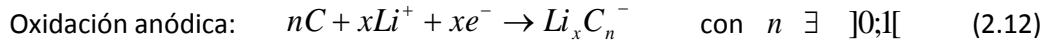
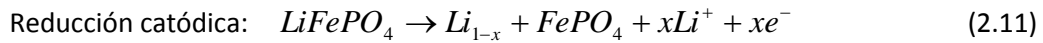


Figura 2.2: Reacciones en una célula LFP. a)Carga. b)Descarga

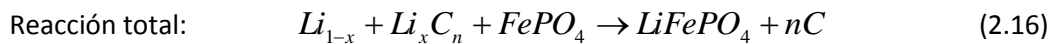
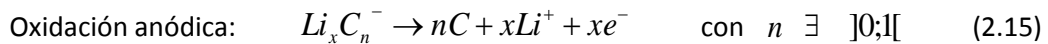
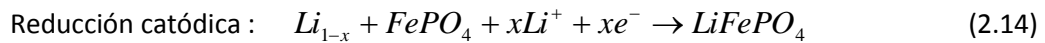
Las reacciones que se producen en una batería de LFP se explican a continuación:

a) Reacciones químicas para la carga



En la carga se produce la destrucción del LiFePO₄ en el cátodo mientras que el grafito de litio se forma en el ánodo. El proceso de intercalación de los elementos litio, tanto iónico como atómico, se hace de forma opuesta a la descarga. Para los números de oxidación, el litio es reducido al ánodo pasando de +1 a 0, mientras que es oxidado al cátodo pasando de 0 a +1. Así que la migración de x iones de litio genera la transferencia de x electrones del cátodo hacia el ánodo [4].

b) Reacciones químicas para la descarga:



La descarga produce la formación de LiFePO₄ en el cátodo mientras el grafito de litio se separa en carbono y en catión Li^+ en el ánodo. Para los números de oxidación, el litio es reducido al cátodo pasando de +1 a 0, mientras que es oxidado al ánodo pasando de 0 a +1. Así que la migración de x cationes litio genera la transferencia de x electrones del ánodo hacia el cátodo [4].

2.2.2. Características

La batería LiFePO₄ usa una química obtenida de derivados de ión de litio y comparte muchas ventajas y desventajas con otras químicas de batería de ión de litio. Sin embargo, hay diferencias significativas. La química de LFP ofrece un ciclo de vida más largo que otros elementos de ión de litio. Como las baterías recargables a base de níquel (y a diferencia de otras pilas de litio), las de LiFePO₄ tienen un voltaje de descarga muy constante (el voltaje permanece cerca de 3.2 V durante la descarga hasta que la batería se agota). Esto permite a la batería entregar plena potencia hasta que sea descargada. La densidad de energía de una nueva batería LFP es aproximadamente un 14 % más baja que la de una típica batería de litio (LiCoO₂), pero ofrece una vida más larga, una mejor densidad de potencias (la cantidad de energía que se puede extraer de ellas) y es más segura. Además, las células de litio fosfato de hierro experimentan un ratio de pérdida de capacidad más lento que químicas de batería de ion

de litio como el cobalto LiCoO_2 o el manganeso LiMn_2O_4 , pilas de polímero de ión de litio o pilas de ión de litio.

Una ventaja importante sobre otras químicas de ion de litio es la estabilidad termal y química, que mejora la seguridad de la batería. El LiFePO_4 es un material de cátodo más seguro que el LiCoO_2 y el manganeso. El enlace de Fe-P-O es más fuerte que el enlace Co-O, de modo que cuando se sobrepasan las especificaciones, (cortocircuito, recalentado, etc.) los átomos de oxígeno son mucho más difíciles de quitar. Esta estabilización de las energías de redox también ayuda a la rápida migración de iones. Los estados de total exceso o completa falta de litio de LiFePO_4 son estructuralmente similares, lo que quiere decir que estas células son estructuralmente más estables que las de LiCoO_2 . Ningún rastro de litio permanece en el cátodo de una célula totalmente cargada (en una célula LiCoO_2 , aproximadamente el 50 % permanece en el cátodo). El ferrofosfato de litio es sumamente resistente durante la pérdida de oxígeno, que típicamente causa una reacción exotérmica en otras células de litio. Por consiguiente, las células LFP son mucho menos susceptibles a la inflamación en caso de una mala manipulación (sobre todo durante la carga) aunque cualquier batería completamente cargada sólo pueda disipar la energía de sobrecarga en forma de calor. Por lo tanto, el fallo de la batería por el mal uso es todavía posible. Comúnmente es aceptado que la batería LiFePO_4 no se descompone a altas temperaturas [5].

En la siguientes tablas se puede observar una comparativa entre distintos tipos de baterías y entre las baterías LFP y el resto de baterías de litio utilizadas comúnmente :

Tabla 2.1: Características de las diferentes químicas de baterías utilizadas.

	Nickel-cadmium	Nickel-metal-hydride	Lead-acid sealed	Lithium-ion cobalt	Lithium-ion manganese	Lithium-ion phosphate
Gravimetric Energy Density (Wh/kg)	45-80	60-120	30-50	150 - 190	100 - 135	90 - 120
Internal Resistance in mΩ	100 to 200 ¹ 6V pack	200 to 300 ¹ 6V pack	<100 ¹ 12V pack	150 - 300 ¹ pack 100 -130 per cell	25 - 75 ² per cell	25 - 50 ² per cell
Cycle Life (to 80% of initial capacity)	1500 ²	300 to 500 ^{3,4}	200 to 300 ³	300 - 500 ³	Better than 300 - 500 ⁴	>1000 lab conditions
Fast Charge Time	1h typical	2 to 4h	8 to 16h	1.5 - 3h	1h or less	1h or less
Overcharge Tolerance	moderate	low	high	Low. Cannot tolerate trickle charge.		
Self-discharge / Month (room temperature)	20% ⁵	30% ⁵	5%	<10% ⁵		
Cell Voltage Nominal Average	1.25V ⁷	1.25V ⁷	2V	3.6V 3.7V ⁸	Nominal 3.6V Average 3.8V ⁸	3.3V
Load Current peak best result	20C 1C	5C 0.5C or lower	5C ⁹ 0.2C	<3C 1C or lower	>30C 10C or lower	>30C 10C or lower
Operating Temperature ¹⁰ (discharge only)	-40 to 60°C	-20 to 60°C	-20 to 60°C	-20 to 60°C		
Maintenance Requirement	30 to 60 days	60 to 90 days	3 to 6 months ¹¹	not required		
Safety	Thermally stable, fuse recommended	Thermally stable, fuse recommended	Thermally stable	Protection circuit mandatory; stable to 150°C	Protection circuit recommended; stable to 250°C	Protection circuit recommended; stable to 250°C
Commercial use since	1950	1990	1970	1991	1996	2006
Toxicity	Highly toxic, harmful to environment	Relatively low toxicity, should be recycled	Toxic lead and acids, harmful to environment	Low toxicity, can be disposed in small quantities		

Tabla 2.2: Características de las diferentes químicas de células de litio.

Bateria	LiFePO4	LiCoO2	LiMn2O4	Li(NiCo)O2
Seguridad	Segura	Inestable	Aceptable	Inestable
Contaminacion medioambiental	La mas ecologica	Muy contaminante		Muy contaminante
Durabilidad	Excelente	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Relacion fuerza/peso/capacidad	Aceptable	Buena	Aceptable	La mejor
Costo a largo plazo	Excelente	Alto	Aceptable	Alto
Temperatura de trabajo	Excelente (-20C to 70C)	Decae mas alla de (-20C to 55C)	Decae rapidamente a mas de 50 C	-20C to 55C

En el presente proyecto se han utilizada las baterías SE180AHA del fabricante Sky Energy, cuya hoja de características se muestra en el anexo A2.

2.3. Efectos de la temperatura:

El tema más importante que trata este proyecto, y en el cual se basa, es el efecto que pueden tener las excesivas temperaturas producidas por el uso de las baterías de tracción del vehículo eléctrico. La generación de calor de las baterías, que depende directamente de la intensidad requerida por el motor, en función del régimen de funcionamiento, y del tiempo se traduce en una determinada distribución de temperaturas que puede afectar tanto a los ocupantes del vehículo, como al propio funcionamiento de las baterías.

En este apartado se estudiará en qué medida influye esta generación de calor en cada uno de los elementos afectados.

2.3.1. Efectos sobre el habitáculo:

Los efectos de un excesivo calentamiento del sistema de baterías de tracción sobre los ocupantes del vehículo puede ser bastante importante en el caso de que se alcancen temperaturas muy elevadas. En el habitáculo de un vehículo deben darse las condiciones de confort para los ocupantes indicadas

2.3.2. Efectos sobre las baterías:

Los efectos de la temperatura sobre las baterías se centran en su funcionamiento debido al hecho de que el propio aumento de la temperatura es una consecuencia directa de la utilización de las mismas. Esto quiere decir que, al producir una cierta cantidad de calor en función del régimen de funcionamiento, el propio calor generado afectará a su vez a este régimen, provocando cambios en el funcionamiento de los elementos que suministran la electricidad. Así pues, se estudiará el efecto de dicha temperatura con el fin de asegurar un buen funcionamiento de las baterías así como para asegurar que las mismas se comporten de la forma esperada y poder tener una mayor certeza sobre el funcionamiento de cada una de ellas en cada momento. El calor es el principal enemigo de las celdas electroquímicas, ya sea por exceso o por defecto, y las células de litio necesitan el control cuidadoso de temperaturas.

2.3.2.a. Capacidad de carga y descarga.

El funcionamiento de las células puede deducirse fácilmente a través de la ecuación de Arrhenius, que muestra la dependencia de la constante de velocidad k de reacciones químicas con la temperatura T y la energía de activación (E_a), de acuerdo con la expresión:

$$k(T) = A.e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.17)$$

donde

$k(T)$: constante cinética

A : factor pre exponencial o factor de frecuencia. Indica la frecuencia de las colisiones.

E_a :energía de activación, expresada en J/mol.

R : constante universal de los gases.

T : temperatura absoluta

- Operación a bajas temperaturas:

El efecto de reducir la temperatura de funcionamiento se traduce en la reducción de la tasa en la cual los productos químicos activos en la célula son transformados. Esto se traduce en una reducción de la corriente que es capaz de circular por la célula tanto en la carga como en la descarga. En otras palabras, reducen su capacidad. A temperaturas bajas, la reducción de la tasa de reacción (y quizás la contracción de los materiales del electrodo) reduce la velocidad, y hace más difícil, la inserción de los iones De litio en los espacios de intercalación.

- Operación a altas temperaturas.

Una célula que funciona a altas temperaturas desemboca en problemas que pueden causar la destrucción de la célula. En este caso, el efecto de Arrhenius ayuda a conseguir una mayor potencia de la célula aumentando la tasa de reacción, pero las corrientes más altas dan lugar a una mayor disipación del calor y así aún temperaturas más altas.

El efecto de la temperatura sobre su capacidad de carga o descarga puede observarse en la siguiente figura [3]:

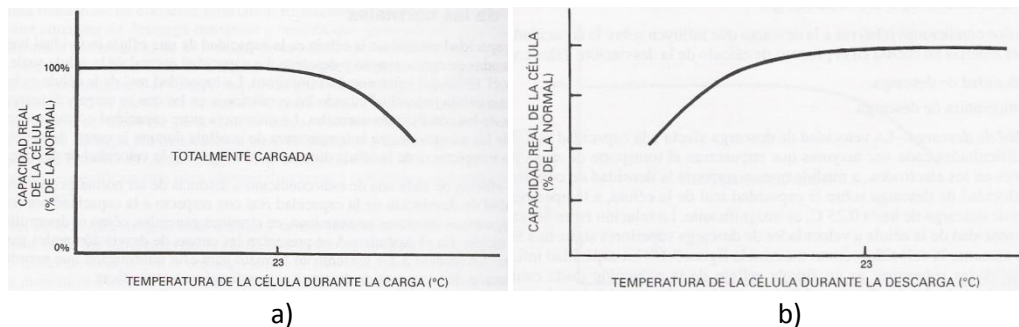


Figura 2.3: Efecto de la temperatura de la célula sobre la capacidad. a) En carga. b) En descarga.

2.3.2.b. Vida útil.

Las temperaturas elevadas dan lugar a que se degraden los materiales que constituyen el separador y los sellos. Dado que la rapidez de esta degradación es una función directa de la temperatura de la célula, las aplicaciones que exponen las baterías a temperaturas ambiente elevadas o de sobrecarga verán reducida la vida útil de sus baterías a la mitad por cada aumento de 10°C en la Temperatura. En el siguiente gráfico se puede observar la variación en la vida útil de una batería en función de su temperatura de operación [5].

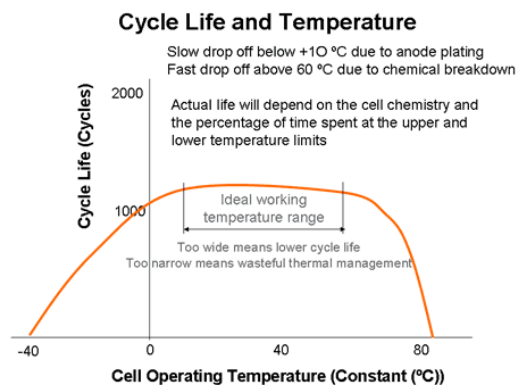


Figura 2.4: Vida útil de una batería de litio en función de la temperatura de operación.

2.4. Disposición de las baterías en el vehículo:

El vehículo dispone de 107 baterías de Litio-fosfato de hierro que estarán distribuidas en la carrocería por grupos en diferentes posiciones del vehículo. La característica principal que afecta a la disposición de las baterías es el equilibrado del vehículo, donde se ha de considerar la distribución de peso en mismo de una forma coherente. El estudio de el posicionamiento de los cajones donde se sitúan las baterías fue ya realizado en proyectos anteriores, con lo que se obviará su estudio y se indicarán directamente los resultados obtenidos . Estos cajones están realizados en acero inoxidable y aislados mediante goma ($\lambda=0,163 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) para evitar cortocircuitos. De esta manera la carrocería está preparada para el montaje de la cadena de tracción y el sistema eléctrico de potencia. Tres de estos cajones están alojados en la carrocería (uno en el interior y dos en los laterales) y un cuarto cajón atornillado al bastidor [7].



a)



b)



c)

Figura 2.5: Cofres de baterías instalados en el vehículo. a)Cofre grupo 3; b)Cofre grupo1; c)Cofre grupo2.

2.4.1. Grupos

Se han dispuesto las baterías en 3 grupos diferentes situados en diferentes lugares del vehículo, como se puede ver en [la figura 2.6](#).

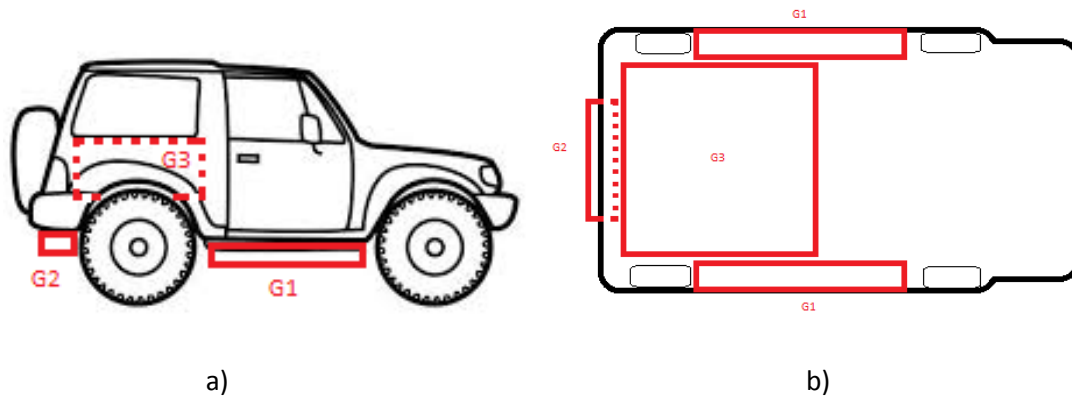


Figura 2.6: Situación de los grupos de baterías en el vehículo a)Vista de perfil; b)Vista en planta

Tabla 2.3: Características de los cofres que contienen los grupos de baterías.

	Cofre 1 (G1)	Cofre 2 (G2)	Cofre 3 (G3)
Número de cofres	2	1	1
Número de celdas	17	9	64
Voltaje (VDC)	54,4	28,8	204,8
Resistencia interna (mΩ)	51,43	27,18	193,28
Peso (kg)	92,5	50,4	358,4
Dimensiones [Lxlxh] (mm)	1355x300x213	804x320x206	1205x750x435

Los planos de los cofres que contienen las baterías pueden consultarse en el [Anexo 1](#).

2.4.2. Conexión.

La conexión de las baterías es uno de los elementos más importantes de todo el sistema de electrificación del vehículo y de la energía aportada al motor. El sistema de conexión debe ser capaz de suministrar los diferentes requerimientos de tensión e intensidad que necesita el motor. Los requisitos que deben cumplir las conexiones de los grupos de baterías se han señalado en apartados anteriores y son las siguientes [7]:

Voltaje: 240-400 V DC

Intensidad: picos de hasta 500A

Resistencia Interna: 360 mΩ

Energía: 70 kWh

Peso: 700 Kg max

Así, se ha propuesto en proyectos anteriores la conexión en serie de las baterías, diferenciando varios grupos, conectados entre sí también en serie, con las siguientes características:

Voltaje: 342 V DC

Intensidad: picos de hasta 500A

Resistencia Interna: 302,14 mΩ

Energía: 71.280 Wh

Peso: 599,2 Kg max

BMS

Definido el conjunto de baterías que conectadas en serie forma la batería de tracción, es necesario introducir un sistema para visualizar y controlar el estado de cada batería, denominado BMS (Battery Management System).

3. Análisis del calor generado y de la temperatura alcanzada.

Siendo el objetivo del proyecto, la determinación de la temperatura máxima alcanzable por las baterías del vehículo con el fin de asegurar la seguridad tanto de los ocupantes como del sistema de baterías, diseñando, en su caso, el sistema de refrigeración requerido, se hace imprescindible el desarrollo de un modelo teórico del cual podamos obtener dicha distribución de temperaturas. En esta apartado se desarrollarán los cálculos necesarios para ello realizando una serie de hipótesis sobre el sistema a estudiar centrándonos en la generación de calor en el interior de las baterías y su interacción con los elementos circundantes en lo que se refiere a la transferencia de calor por conducción y convección.

El modelo matemático que simule el comportamiento del calentamiento de las baterías se ajustará a partir de los experimentos de carga y descarga realizados para obtener así una solución lo más aproximada posible a la realidad.

3.1. Hipótesis de cálculo

3.1.1. Condiciones de uso.

El cálculo del calor generado por las baterías se deduce directamente a través de las condiciones de funcionamiento a las que se verá sometido el sistema. En este apartado se muestran en detalle dichas condiciones de funcionamiento requeridas por el propio motor así como los mayores requerimientos a los que pueden verse sometidos según el fabricante [6].

Tabla 3.1: Requerimientos fabricante.

	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Tiempo (s)
Capacidad nominal	180	3,2	3600
Carga recomendada	54	3,6	14400
Descarga recomendada	54	2,5	14400
Carga Máxima	540	3,6	20
Descarga Máxima	1000	2,5	10

Tabla 3.2: Máximos requerimientos del motor (referidas a una batería).

	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Tiempo (s)
inversor motor (descarga)	500	2,5	20

Tabla 3.3: Requerimientos Normativa de Competición (referidas al conjunto de baterías)

	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Tiempo (s)
etapa (descarga 80 km/h ; 225 km)	51,54	267,5	10125
carga	16	220	14400

Tabla 3.4: Requerimientos ciclos estándar de conducción (referidas al conjunto de baterías):

	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Tiempo (s)
ECE-15 (descarga 18,77 km/h ; 1,017 km)	0,273	267,5	195
NEDC (descarga 33,6 km/h ; 11,022 km)	5,682	267,5	1200

3.1.2. Constantes, características y modelo teórico del sistema.

Para realizar los cálculos teóricos será necesario conocer, o en su caso determinar, las características intrínsecas del sistema considerado, tanto físicas como térmicas. Las características geométricas ya se indicaron en apartados anteriores. Por otro lado, las características térmicas son de especial importancia para el correcto modelado del sistema.

- Características térmicas:

Las más importantes son la capacidad calorífica (C_p) y la conductividad térmica (λ). La capacidad calorífica se puede calcular midiendo el tiempo que tarda una batería en alcanzar la estabilidad térmica cuando se cambia de un ambiente a una temperatura dada a otro a una temperatura diferente. Se ha determinado de forma empírica y el procedimiento experimental así como los cálculos necesarios se pueden consultar en el Anexo 3. Se ha medido la diferencia de cambio de temperatura entre varios puntos de la batería, deduciéndose que C_p se mantiene constante en toda la célula.

Por otro lado, debido a la mayor dificultad de cálculo y a la no disponibilidad de equipos para el experimento, para la conductividad térmica de la célula se ha utilizado la del material que compone su carcasa (plástico, con una conductividad térmica media de $0,25 \frac{W}{m.K}$ aproximadamente [8]), resultando, como se verá más adelante un modelo bastante aproximado.

Así pues, los valores obtenidos son finalmente:

$$C_p = 2006,34 \frac{J}{Kg.K}$$

$$\lambda = 0,25 \frac{W}{m.K}$$

- Resistencia interna:

La cantidad de calor generado se determinaría a partir del número de moles intercambiados de los compuestos que componen la celda electroquímica al producirse la reacción y el cambio en sus entropías. El resultado es que resulta casi imposible determinar dichas magnitudes debido tanto al desconocimiento de sus valores iniciales como a la dificultad que presentan las variaciones constantes de las intensidades suministradas o absorbidas a lo largo del tiempo.

La otra forma, que ha sido la elegida, para determinar esta generación ha sido a través del cálculo de las pérdidas de intensidad y con las discrepancias entre los valores teóricos y experimentales al aplicarles a las baterías una intensidad y un voltaje correspondientes a los nominales, esto es, a partir de la resistencia interna. La resistencia interna es un concepto que ayuda a modelar las consecuencias eléctricas de las complejas reacciones químicas que se producen dentro de una batería. Es imposible medir directamente la resistencia interna de una batería, pero ésta puede ser calculada mediante los datos de corriente y voltaje medidos sobre ella. En un primer momento, se modeló el sistema como un sólido uniforme con ciertas características térmicas y una generación de calor interna dada por una resistencia constante a lo largo del sólido. El cálculo de dicha resistencia se puede ver en el Anexo 4. En un principio, este modelo correspondía al comportamiento térmico de las baterías, sin embargo, tras realizarse las últimas mediciones con una cámara termográfica (FLUKE Ti400), se pudo observar que la temperatura no era uniforme en toda la célula, y siendo C_p constante, tal y como se explica en el apartado anterior, se concluyó que la resistencia interna de las baterías variaba entre la superficie inferior y la superior, donde se encuentran los bornes, calculando pues dicha variación en la resistencia a través de los experimentos.

Los cálculos se han realizado en diversos experimentos, descritos en el Anexo 3, deduciéndose de ellos un modelo teórico del comportamiento de las baterías en el que la resistencia interna varía de un valor mínimo en la zona más alejada de los bornes, a un valor máximo en la zona de los mismos. Esto se puede explicar debido a la disposición constructiva de la batería, en la que se pueden distinguir tres zonas específicas. La primera, que corresponde a la parte inferior de la batería, donde no llegan los electrodos (mayor fuente de calentamiento) y se compone esencialmente de una pared de plástico y una zona con electrolito gel y así pues con una baja resistencia interna. La segunda, la parte intermedia, está compuesta por la mayor parte del electrolito gel y los electrodos positivo y negativo, donde se producirán la mayor parte de las reacciones de intercambio de cargas eléctricas y por lo tanto una mayor resistencia interna. Por último la zona superior, donde nos encontramos además de con el electrolito y los electrodos, con una mayor cantidad de contactos eléctricos, sobre todo entre los bornes de la batería y los cables de conexión, que al generar mayor número de contactos entre partes conductoras, se puede considerar que posee la mayor resistencia interna de la célula [2]. La deducción del modelo teórico que representa la batería se puede consultar en el Anexo 5.

Finalmente, el modelo del que se ha dispuesto para el cálculo del calentamiento de las baterías se presenta a continuación:

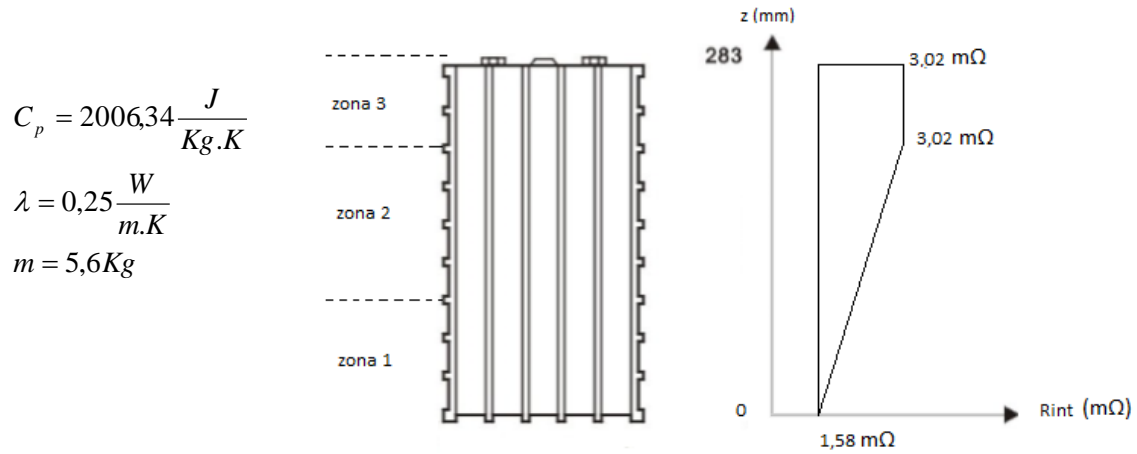


Figura 3.1: Modelo teórico de una célula electroquímica LFP

3.2. Procedimiento de cálculo

Este apartado constituye uno de los puntos más críticos de todo el proyecto. La determinación teórica de la generación de calor en la batería, así como de los mecanismos de transferencia de calor con el exterior requiere de un modelo que, a pesar de las aproximaciones teóricas que puedan realizarse, describa con suficiente precisión el comportamiento del sistema.

Ya se ha estudiado en apartados anteriores el principio por el que se genera calor en una batería (y especialmente en una de litio-ferrofosfato). Sin embargo deben enfrentarse dos problemas fundamentales:

- Cantidad de calor generado:

La resistencia interna contabiliza las pérdidas que se producen en la celda cuando una corriente (sea de carga o de descarga) la atraviesa. Las pérdidas se pueden calcular así a través de $R_{interna}$, aplicando la ley de Joule, la cual indica que las pérdidas en la resistencia se producen en forma de calor. Aplicando esta ley para los distintos casos mencionados en el apartado 3.1.1. obtenemos la energía calorífica perdida por las baterías en cada uno los grupos instalados en el vehículo (ver cálculos Anexo 6).

$$W(J) = mC_p \partial T = R.I^2.t \quad (3.1)$$

- Temperatura alcanzada en el sistema con una cantidad de calor dada:

El siguiente punto fundamental a tratar es el de la temperatura que alcanza el propio sistema de baterías. Al abordar este problema nos encontramos con la compleja estructura interna de la batería, de la cual además, no se disponen planos constructivos ni de las características de los materiales que la componen.

Debido a todo ello, y dado que se ha considerado que las pérdidas en forma de calor se producen a través de la resistencia interna, el problema se ha modelado como un sólido con una generación de calor uniforme en su interior. Así, para el caso de una batería se han medido las propiedades térmicas de la misma a través de una serie de experimentos (Anexo 3) para deducirse las características de estas en términos de un sólido compacto con unas propiedades dadas. Una vez calculadas estas propiedades se ha considerado la energía perdida a través de la resistencia interna como una generación de calor en el interior del sólido. Esto nos da una aproximación teórica del calentamiento de la célula.

$$T_1(t) = \frac{W}{mC_p} + T_i = \frac{RI^2t}{mC_p} + T_i \quad (3.2)$$

$$T(t) = T_{amb} + (T_1(t) - T_{amb})e^{-\frac{hA_p}{\rho VC_p}t} \quad (3.3)$$

$T(t)$ nos da la temperatura a la que se encuentra el sólido de volumen $V(m^3)$ y densidad $\rho(kg/m^3)$, al verse refrigerado en su superficie $A_p(m^2)$ por un fluido exterior a $T = T_{amb} = 45^\circ C$ [11], con un coeficiente de convección determinado, $h(W/m^2K)$, que se tomará como un coeficiente de convección natural, $h = 8W/m^2K$, tomado de la bibliografía consultada [7],[12].

En el caso de los grupos de baterías, el sólido a considerar tiene tanta más magnitud cómo número de celdas haya en dicho grupo. La cantidad de calor generado viene dado por una resistencia interna que también es superior en función del número de celdas. Estos cálculos también pueden consultarse en el Anexo 6.

Se ha calculado el calentamiento del aire dentro de los cofres a partir del método de diferencias finitas, como se explica en el Anexo 6, el cual genera convección natural con el paquete de baterías, y se ha calculado su influencia, considerándola despreciable, por lo que la temperatura alcanzada por cada grupo de baterías podrá calcularse directamente con la ecuación 3.2. Sin embargo, utilizaremos la ecuación 3.3 para estimar el coeficiente de convección teórico que debe aplicarse a cada grupo de baterías para su refrigeración, como se verá en el capítulo 4.

En el siguiente apartado se expondrán los resultados finales.

3.3. Resultados

Los cálculos se han realizado para las situaciones planteadas en la tabla 3.1. ya que por un lado corresponden a las situaciones más desfavorables, y por otro a los requerimientos que debe poder aguantar cada célula según el fabricante. Se muestran en la Tabla 3.5 los resultados obtenidos, con las temperaturas máximas alcanzadas en cada uno de los casos y para cada uno de los grupos células electroquímicas del vehículo.

Tabla 3.5: Temperaturas máximas alcanzadas por cada grupo de baterías en cada uno de los casos planteados.

Tª máxima	Caso 1 (16A)	caso 2 (54 A)	caso 3 (100A)	caso 4 (180A)	caso 5 (180+500A)
Grupo 1	47,751	53,468	62,281	76,338	76,948
Grupo 2	47,751	53,464	62,409	76,352	76,932
Grupo 3	47,777	55,860	62,327	76,363	77,460

Se muestran las gráficas de evolución de la temperatura para las baterías del cofre nº 3, que será en el único en el que se instalará, en caso de ser necesario (lo cual se estudiará en el siguiente capítulo), un sistema para evacuar el exceso de calor generado. Se representan únicamente las gráficas para la capacidad nominal de la batería (180Ah) y para la descarga recomendada (0,3CA).

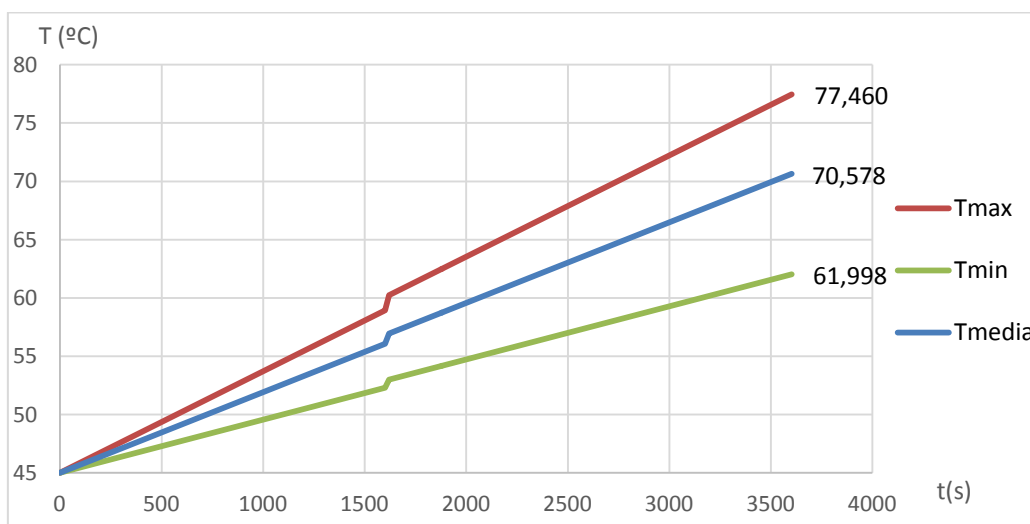


Figura 3.2: Temperaturas alcanzadas por el Grupo 3 tras la descarga a capacidad nominal.

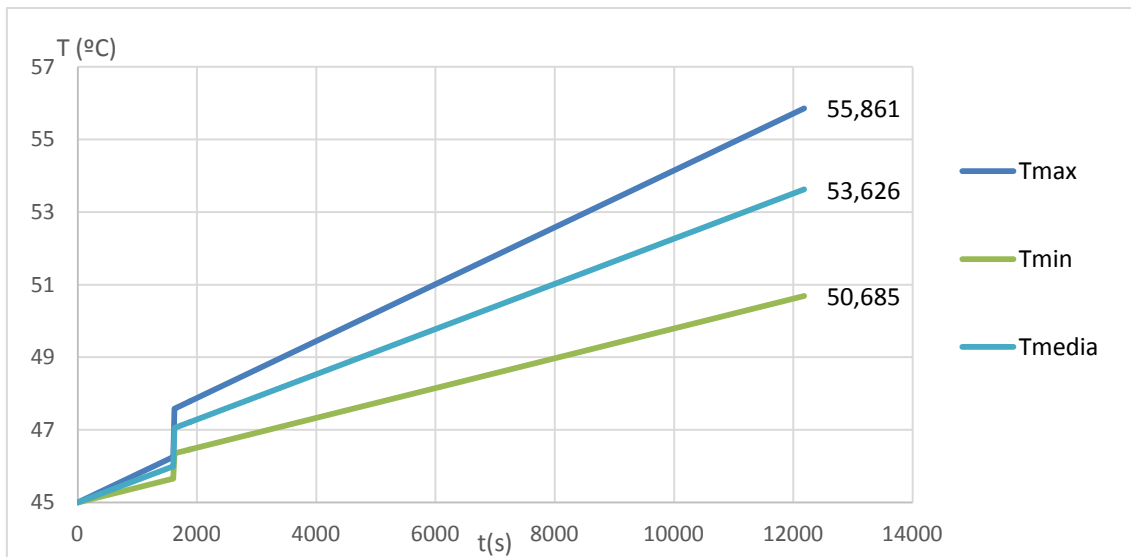


Figura 3.3: Temperaturas alcanzadas por el Grupo 3 tras la descarga recomendada.

3.4. Comparación con los resultados experimentales.

La validación del modelo teórico propuesto para el cálculo de la temperatura alcanzada por las baterías se ha realizado a través de un experimento con la cámara termográfica (FLUKE Ti400). En las siguientes figuras se muestra una comparativa entre estos valores experimentales y el modelo desarrollado.

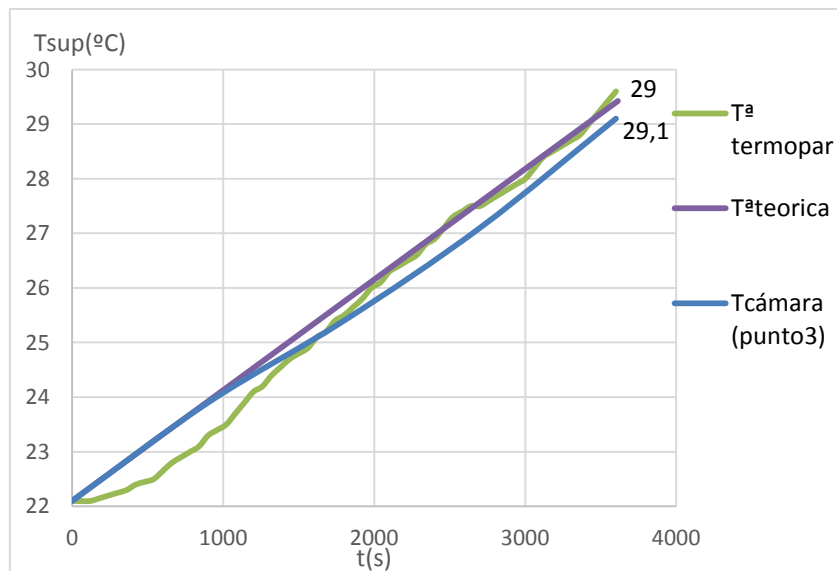


Figura 3.4: Evolución de la temperatura en la zona central de la célula (a capacidad nominal).

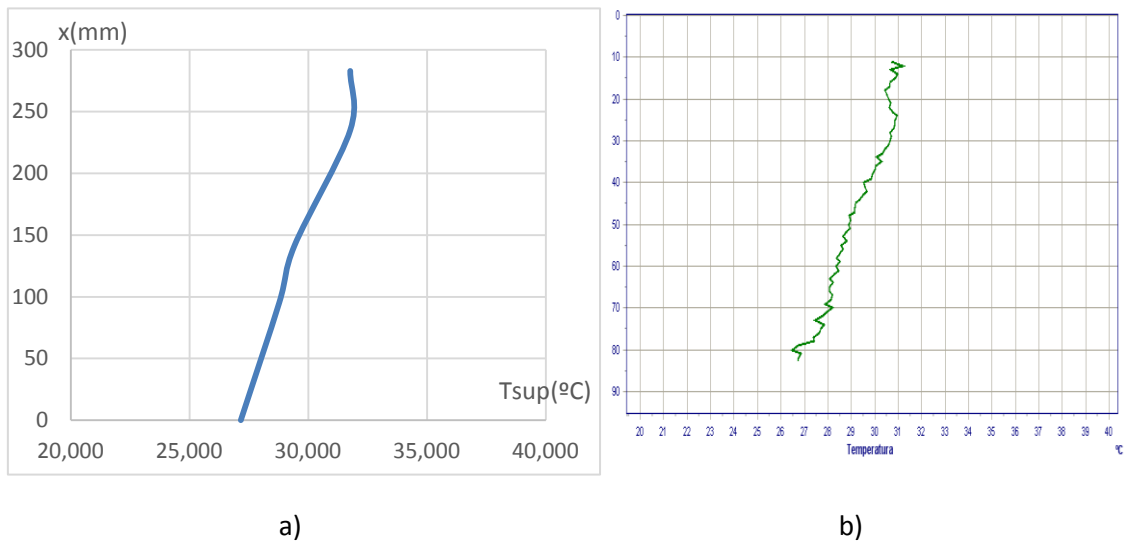


Figura 3.5: Comparación entre la distribución teórica de la temperatura en la célula - a)- y la experimental - b)- tras 3600s a 100A.

Tabla 3.6: Comparación de temperaturas obtenidas por diferentes métodos.

	ΔT (°C)	Tmax (°C)
Cámara	7	29,1
Instrumental (termopar)(x=141,5)	7,50	29,60
Teórico (punto3)	7,32291689	29,4229169

El error con respecto a los resultados experimentales es de aproximadamente un 1%.

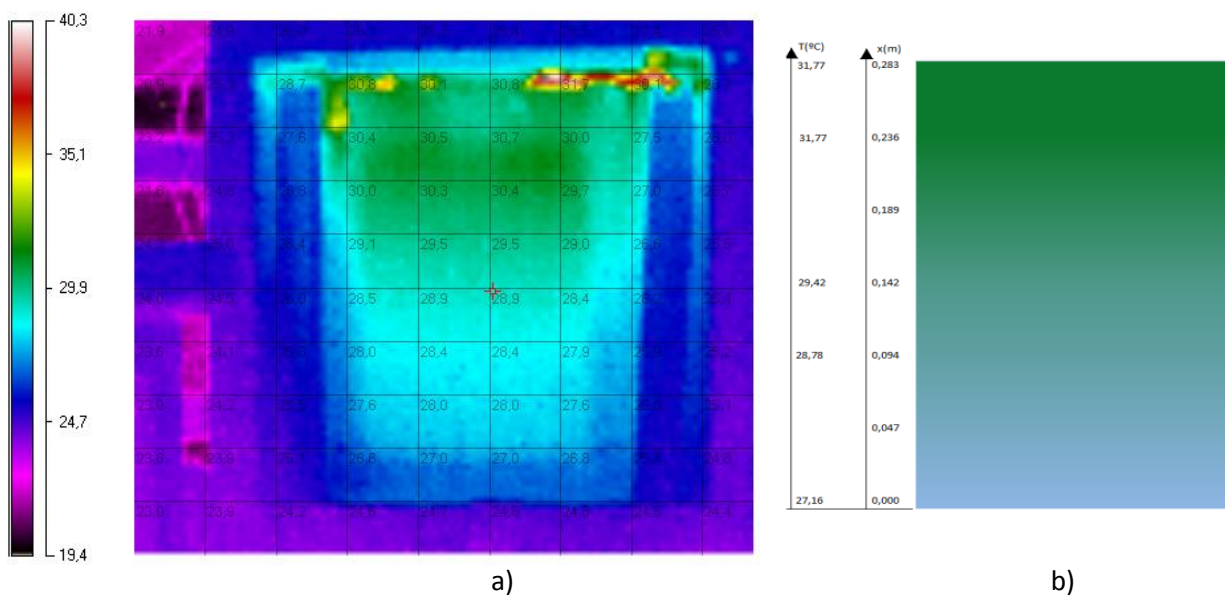


Figura 3.6: representación del gradiente térmico en una célula LFP (t=3600s, I=180A). a) Cámara termográfica. b)Modelo teórico.

4. Cálculo del sistema de refrigeración

4.1. Evaluación necesidad de refrigeración.

A continuación, se evaluará la necesidad que tiene cada grupo de baterías de ser refrigerado, realizando una comparación entre las temperaturas máximas alcanzadas y las temperaturas máximas recomendables.

Esto se puede observar en la tabla-resumen mostrada a continuación.

Tabla 4.1: Evaluación de la refrigeración necesaria en cada grupo de baterías

	Tª Max Recomendada	Tª Max Admisible	caso 4 (180A)	caso 5 (180+500A)	Refrigeración SI/NO	hmax
Grupo 1	55	75	76,3424	76,9328	SI	53,92
Grupo 2	55	75	76,3424	76,9328	SI	51,94
Grupo 3	55	75	76,3638	77,4604	SI	100,64

Hay que prestar especial atención en el significado de estos valores. Estos resultados se refieren a las temperaturas máximas alcanzadas en cada uno de los grupos en la zona de los bornes, y el coeficiente de convección mostrado es el $h_{promedio}$ necesario en el caso de que los diferentes grupos de baterías puedan refrigerarse con aire a una temperatura de 45°C utilizando toda la superficie expuesta al ambiente. De ahí la disparidad entre los valores de h, ya que la relación área/volumen es muy diferente en cada uno de los casos. Los grupos 1 y 2 disponen de una área mucho mayor para su refrigeración en relación a su volumen, con lo que se requiere de un h mucho menor.

En el Anexo 7 se puede ver el cálculo de los coeficientes de convección mostrados en la Tabla 4.1, así como ciertas soluciones aproximadas propuestas para la refrigeración de los grupos 1 y 2.

Sin embargo, como se comentó en apartados anteriores, ni los grupos 1 y 2 serán refrigerados, ni en el Grupo 3 se dispone de toda la superficie para ello, sino únicamente la superficie superior, correspondiente a la zona de los bornes. Así pues, se muestran a continuación los resultados para la refrigeración de la superficie superior del Grupo 3, cuyo cálculo se puede ver con mayor detalle en el Anexo 8.

4.2. Descripción sistema de refrigeración propuesto.

4.2.1. Parámetros generales

La refrigeración de los grupos de baterías se realizará por aire, esto es, por convección forzada a través de una corriente de aire impuesta.

La cantidad de calor evacuado dependerá tanto del tipo de fluido, como de su temperatura. El fluido refrigerante será aire a una temperatura de 45°C (ya que se considera el caso más extremo) y a presión atmosférica. El cálculo de la velocidad del aire de refrigeración necesaria se muestra en el Anexo 9 y dependerá de la cantidad de calor que deba evacuarse (es decir, del número de Nusselt, que vendrá dado por el coeficiente de convección y la geometría del sistema), así como de la disposición geométrica de los ventiladores a instalar. El cálculo del coeficiente de convección se ha realizado imponiendo que la superficie refrigerada no supere la temperatura máxima de operación de las baterías y que la zona más caliente del conjunto no supere la temperatura máxima admisible.

El h que produce la refrigeración se ha calculado de tal manera que una corriente de aire a la temperatura de $T_{\infty} = 45^{\circ}\text{C}$ sea capaz de evacuar el calor generado en el sólido correspondiente a la superficie indicada a refrigerar ($A_{\text{superior}} = 0,827\text{m}^2$), imponiendo que las temperatura superficial no supere los 55°C . Así, la potencia de refrigeración deberá igualar al flujo de calor superficial.

$$Q_{\text{refrig}} = q'' \quad (4.1)$$

$$\text{con } q'' = 712,532108 \text{ W/m}^2$$

Al considerar únicamente la convección, la potencia de refrigeración será:

$$Q_{\text{refrig}} = h * (T_s - T_{\infty}) \quad (4.2)$$

$$\text{con } T_{\infty} = T_{\text{ambiente}} = 45^{\circ}\text{C}$$

$$\text{y } T_s = T_{\text{SupMáxima}} = 55^{\circ}\text{C}$$

Obteniendo el coeficiente h como sigue:

$$h = \frac{q''}{(T_s - T_{\infty})} = 71,2532108 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Y su cálculo se puede consultar con mayor detalle en el Anexo 8

Además, este coeficiente debe ser capaz de mantener la temperatura máxima de cada una de las células por debajo del valor límite (75°C), por lo que se utilizará el método de diferencias finitas en 1D para calcular la temperatura alcanzada por la zona más caliente, comprobando que esta no sobrepasa dicha temperatura (Anexo 8). A continuación se muestran las

condiciones del fluido refrigerante y el coeficiente de convección necesario para que no se superen los valores máximos permitidos:

Tabla 4.2: Propiedades del fluido refrigerante.

Fluido	Aire
Temperatura (°C)	45
$h_{max} \text{ (W/m}^2\text{K)}$	71,253

Con dicho coeficiente de convección se calculan las temperaturas alcanzadas tras el periodo de funcionamiento dado tanto en la superficie como en la zona más caliente, obteniendo un valor de 55°C en la superficie, 74,04°C en la zona de mayor temperatura, que corresponderá a $x=0,235\text{m}$ y una temperatura media de 66,96°C, todas dentro de los rangos comentados anteriormente. Aquí se muestra la evolución de estas temperaturas:

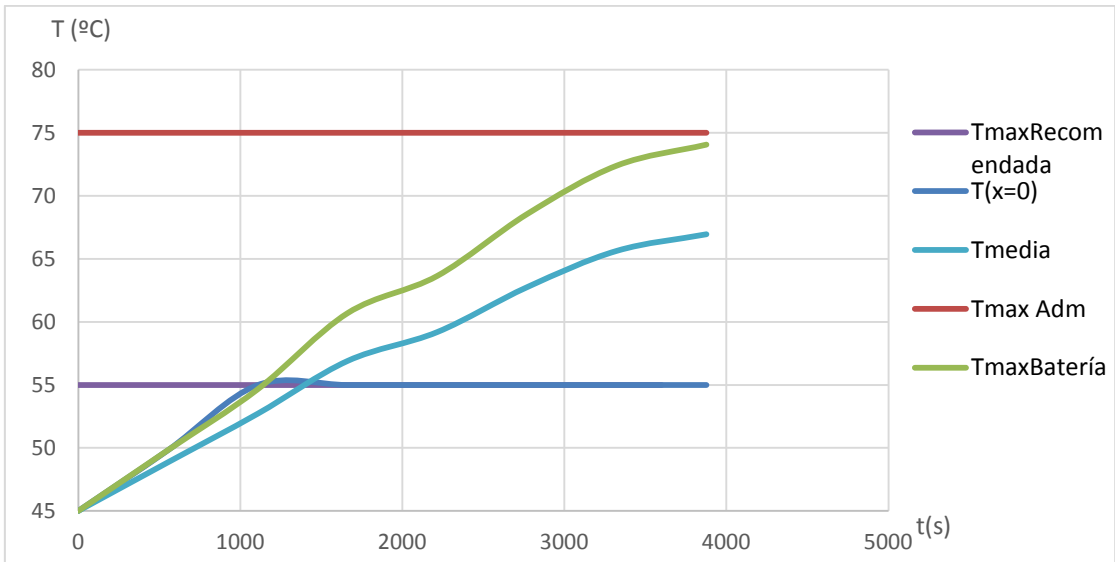


Figura 4.1: Evolución de las temperaturas en las baterías del grupo 3 refrigerado en su superficie.

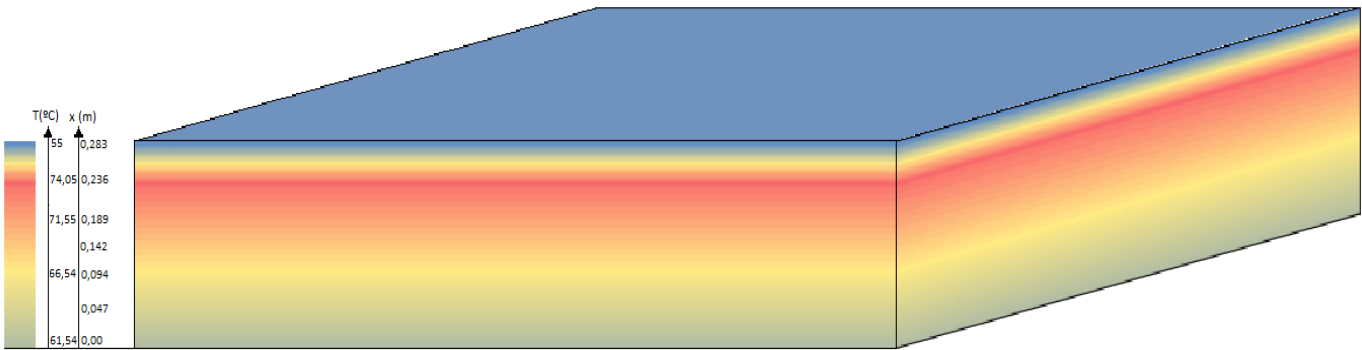


Figura 4.2: Perfil de temperaturas en el grupo 3 de baterías refrigerado tras $t=1\text{h}$.

4.2.1. Geometría del sistema

Con los datos anteriores, se calculará la velocidad y caudal de aire a suministrar para alcanzar dichas temperaturas para diferentes configuraciones del sistema, eligiendo la más óptima en términos de número de ventiladores utilizados y potencia de los mismos. La discusión de los diferentes intercambiadores se puede ver en el Anexo 9. Finalmente, el sistema elegido consiste en un grupo de 11 ventiladores en la parte superior de las baterías, en disposición alternada. Deberá instalarse una tobera a la salida de cada uno de los ventiladores ya que la correlaciones utilizadas fueron calculadas para un flujo de aire proveniente de un grupo de toberas, y además esto reduce en parte la potencia de los ventiladores a instalar [9].

Los ventiladores elegidos son de 92x92x38 mm con un caudal de 146 m³/h y una potencia de 9W a 6800 rpm, pudiendo ser alimentados a 12V.

Se deberán también instalar unas toberas de las siguientes características:

- D= 92mm
- d=55mm
- Ángulo de convergencia $\alpha = 14^\circ$

La justificación de estos valores se discute en el Anexo 9. El caudal del ventilador escogido asegura el flujo correcto para un coeficiente de convección de $71,25 \frac{W}{m^2 K}$ y el ángulo de convergencia de las toberas es tal que puedan despreciarse las pérdidas en el conducto, situándose este en el rango $10^\circ < \alpha < 20^\circ$, propuesto por la bibliografía consultada [15].

Con todo esto, el sistema de ventilación calculado queda de la siguiente manera:

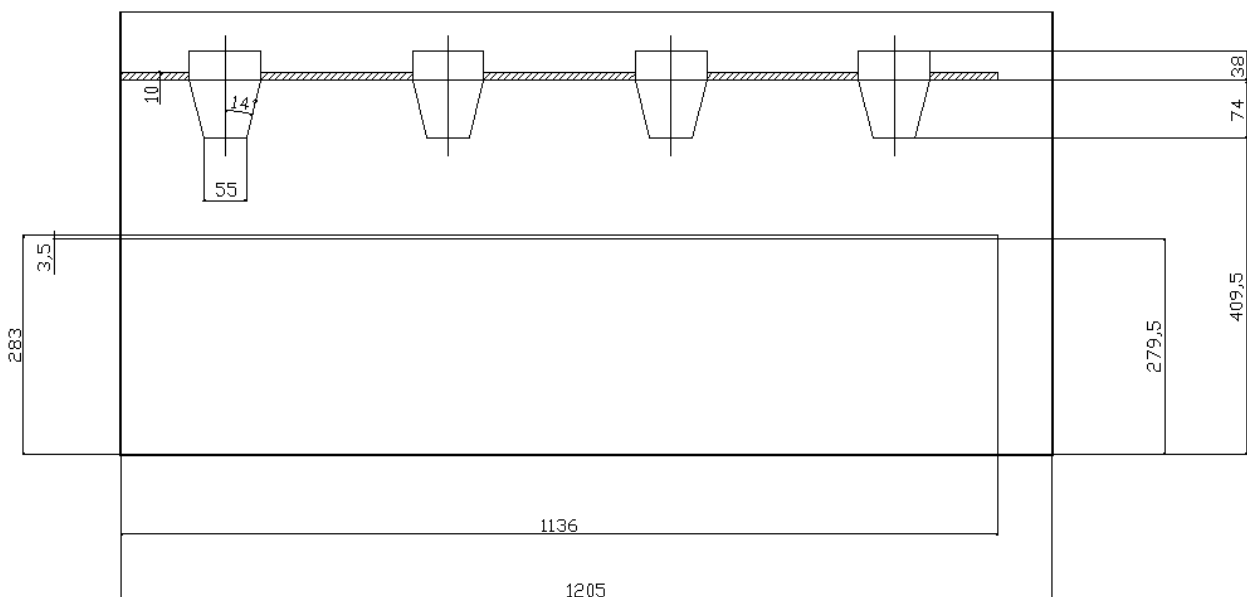


Figura 4.3: Geometría del sistema de refrigeración del grupo 3.

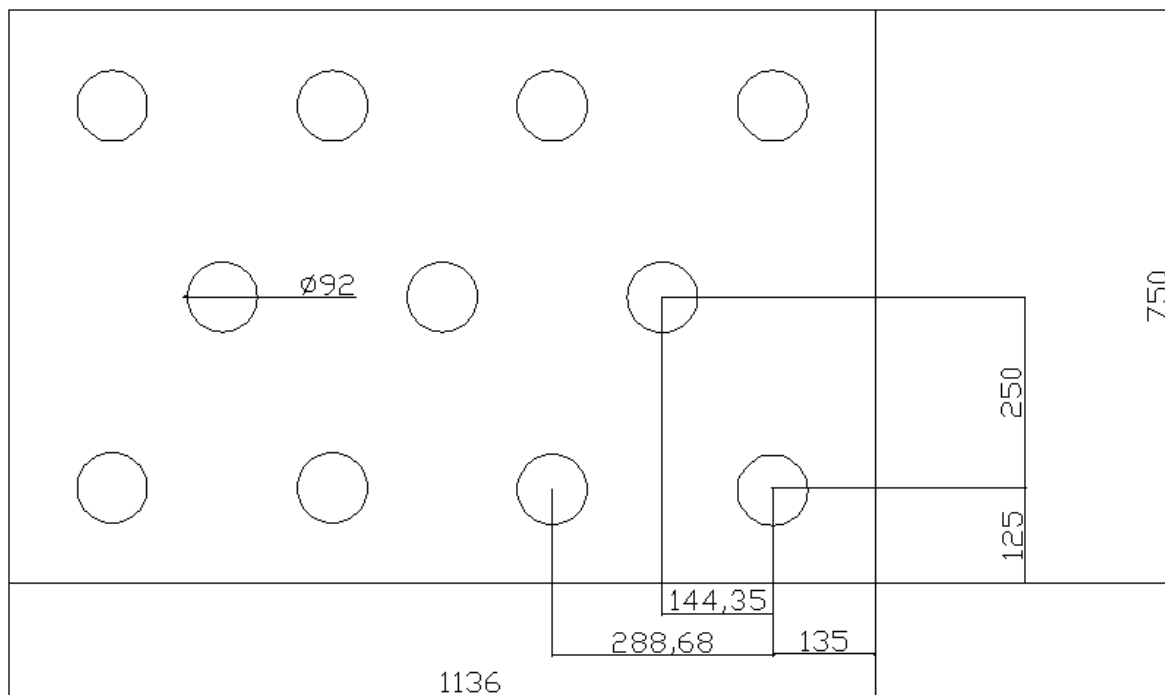


Figura 4.4: Disposición geométrica de los ventiladores sobre el grupo 3 de baterías.

Deberán disponerse unas rejillas en la parte que queda por encima del tablón, para obtener el aire exterior como refrigerante, y en la que queda por debajo del tablón, que constituirá la salida de aire caliente. Deberán situarse además en lados opuestos del cofre para evitar que los flujos de aire se mezclen y el aire de refrigeración entre más caliente de lo que debería.

5. Instalación

En este capítulo se describirá la instalación del sistema de refrigeración, mostrando la configuración final y todos los elementos que han de instalarse para el correcto funcionamiento del mismo.

El problema que se plantea en este apartado es si el sistema de refrigeración calculado puede o no ser implantado en el vehículo, en cuyo caso deberán de realizarse las modificaciones necesarias tanto en el cofre de las baterías como en el propio sistema para la correcta implantación.

5.1. Viabilidad del sistema de refrigeración.

Tal y como se ha calculado, deberán de disponerse 11 ventiladores de la forma indicada en el capítulo anterior para que la temperatura de las baterías no sobrepase los 55°C en la superficie superior, suponiendo el caso más desfavorable de funcionamiento, que corresponderá a la descarga de 180 amperios durante una hora.

La viabilidad de la instalación dependerá básicamente de los elementos instalados que puedan modificarse y los que no, ya que tanto el emplazamiento de las baterías como los elementos que las contienen y los auxiliares necesarios vendrán dados de antemano y habrá que ceñirse a la disposición de los mismos

Las restricciones de espacio en el emplazamiento del grupo 3 de baterías, así como en el tabón que debe contener los elementos a instalar hace imposible la implantación del sistema de refrigeración calculado como se puede ver en la Tabla 5.1 (las cotas necesarias mostradas se obtienen de la Figura 4.3 [Capítulo 4] y las disponibles del Anexo 1) , y atendiendo al régimen de funcionamiento que el vehículo sufrirá, se decidirá que el sistema a instalar se basará en las condiciones de descarga recomendadas por el fabricante de las baterías, que corresponden a una descarga de 54 amperios durante un periodo de aproximadamente 3 horas de funcionamiento, pero, eso sí, a una temperatura ambiente estimada de 45°C para que puedan cubrirse los periodos estacionales más calurosos, y que corresponderán a un funcionamiento del vehículo durante 3 horas a velocidad constante (54Ax107bateríasx3,2V/batería).

Tabla 5.1: Características geométricas del cofre de baterías 3 para la instalación del sistema.

Distancia superficie-ventiladores (mm)	204
Distancia superficie-toberas (mm)	130
Altura ventiladores (mm)	38
Espacio mínimo para extracción (mm)	30
Total (mm)	402
Distancia baterías-tapa disponible (mm)	155<<402

5.2. Sistema definitivo a instalar

5.2.1. Necesidad de refrigeración.

Dado que el modelo del comportamiento térmico de las baterías es perfectamente válido para el caso de funcionamiento nominal, sólo se necesita cambiar los datos de intensidad circulante y de tiempo de funcionamiento para obtener las temperaturas máximas alcanzadas, que se muestran a continuación:

Tabla 5.2: Temperaturas máximas alcanzadas por el grupo 3 en las condiciones de instalación.

I(A)	54
t (s)	12000
Tmax (°C)	56,3
Tsuperficie (°C)	56,3
Tmedia (°C)	53,97

En este caso, ciertas temperaturas siguen superando los 55°C, pero el coeficiente de convección necesario para la refrigeración disminuye considerablemente. Calculando este de la misma manera que para el caso extremo planteado anteriormente, obtenemos

$h \approx 15 \frac{W}{m^2 K}$, consiguiendo disminuir la temperatura máxima en la superficie hasta los 49,28°C y consiguiendo que en la zona de máxima temperatura no se sobrepasen los 54,46°C.

Con dicho coeficiente de convección el conjunto de las baterías no superará en ningún momento los 55°C, cumpliéndose perfectamente todas las restricciones, como se muestra en el siguiente gráfico:

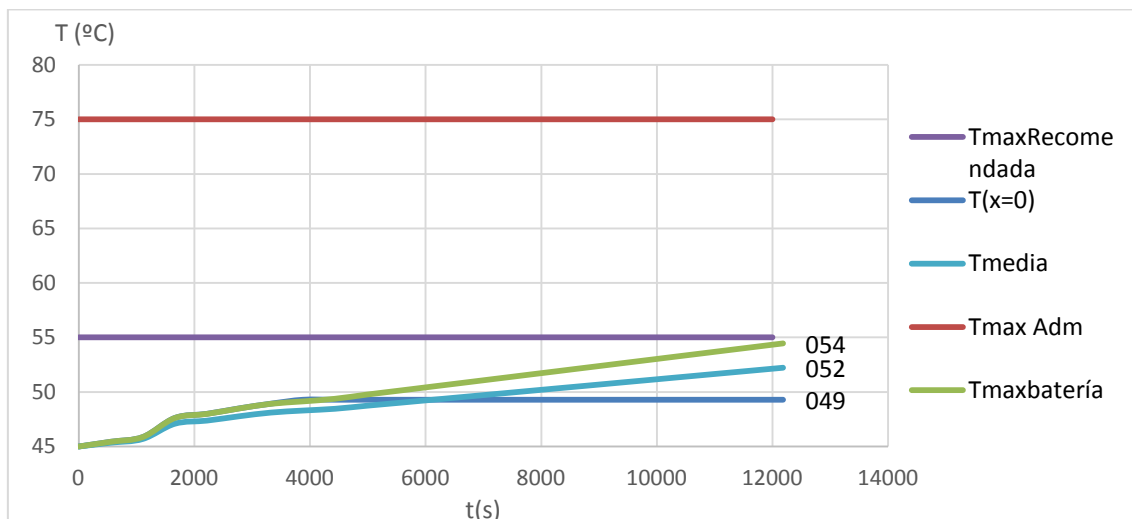


Figura 5.1: Temperaturas alcanzadas por el grupo 3 de baterías con refrigeración.

5.2.2. Geometría del sistema.

A partir de este nuevo coeficiente de convección, se puede diseñar un sistema de ventilación cuya complejidad será inferior a la mostrada anteriormente, disminuyendo tanto el número de ventiladores como su diámetro y disposición.

El problema de la distribución geométrica de los ventiladores calculados para la refrigeración de la superficie superior es complejo y depende de numerosas variables, la mayoría de ellas impuestas por el espacio disponible en el cofre número 3, y se enumeran aquí:

1. El espacio disponible en el cofre para la instalación tanto del sistema de refrigeración como de los elementos auxiliares de las baterías es fijo y de dimensiones 1205x750x155mm.
2. Este espacio deberá alojar tanto el sistema de refrigeración como los 8 módulos del BMS (Battery Management System) para el control de la baterías.
3. En caso de no poder refrigerar la totalidad de la superficie, se intentará que esta sea la máxima.
4. Las salidas y entradas de aire deben realizarse en los laterales del cofre y no en la tapa, con el objetivo de mantener la rigidez de la misma, y en lados opuestos para que los flujos frío y caliente no se mezclen.

Para el cálculo de la distribución de los ventiladores se han utilizado correlaciones para diferentes distribuciones eligiendo la más óptima en cuanto a número de ventiladores, caudal y distribución geométrica obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 5.3., para un grupo de toberas redondas alineadas.

Tabla 5.3: Características geométricas y del flujo de aire para la instalación del sistema de refrigeración calculado.

H (m)	0,08
D (m)	0,05
S (m)	0,30
Ar (m2)	0,00174
Nu	26,76
G	0,08
K	1,00
Re	2,22E+04
u (m/s)	8,13
Q (m3/h)	57,49
Q (cfm)	33,84

Como las correlaciones utilizadas corresponden a grupos de toberas alineadas, es necesario que en la salida de los ventiladores a instalar se dispongan unas pequeñas toberas con el fin de minimizar el error que pueda existir entre las ecuaciones utilizadas y la realidad, ya que

estas están pensadas para la forma típicamente acampanada de las toberas, con lo que se diseñarán tantas como ventiladores haya, con las siguientes características, y cuyos planos constructivos pueden consultarse en el Anexo 10 [15].

Tabla 5.3: Características geométricas y de las toberas a instalar.

ángulo de convergencia (α)	20°
ltobera (cm)	2,74
Dventilador (cm)	7
Av (cm ²)	38,48

5.2.3. Sistema definitivo.

El sistema a instalar requiere de 6 ventiladores que sean capaces de impulsar cada uno un caudal de aire mínimo de $Q = 57,49 \frac{m^3}{h}$ con un diámetro $d = 7cm$ y el mínimo espesor posible (debido a las fuertes restricciones geométricas).

Además, la alimentación eléctrica debe ajustarse a una tensión de 12 voltios, ya que es la que se dispone para los elementos ya instalados en el cofre de baterías del grupo 3.

Con todo esto, el ventilador elegido es el SUNON PF70201V1-000U-A99, que cumple todos los requisitos comentados y es capaz de suministrar un caudal $Q_v = 73 \frac{m^3}{h}$.

La hoja de características de dicho ventilador se puede consultar en el Anexo 11.

De esta manera quedaría el cofre de las baterías con el sistema de ventilación ya instalado:

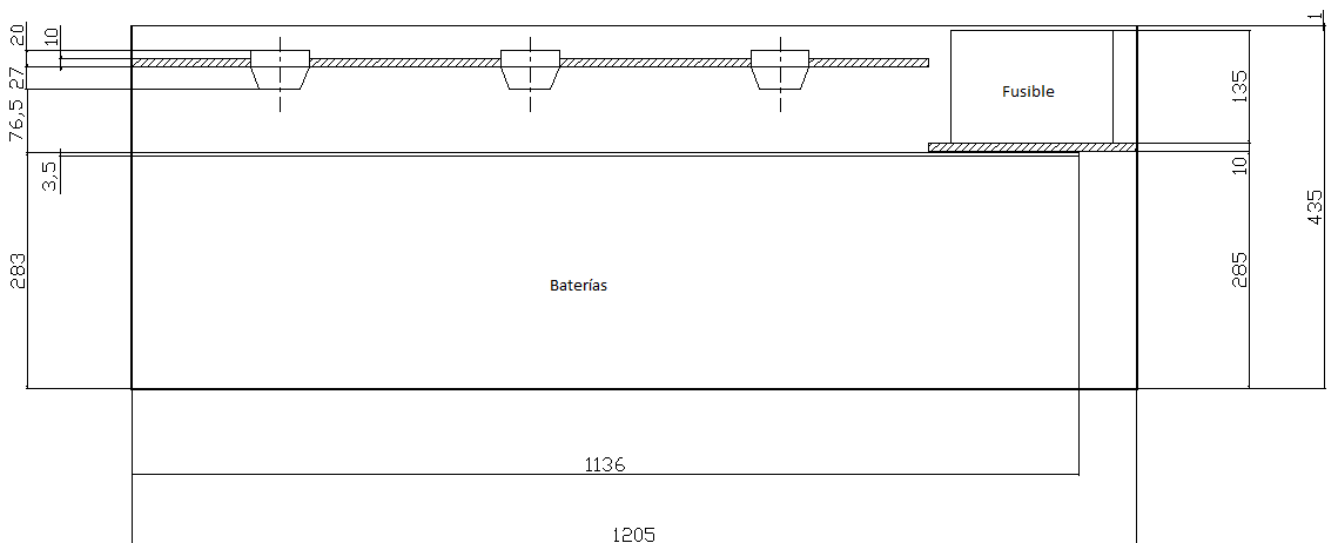


Figura 5.1: Características geométricas del sistema de refrigeración definitivo.

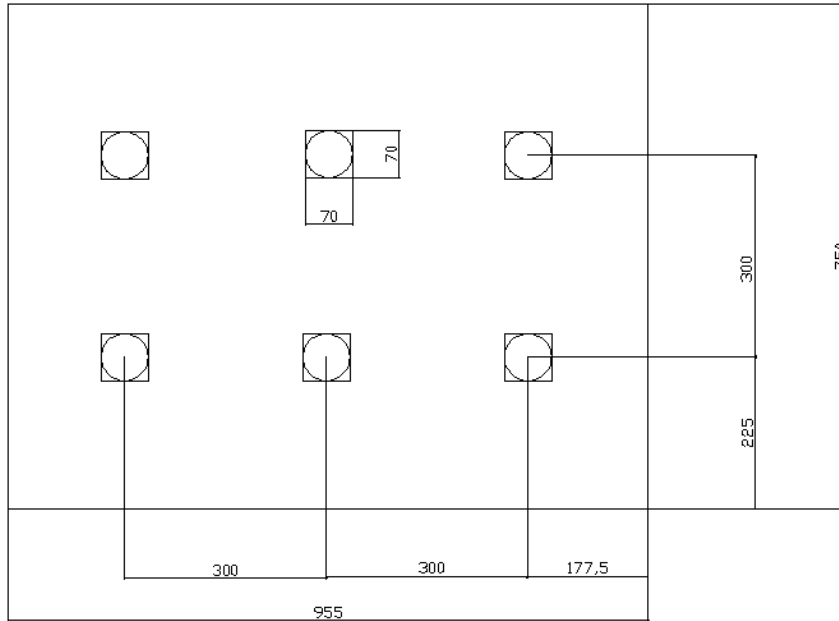


Figura 5.2: Disposición de los ventiladores en el tablón sobre la superficie del grupo 3 de baterías.

5.3. Instalación.

Los ventiladores se instalan en un tablón de madera situado a 107 mm sobre la superficie de las baterías. En dicho tablón se hacen los agujeros en los que se colocarán los ventiladores de la forma en que se muestra en la Figura 5.2, atornillando cada uno de ellos con cuatro tornillos de $\varnothing 4 \times 40$ mm. Debajo de cada uno de ellos se colocarán las toberas pegándolas con un adhesivo multimateriales.

Los ventiladores deberán ir conectados a una fuente de alimentación de tensión de 12 voltios, la cual ya se encuentra instalada. Al disponerse de más elementos a conectar a dicha fuente, los ventiladores se colocarán en paralelo. Para la activación de los ventiladores se conectará en serie con todos ellos una resistencia variable con la temperatura (termistor NTC), para que comiencen a funcionar a partir de unos 45 °C y alcancen el régimen nominal antes de los 55°C, tal como se muestra en la Figura 5.3. Además se instalan dos interruptores, uno en paralelo con el termistor para controlar el encendido/apagado de los ventiladores y otro en serie para cortar la corriente en caso de mal funcionamiento del termistor.

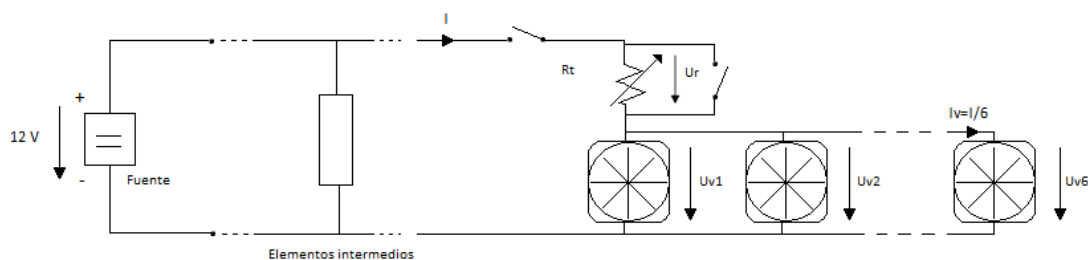


Figura 5.3: Circuito para la instalación de los ventiladores.

Los cálculos se han realizado aplicando un divisor de tensión en la rama de la resistencia y los ventiladores para obtener la tensión en estos últimos y ajustar la resistencia de tal forma que los 3V necesarios para activar el ventilador se obtengan a partir de la temperatura indicada y se alcance el régimen nominal una vez alcanzados los 55°C. Así, la constante térmica debe ser tal que la resistencia esté próxima a anularse cuando se aumenta la temperatura de 25°C (valor nominal de la resistencia) a 55°C. Calculando este coeficiente térmico;

$$k = -\frac{100\%}{30^\circ} = -3,3\% / ^\circ C$$

De entre los termistores disponible en la página de componentes electrónicos de RS se ha elegido el que más se ajusta a estos requerimientos, siendo este el *Termistor NTC AVX, resistencia 150Ω, constante 22s, 6.3 Dia. x 4mm de constante térmica k=-3,9%/°C*.

Abajo se muestra el comportamiento del circuito, mostrando la tensión en bornes de los ventiladores en función de la temperatura de las baterías.

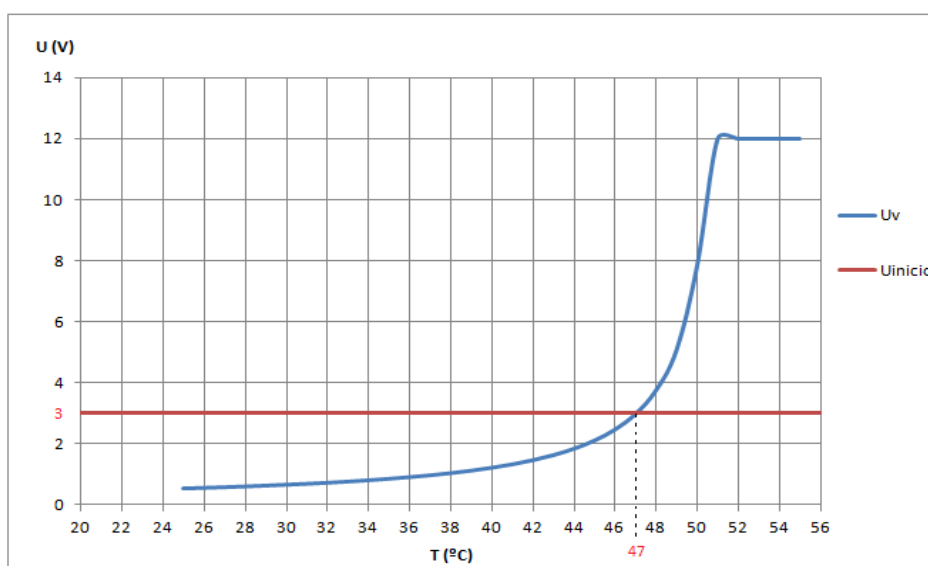


Figura 5.4: Evolución de la tensión en bornes de los ventiladores en función de la temperatura.

Se han obtenido también las curvas del régimen de velocidad del ventilador, así como del caudal que suministra en función de la tensión en sus bornes a partir de la teoría de semejanza tal y como se muestra [16]:

Definiendo los números adimensionales,

$$\Pi_H = \frac{gH}{N^2 D^2} \quad ; \quad \Pi_W = \frac{W}{\rho N^3 D^5} \quad ; \quad \Pi_Q = \frac{Q}{ND^3} ;$$

$$\widehat{W} = \widehat{\rho} \widehat{N}^3 \widehat{D}^5$$

Obtenemos $\widehat{H} = \widehat{N}^2 \widehat{D}^2$

$$\widehat{Q} = \widehat{N} \widehat{D}^3$$

Con $\rho = \text{cte}$, $D = \text{cte}$ obtenemos $\widehat{\rho} = 1$ y $\widehat{D} = 1$

Y las ecuaciones quedan:

$$\begin{aligned} \widehat{N} &= \widehat{W}^{1/3} \\ \widehat{Q} &= \widehat{N} = \widehat{W}^{1/3} \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} N' &= N \left(\frac{W'}{W} \right)^{1/3} \\ Q' &= Q \left(\frac{W'}{W} \right)^{1/3} \end{aligned}$$

siendo $W = W_{\text{eléctrica}} = U_{\text{nominal}} \cdot I = 12 \times 0,285 = 3,42W$

$$W' = U(T(^{\circ}C)) \cdot I$$

Obteniendo las revoluciones y el caudal proporcionado, podemos calcular el coeficiente de convección que se obtiene sobre la superficie a refrigerar, que se representa en la Figura 5.5, así como la temperatura que se alcanza por dicha superficie en cada momento (Figura 5.6).

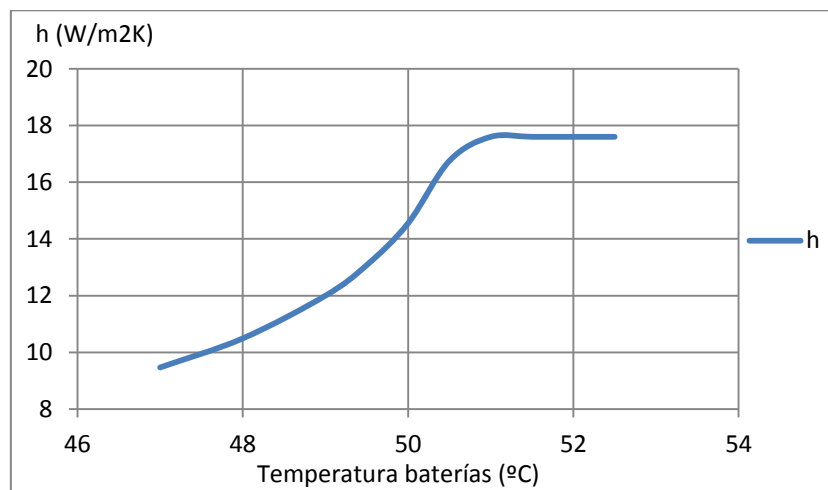


Figura 5.5: Coeficiente de convección proporcionado por los ventiladores en función de la temperatura alcanzada por la superficie.

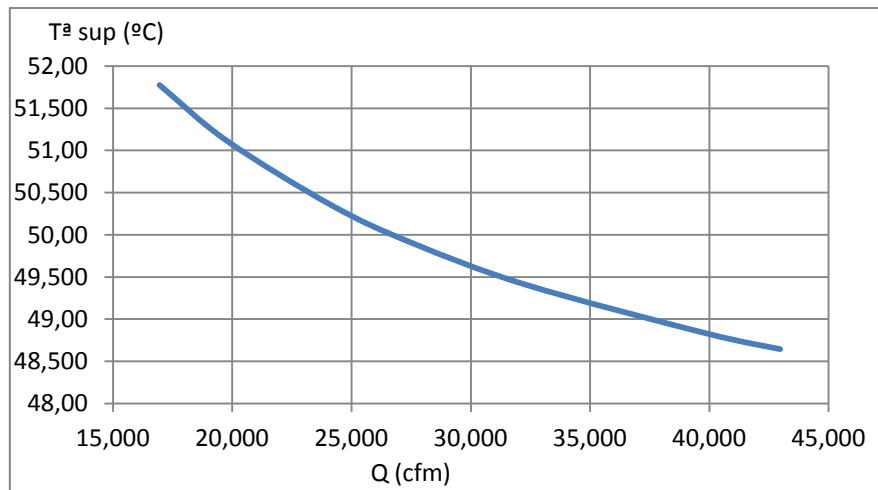


Figura 5.6: Temperatura de la superficie refrigerada en función del Caudal de aire.

En las siguientes imágenes se muestra como queda el sistema de refrigeración una vez instalado en el cofre del grupo 3 de baterías.



Figura 5.7: Sistema de refrigeración instalado en el cofre nº 3

6. Protocolo de validación

Como ya se definió en el alcance del proyecto, sólo se llevará a cabo la instalación, y la comprobación del sistema de refrigeración no podrá realizarse hasta que el vehículo se encuentre plenamente operativo. Por ello, se definirá brevemente en este capítulo cuál deberá ser el protocolo a seguir para realizar la comprobación del sistema de refrigeración calculado. Se mostrarán los pasos a seguir y los resultados esperados.

Pasos a seguir:

1. Carga completa de las baterías (carga recomendada a 54 A).
2. Medición de la temperatura superficial de las baterías con el sistema apagado, la prueba debe realizarse un día de verano con unos 40°C de temperatura ambiente.
3. Se instalará el todoterreno en el elevador, dejando libres las cuatro ruedas.
4. Comprobación del funcionamiento de los ventiladores gracias al cierre del interruptor instalado en paralelo con el termistor del circuito.
5. Puesta en marcha del vehículo a velocidad constante (consumo de 54A, a 267,5V → 14,4 kW) siguiendo el consumo dado en la figura 6.1.
6. Monitorización de la temperatura a través del BMS.
7. El sistema debe activarse sólo una vez alcanzados los 47°C, manteniendo la temperatura siempre por debajo de los 48,5°C, siguiendo la gráfica de la Figura 5.6.
8. Si el ensayo se realiza a una temperatura ambiente de 25°C, el sistema no debería alcanzar la temperatura crítica y los ventiladores no se pondrían en marcha.

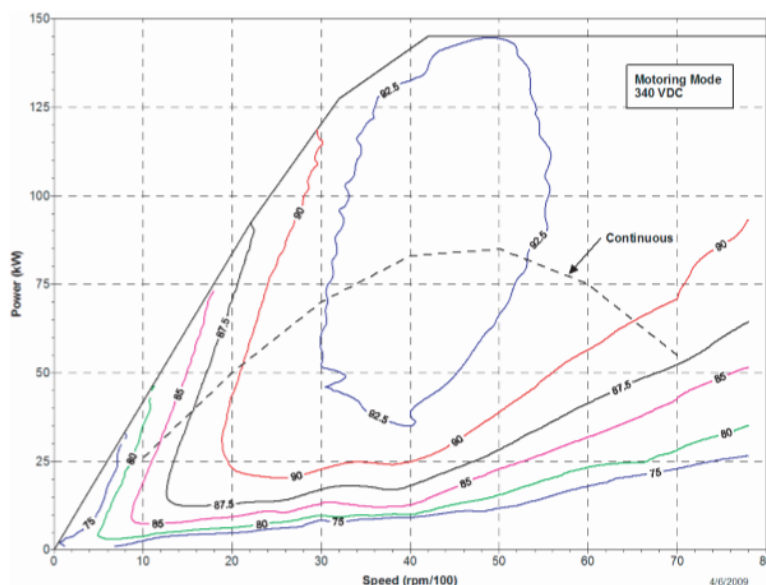


Figura 6.1: Característica de potencia del motor.

7. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos en este proyecto se pueden extraer ciertas conclusiones, las cuales a su vez llevan a formular una serie de recomendaciones para trabajos futuros.

En lo que se refiere al comportamiento térmico de las baterías se puede deducir lo siguiente:

- La composición química de las baterías de ferrofosfato de litio resulta en un aumento de la temperatura menor a la mayoría de las baterías del mercado debido a su gran estabilidad térmica, lo que se traduce en un funcionamiento más estable y una mayor vida útil de las células, mejorando también su seguridad. Además, las células de litio-fosfato de hierro experimentan un ratio de pérdida de capacidad más lento, resultando en un aumento menor de la temperatura y en un sistema de refrigeración más sencillo y que requiera menos potencia que en otros casos.
- Se ha deducido un modelo teórico bastante aproximado a la realidad, como se puede comprobar con los ensayos de laboratorio, observando que el calentamiento de las células utilizadas se produce de manera bastante desigual, obteniendo un mayor calentamiento en la zona de los bornes, donde se alcanzarán las mayores temperaturas, siendo la zona más crítica y aquella de donde sea primordial extraer el calor producido. Esto afectará negativamente a las baterías y habrá de pensarse en la manera de conseguir una distribución de temperatura homogénea. Este aspecto afecta directamente a la distribución de los ventiladores que deben instalarse.

Acerca del sistema de refrigeración se puede concluir que:

- Es especialmente importante puntualizar que los resultados obtenidos son una primera aproximación a la solución definitiva del problema por varias razones:
 1. El modelo que se ha utilizado para el comportamiento térmico de las baterías se ha obtenido empíricamente, despreciándose la diferencia de temperatura en dirección transversal y utilizando unas características térmicas que si bien en el caso de la C_p , se ha calculado, en el caso de la conductividad térmica se ha tomado un valor que se considera aproximado a la realidad, pero estimado.
 2. La geometría del sistema no ha permitido la instalación de un sistema adecuado, con lo que existen zonas no refrigeradas que pueden resultar en daños a las baterías, además de que se ha omitido la refrigeración de los grupos 1 y 2.
 3. El vehículo sobre el que se trabaja consiste en un vehículo de pruebas, sobre el que se realizan diversas modificaciones con el paso del tiempo y ninguno de los elementos que se instalan en un primer momento tiene porqué corresponder a los definitivos.
- Se ha dimensionado el sistema de refrigeración para el caso más extremo de descarga con el fin de que éste funcione en cualquier circunstancia, sin embargo debido a las restricciones impuestas se ha comprobado que era inviable su instalación y se ha

recalculado para las condiciones estándar, sobredimensionando ciertos de los componentes para cubrir los casos en los que se dispongan de mayores exigencias. Sin embargo, no se ha podido conseguir que la temperatura de las celdas sea homogénea, lo que afectará negativamente a su comportamiento.

- Se ha instalado el sistema de refrigeración más sencillo y efectivo posible, viéndose este limitado por la complicada geometría de los cofres que contienen los grupos de las baterías, la cual no puede modificarse, resultando en que sólo es posible la refrigeración del grupo 3 en la superficie superior y que se realiza mediante convección forzada con aire a 45°C como refrigerante por medio de 6 ventiladores.
- En la instalación se han añadido ciertos elementos auxiliares para el control de los ventiladores, los cuales empezarán a actuar progresivamente a partir de los 47°C, alcanzando su potencia nominal a los 51°C gracias a un termistor, no permitiendo nunca que se lleguen a los 55°C.

Estas conclusiones nos plantean ciertos objetivos futuros y líneas de investigación que deben desarrollarse.

- Deberá realizarse la comprobación del sistema calculado una vez que todo el vehículo esté dispuesto para funcionar, siguiendo las directrices del capítulo 6 y verificando su correcto funcionamiento, para, en el caso de fallo o funcionamiento incorrecto, mejorar y optimizar el sistema a instalar a través de una mejor evacuación del flujo caliente.
- Dado que la geometría de los elementos ya instalados en el vehículo no permiten la inclusión del sistema de refrigeración más óptimo, se propone el rediseño de los cofres de las baterías teniendo en cuenta cuál debe ser el método y sistema para evitar su excesivo calentamiento. En los anexos del presente proyecto se indican las temperaturas máximas de todos los cofres así como los coeficientes de convección necesarios en cada uno, consiguiendo además que la temperatura resulte lo más homogénea posible.
- Se recomiendan dos soluciones a estudiar para futuros proyectos. En primer lugar se recomienda la instalación de las células dejando ciertos espacios para permitir la circulación del refrigerante y conseguir una mejor y más homogénea refrigeración. Por otro lado se recomienda el estudio para su implantación de los PCM (materiales de cambio de fase) [12], lo cual resulta muy útil en un problema con la geometría limitada, resultando un sistema más compacto y una evacuación del calor mucho más homogénea.

8. Bibliografía

- ❖ [1]. Baterías recargables, Manual de aplicaciones-Equipo técnico de Marketing de Gates Energy Products, Inc. 1999.
- ❖ [2]. Battery Reference Book 3ª edición, T.R.Crompton.
- ❖ [3]. Handbook of batteries.
- ❖ [4]. LiFePO₄:
http://sycomoreen.free.fr/docs_multimedia/electrochimie_accus/Redox_Lithiumion_esp.pdf.
- ❖ [5]. Solid State ionics 148; Reaction behaviour of LiFePO₄ as a cathode material for rechargeable lithium batteries.
- ❖ [6]. International Journal of Electrochemical science.
- ❖ [7]. Transformación de un vehículo propulsado por un MACI en un vehículo eléctrico de altas prestaciones, por Iván Lozano Domínguez.
- ❖ [8]. Transferencia de Calor y Masa 3ª edición, Yunus A. Çengel.
- ❖ [9]. Transferencia de calor, Universidad de Zaragoza, J.M.Marín, Carlos Monné, Javier Uche.
- ❖ [10]. International Journal of Heat and Mass Transfer.
- ❖ [11]. Journal of Power Sources (Heat dissipation design for lithium-ion batteries Mao-Sung Wua,*, K.H. Liub, Yung-Yun Wangb, Chi-Chao Wanb).
- ❖ [12]. Journal of power sources: Active vs passive thermal management of high power lithium-ion packs.
- ❖ [13] White F.M, Mecánica de Fluidos, Ed. McGraw Hill, 2010.
- ❖ [14]. Apuntes de máquinas hidráulicas.
- ❖ [15]. Termotecnia básica para ingenieros químicos: procesos termodinámicos y máquinas.

Anexo 1: Planos de los cofres de las baterías

Proyección en el tercer diedro:

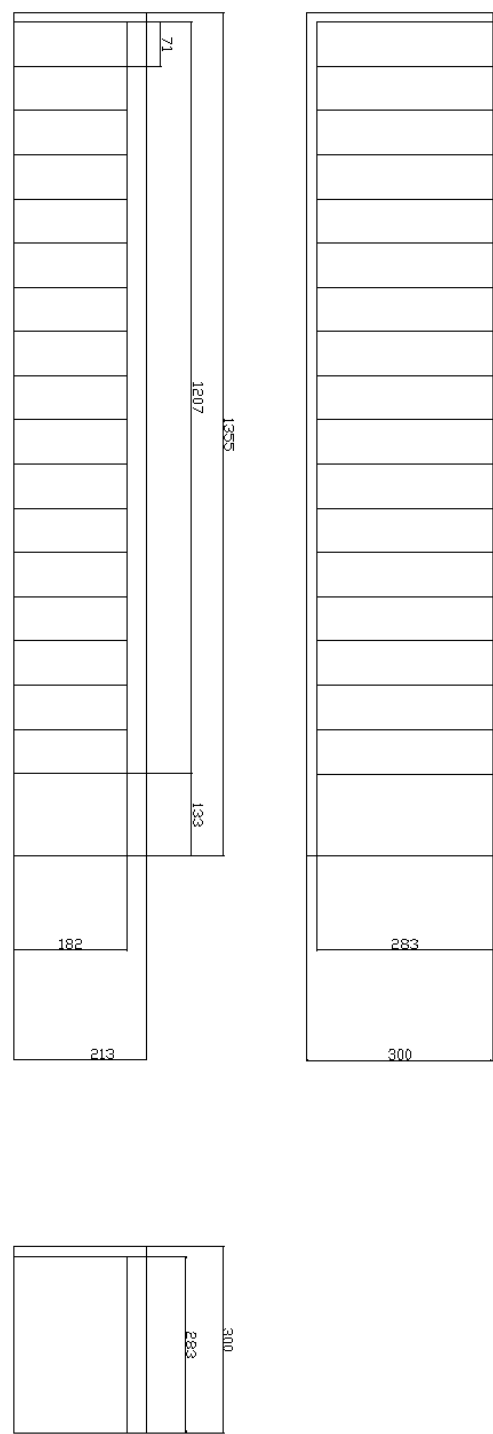


Figura A1: Planos grupo 1

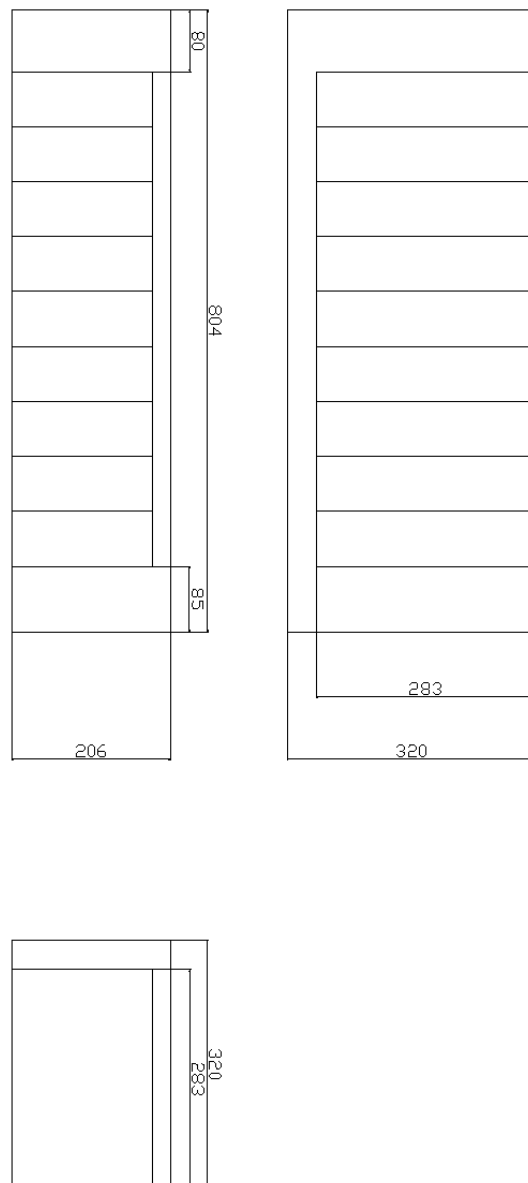


Figura A2: Planos grupo 2

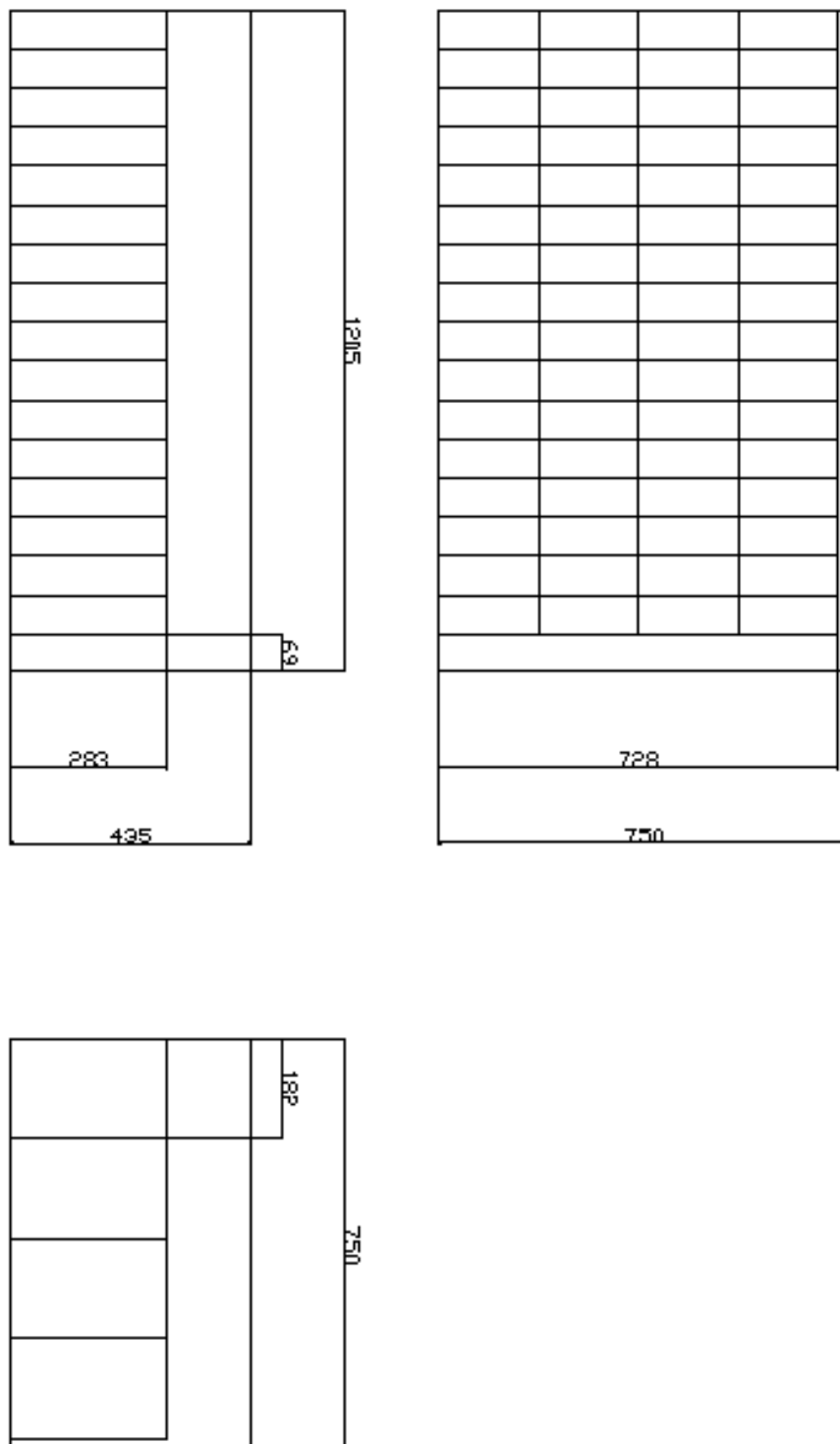

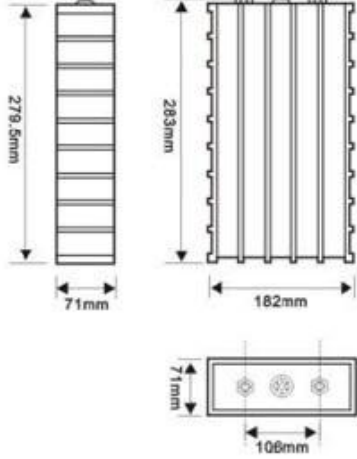


Figura A3: Planos grupo 3

Anexo 2: Hoja de características de las baterías SE180AHA



Specification MODEL: SE180AHA		MODEL: SE180AHA	
 		Nominal Capacity	180Ah
		Energy Density	116wh/kg@0.1C
		Float Voltage	3.4V
		Inner Resistance	< 1.0mΩ
		Operating Voltage	Charge Voltage 3.6V
			Discharge Cut-off Voltage 2.0V
		Max Charge Current	≤3CA
		Max Discharge Current	Constant Current ≤4CA(30s)
			Impulse Current ≤12CA(5ms)
		Standard Charge/Discharge Current	0.3CA
		Cycle Life	80%DOD ≥2000times
			70%DOD ≥3000times
		Max Transient Temperature Resistance of Shell	170℃
		Long Term Shell Temperature Resistance	≤130℃
		Max Recommended Temperature	≤75℃
		Operating Temperature	Charge 0℃~55℃
			Discharge -25℃~55℃
		Low Temperature Discharge Efficiency	≥90%
		Self-discharge Rate/Month	≤3%(Monthly)
		Weight	5.6kg±0.1kg

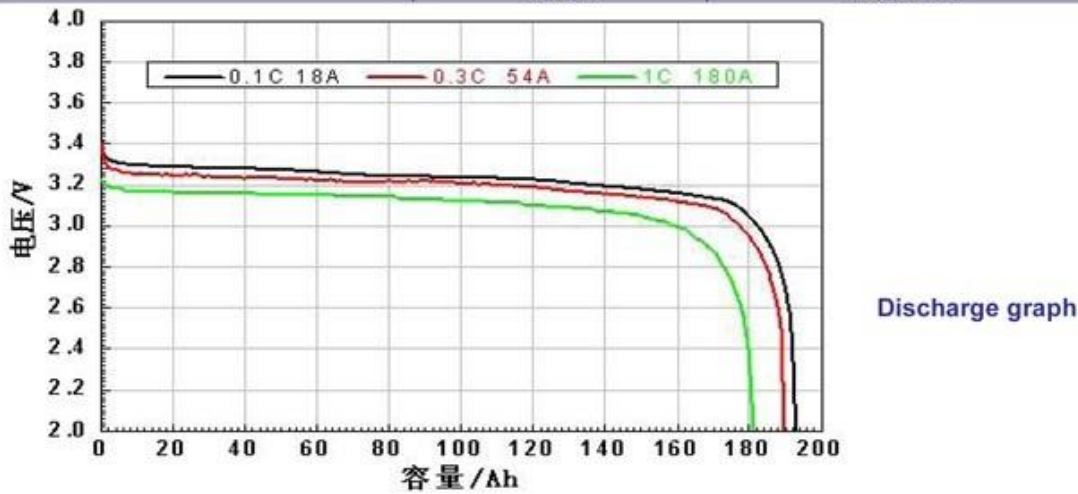


Figura A4: Hoja de características de las baterías.

Anexo 3: Ensayos de laboratorio

A3.1. Medición experimental de la capacidad calorífica de la célula

A3.1.a) Base teórica.

Dado que vamos a considerar la batería como un sólido compacto con unas determinadas características físicas, necesitamos determinar estas mismas para poder calcular el calor generado. En este apartado se calculará la capacidad calorífica del sólido. Para ello utilizaremos las condiciones que debe cumplir un sistema cuando se modela como un sistema de capacidad; esto es, un sólido con unas propiedades térmicas dadas y en unas condiciones térmicas dadas, sumergido en un fluido con otras condiciones térmicas diferentes.

En dicho caso son dos los mecanismos de transferencia de calor: conducción entre el sólido y el fluido, y convección debida al movimiento del fluido alrededor del sólido.

El procedimiento a realizar será el siguiente:

1. Se sumergirá el sólido en un fluido con unas determinadas características y se dejará en ese estado hasta que alcance la temperatura del ambiente en el que se encuentra.

De aquí mediremos:

T_i : temperatura inicial en la superficie del sólido.

2. A continuación se sumergirá el sólido en otro ambiente con diferentes características térmicas (mayor o menor temperatura).

Se medirá T_a : temperatura del fluido.

Por otro lado se controlará el cambio de temperatura de la batería, midiendo la misma con varios termopares cada un intervalo de tiempo determinado.

$T(t)$: temperatura de la batería tras un tiempo t

Se realizarán las medidas hasta que la variación de temperatura entre dos intervalos de tiempo sea inferior a $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$T_{final} = T(t)$$

Con estos datos podremos aplicar las siguientes dos ecuaciones para calcular la capacidad calorífica del conjunto:

$$W = Ri^2 t = mC_p(T(t) - T_i) \quad (A.1)$$

$$Q = hA_s(T_s - T_a) \quad (A.2)$$

Combinando ambas ecuaciones obtenemos una relación de la que podemos deducir C_p :

$$\ln \frac{T(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = - \frac{h.A_s}{\rho.V.c_p} t \quad (A.3)$$

$$C_p = - \frac{hA_s}{\rho.V.\ln \frac{T(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty}} t \quad (A.4)$$

Considerando:

$$A_s = 0,165738 m^2 \quad h = 8 \frac{W}{m^2 K}$$

$$V = 0,003617 m^3 \quad \rho = 1550,51 \frac{kg}{m^3}$$

$T_\infty = T_a$: Temperatura del fluido.

T_i : Temperatura inicial de la célula.

$T(t)$: Temperatura alcanzada por la batería tras un tiempo t

A3.1.b) Ensayos realizados.

Para calcular la capacidad calorífica se han realizado diversos ensayos en diferentes condiciones para obtener la mejor aproximación al valor real.

Ensayo 1:

Enfriamiento de la célula en aire:

$$T_i = 25,1^\circ C$$

$$T_a = 7,5^\circ C$$

$$t = 12600s$$

$$T(t = 12600s) = 12,6^\circ C$$

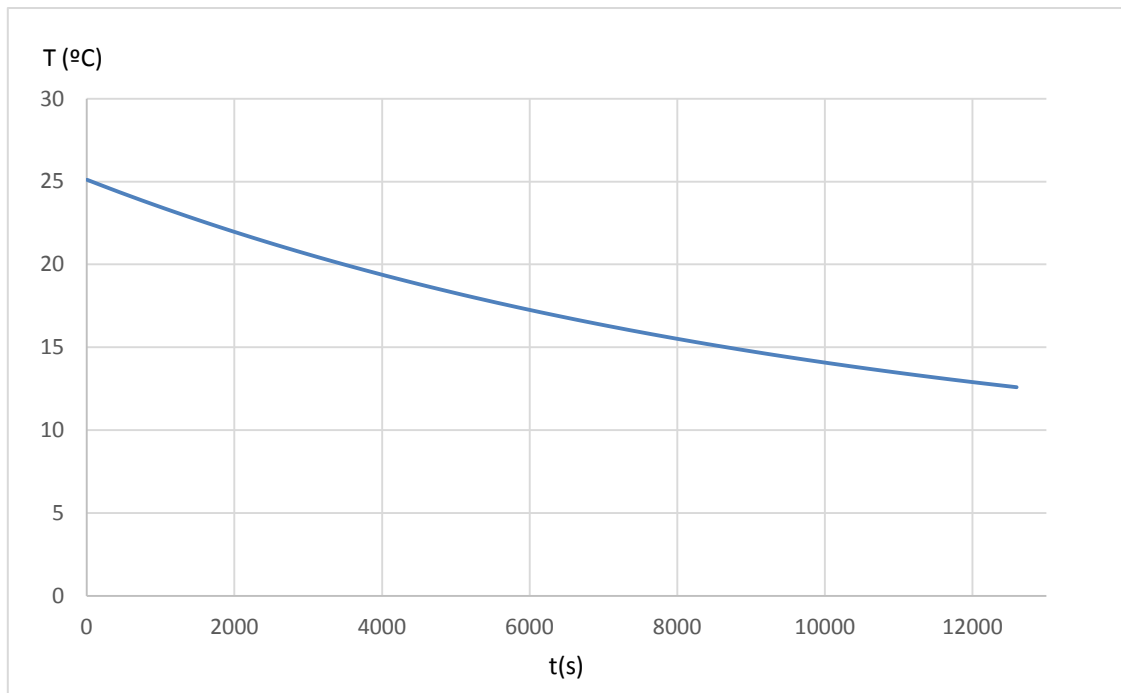


Figura A5: Evolución de la temperatura de la célula, ensayo 1.

De aquí, obtenemos que la capacidad calorífica es $C_p = 2430,75742 \frac{J}{kg.K}$

Ensayo 2:

Enfriamiento de la célula en aire:

Tabla A1: Medición con termopar Tastoterm NiCr-NiAl D700S, ensayo 1.

Text (°C)	Ti (°C)	Tf (°C)	t (s)	Cp (J/Kg.K)
17,03023256	25,7	18,7	10800	1566,79152

Tabla A2: Medición con termómetro XXX, ensayo 1.

Text (°C)	Ti (°C)	Tf (°C)	t (s)	Cp (J/Kg.K)
17,03023256	25,7	17,4	10800	818,059967

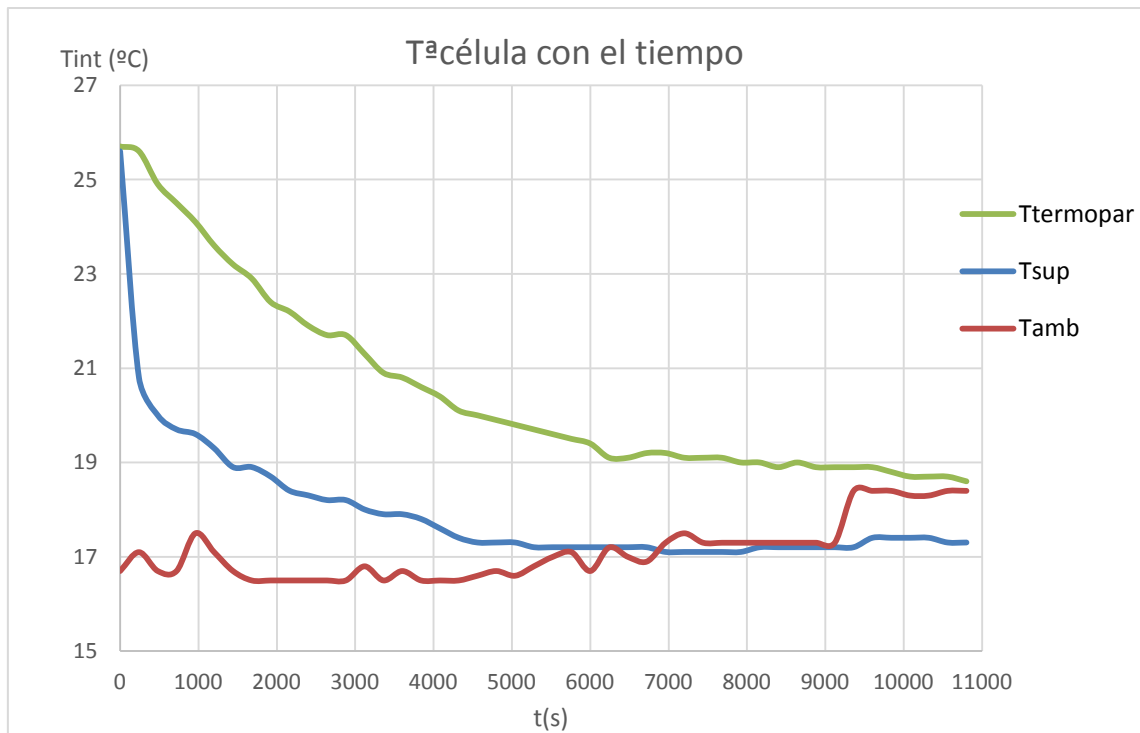


Figura A6: Evolución de la temperatura de la célula, ensayo 2.

Ensayo 3:

-Calentamiento de la célula en un recinto cerrado.

En este caso se introdujo la batería en una cámara frigorífica a una temperatura T_{fria} hasta que las temperaturas del aire dentro de la cámara y la de la célula fuesen prácticamente iguales. Acto seguido, y siempre controlando la temperatura a través de dos métodos (termopar Tastoterm NiCr-NiAl D700S y termómetro), se introdujo la batería en otro ambiente más caliente, a una temperatura $T_{caliente}$. Los datos y resultados fueron los siguientes:

Tabla A3: Medición con termopar Tastoterm NiCr-NiAl D700S, ensayo 2.

Text (°C)	Ti (°C)	Tf (°C)	t (s)	Cp (J/Kg.K)
26,0970588	6,75	20,4	10800	2110,88902

Tabla A4: Medición con termómetro XXX, ensayo 2.

Text (°C)	Ti (°C)	Tf (°C)	t (s)	Cp (J/Kg.K)
26,0808824	7,9	21,3	10800	1932,06907

-gráficas:

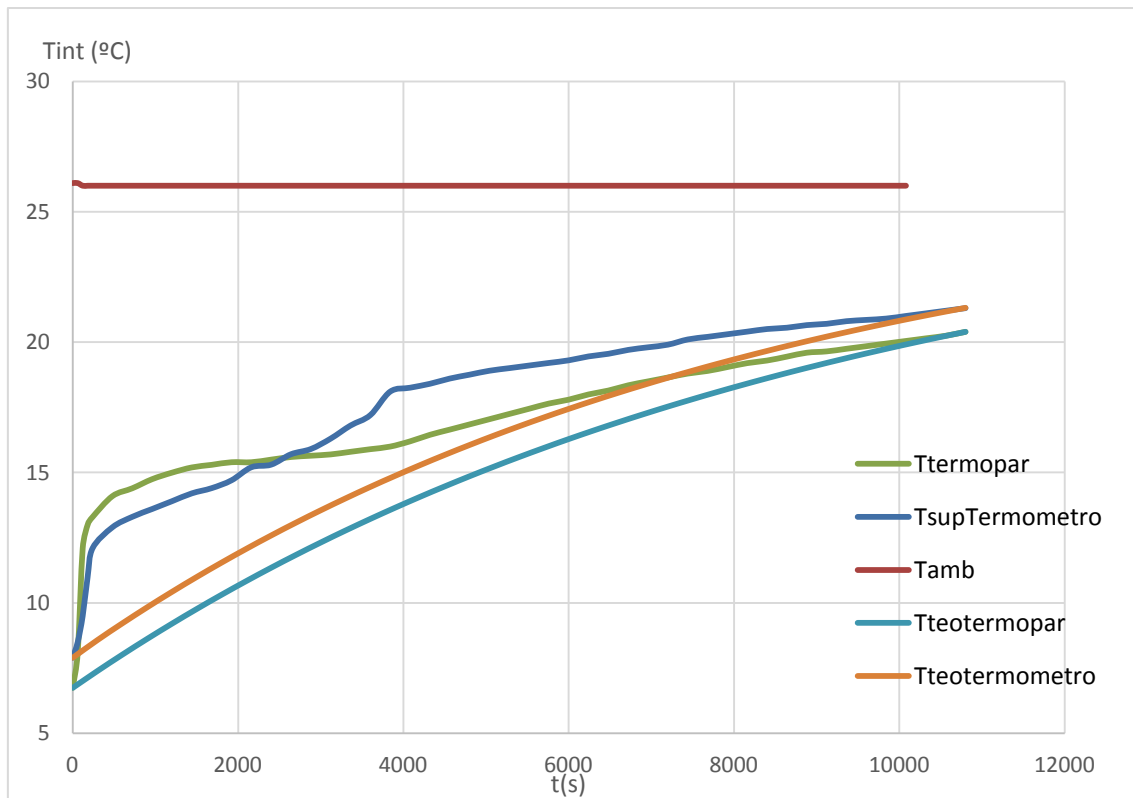


Figura A7: Evolución de la temperatura de la célula, ensayo 3.

Tabla resumen:

Tabla A5: Resultados del cálculo de C_p para cada ensayo.

$C_p(\text{J/kg.K})$	Termopar	Termómetro	Promedio
Ensayo 1	2430,757416		2430,75742
Ensayo 2	1566,791521	818,0599669	1566,79152
Ensayo 3	2110,889018	1932,069075	2021,47905
			2006,34266

Se utilizará como valor para los cálculos el promedio de los C_p obtenidos (se ha omitido del cálculo el valor mostrado en amarillo debido a una excesiva divergencia con los demás valores), obteniendo pues un valor final:

$$C_p = 2006,34266 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$$

A3.2.Evaluación experimental del calentamiento de las baterías.

A continuación se describirán los experimentos que se han realizado para validar los modelos teóricos que se han utilizado para el cálculo de las temperaturas que alcanzan los conjuntos de baterías.

Se han realizado varios experimentos y se han comparado los resultados con los valores calculados.

A3.2.a).Protocolo experimental

Se realizará la carga y descarga de una (o varias) batería SE180AHA a diferentes intensidades y durante periodos de tiempo diferentes con el fin de medir la temperatura alcanzada por la misma al variar las solicitaciones.

A continuación, se podrá realizar el mismo experimento con un número mayor de baterías conectadas en serie para observar el cambio en la inercia térmica del conjunto y hacer una estimación de la temperatura alcanzada en este caso.

Instrumentos:

- Batería SE180AHA Sky Energy
- Termopar GW instek GDM-8255A
- Termopar Tasto therm D700S Ni Cr-NiAl
- Cables conductores de 5 mm de diámetro.
- Conjunto de resistencias
- Cajón aislante
- Cronómetro

Adquisición de datos:

- Software Arduino 1.0.5 (Tensión, intensidad y temperatura).
- 6600 Counts PC link (control de la tensión e intensidad).

Montaje experimental:

En un primer momento se realizará el montaje considerando una sola batería. Se conectarán los bornes de la batería a un circuito capaz de consumir de 0 a 100 amperios con incrementos de 10A. Los cables conductores serán de cobre con un diámetro de 5mm.

Se construirá un recipiente cerrado y adiabático que contendrá a las baterías y permitirá medir la temperatura de la superficie de las baterías, así como del aire que las rodee. Dicho recipiente será construido con paneles de poliestireno ($\lambda=0,157 \text{ W/m}^2\text{K}$) de diversas dimensiones (ver figura A8). Además se cubrirá el fondo con material aislante, para proteger la superficie del calor generado por las baterías.

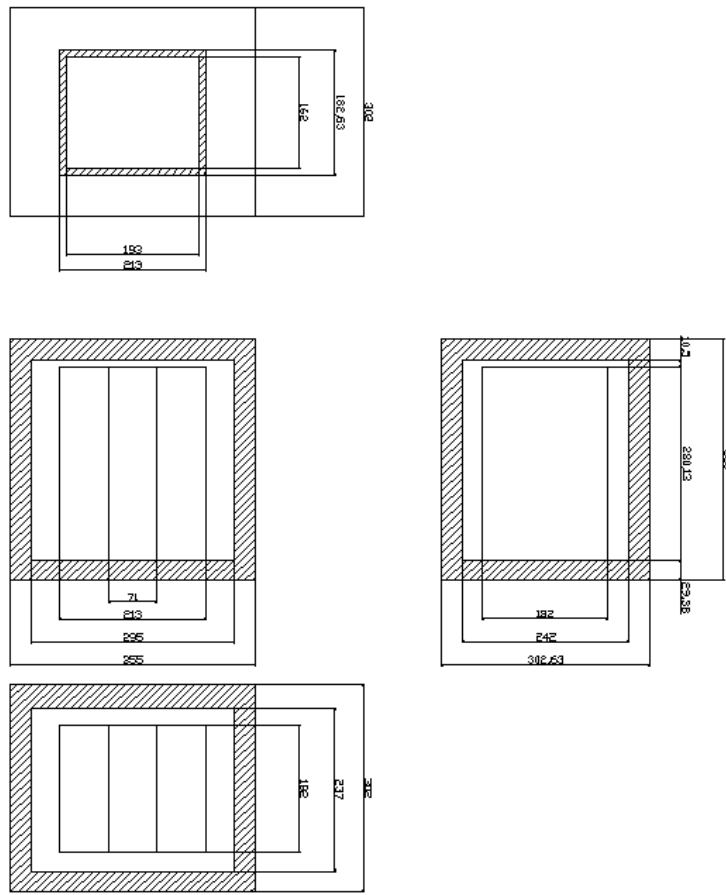


Figura A8: Planos cajón adiabático.

Se realizará en primer lugar el experimento con una sola batería y después con 2 y luego 3 para observar el cambio en la inercia térmica al aumentar el número de estas. Se muestran en las figuras del siguiente apartado las comparaciones con los resultados teóricos, cuyo cálculo se realiza a través de la generación de calor interior producida por la resistencia interna. El cálculo de $R_i(\Omega)$ se explica en el anexo anterior y en la tabla A6 se muestra el resultado obtenido en cada ensayo.

Los experimentos llevados a cabo se pueden consultar en la siguiente tabla:

Tabla A6: relación de ensayos sobre las baterías SE180AHA.

Num Experimento	Fecha	Nºbat	Carga/Descarga	T (h)	Rint (Ω)	I (A)		Batería 1	Batería 3	Batería 4	Batería 2 (sin utilizar)
Experimento 1	22/01/2014	1	Carga	1	0,0083	16,88	Ei (V)	2,920			2,81
							Ef (V)	3,190			
Experimento 2	24/01/2014	1	Carga	3	0,0135	15,86	Ei (V)				2,9
							Ef (V)				3,3
Experimento 3	28/01/2014	1	Descarga	1	0,0030	88,5	Ei (V)	3,270			
							Ef (V)	2,630			
Experimento 4	31/01/2014	3	carga	0,5	0,0155	16	Ei (V)	3,220	3,330	3,29	
							Ef (V)	3,267	3,408	3,30	
Experimento 5	31/01/2014	2	carga	2	0,0033	16,08	Ei (V)	3,267		3,30	
							Ef (V)	3,281		3,34	
Experimento 6	10/02/2014	1	carga	1	-	11,86	Ei (V)	3,290	3,330	3,33	
							Ef (V)		3,500		
Experimento 7	10/02/2014	1	Descarga	1	0,0018	102	Ei (V)		3,470		
							Ef (V)		3,260		

A continuación se exponen los resultados y conclusiones.

A3.2.b) Experimentos sobre una batería.

Experimento 1; Carga: $t=1h$; $I=16,88\text{ A}$; $T_{amb}= 25,92^{\circ}\text{C}$

Tabla A7: Comparación temperaturas obtenidas en el experimento 1.

	$\Delta T_{sup} (^{\circ}\text{C})$	$T_{max} (^{\circ}\text{C})$
Arduino (PC)	0,97	26,89
Instrumental (termopar)	1,50	27,20
Teórico	0,93095863	26,8509586

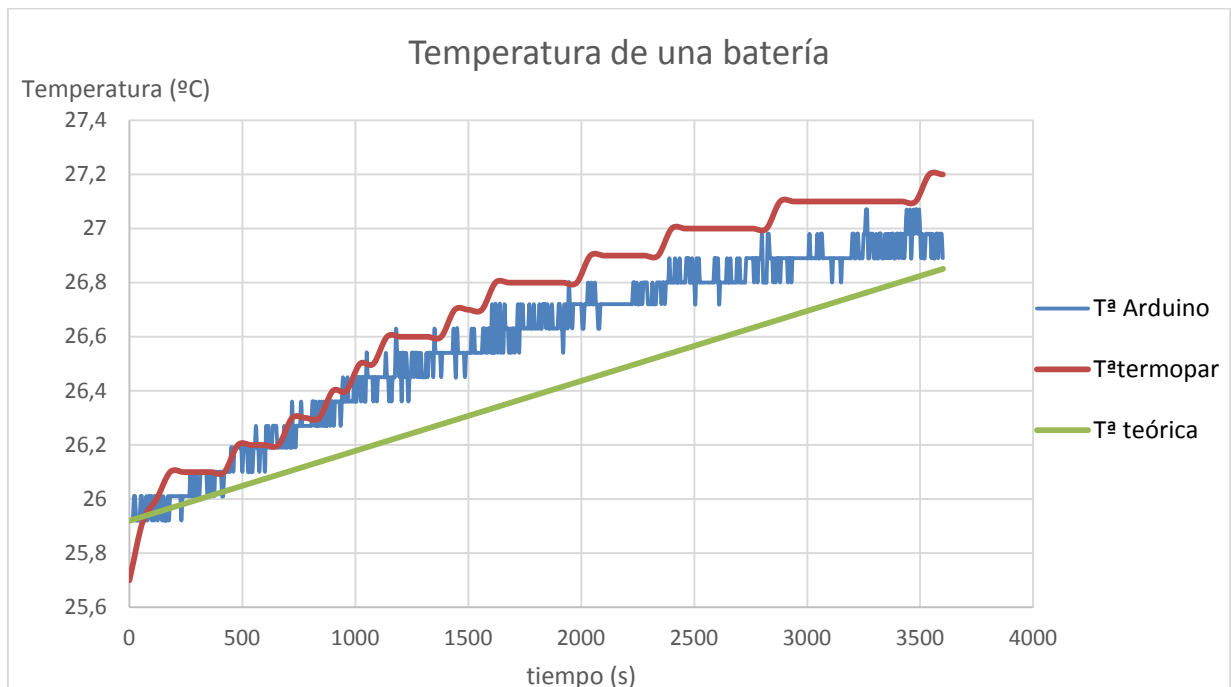


Figura A9: Comparación temperaturas obtenidas en el experimento 1.

Experimento 2; Carga: $t=3h$; $I=15,86\text{ A}$; $T_{amb}= 25,92^{\circ}\text{C}$

Tabla A8: Comparación temperaturas obtenidas en el experimento 2.

	$\Delta T_{sup} (^{\circ}\text{C})$	$T_{max} (^{\circ}\text{C})$
Arduino (PC)	2,4	28,5
Instrumental (termopar)	2,8	28,5
Teórico	3,15578281	28,8557828

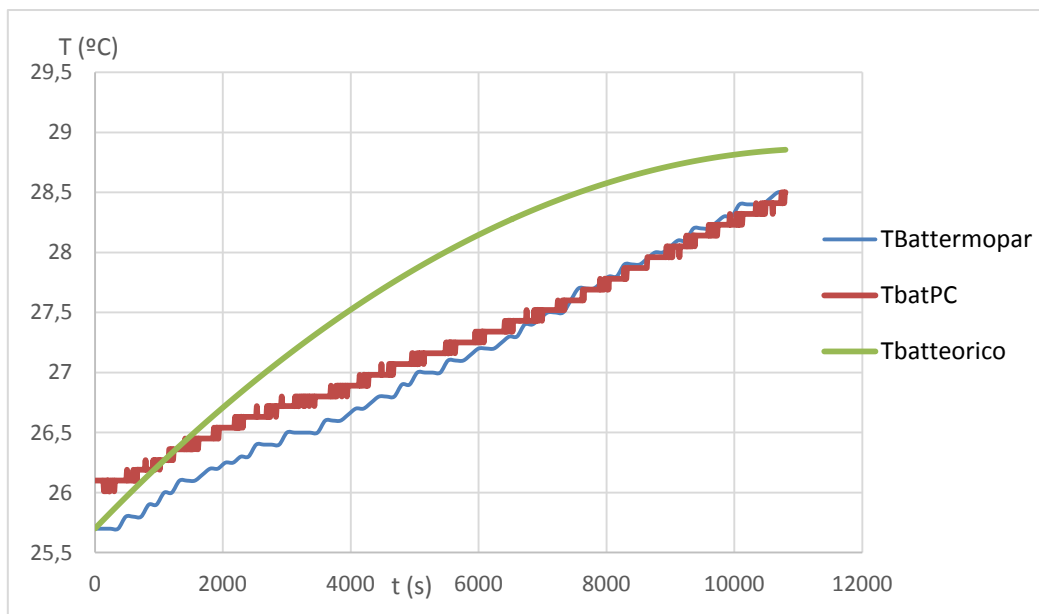


Figura A10: Comparación temperaturas obtenidas en el experimento 2.

Experimento 3; descarga: 1 hora, I=88,5 A, T_{amb}= 24,30°C

Tabla A9: Comparación temperaturas obtenidas en el experimento 3.

	ΔT_{int} (°C)	ΔT_{sup} (°C)	T _{max} (°C)
Arduino (PC)		4,05	28,05
Instrumental (termopar)	4	3,5	26,3
Teórico	4,90234298	3,91805812	26,6180581

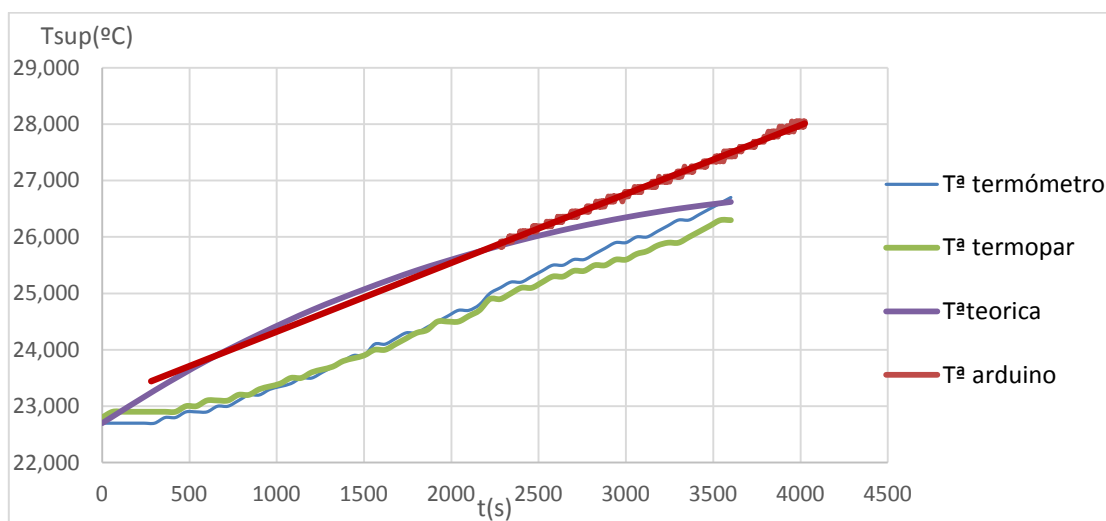


Figura A11: Comparación temperaturas obtenidas en el experimento 3.

A3.2.c) Experimentos sobre dos baterías:

Experimento 5; Carga: $t=2h$; $I=16,08 A$, $T_{amb}= 25,5^{\circ}C$

Tabla A10: Comparación temperaturas obtenidas en el experimento 5.

	$\Delta T_{sup} (^{\circ}C)$	$T_{max} (^{\circ}C)$
Arduino (PC)	1,86	27,34
Instrumental (termopar)	2,35	27
Teórico	1,6195487	27,0995487

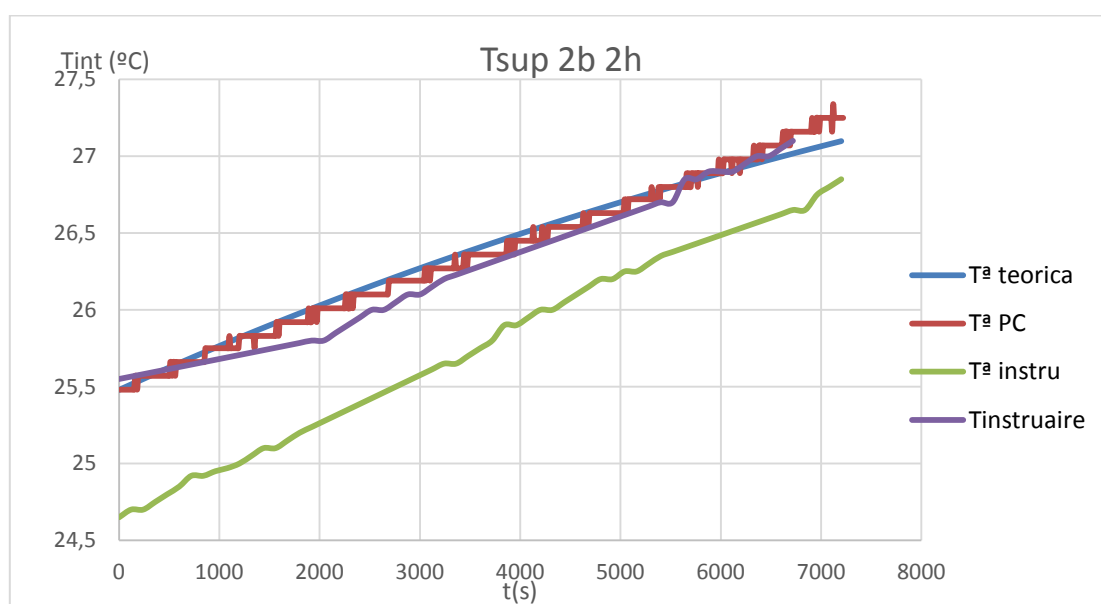


Figura A12: Comparación temperaturas obtenidas en el experimento 5.

A3.2.d) Experimentos sobre tres baterías.

Experimento 4; Carga: $t=0,5h$; $I=16A$; $T_{amb}=26^{\circ}C$

Tabla A11: Comparación temperaturas obtenidas en el experimento 4.

	$\Delta T_{sup} (^{\circ}C)$	$T_{max} (^{\circ}C)$
Arduino (PC)	0,53	25,39
Instrumental (termopar)	0,80	24,70
Teórico	0,74	24,64

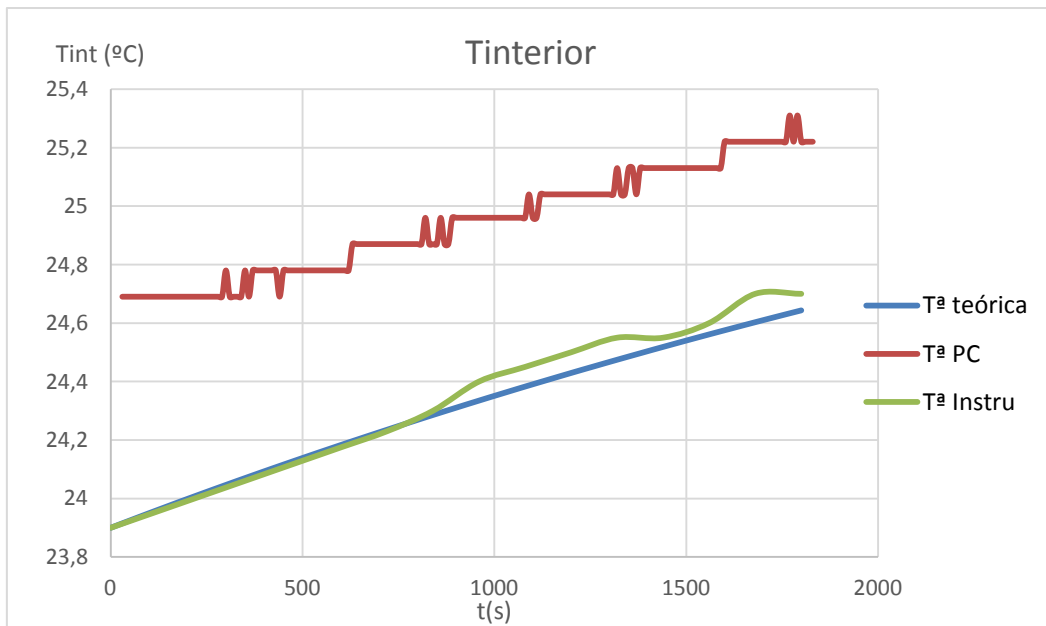


Figura A13: Comparación temperaturas obtenidas en el experimento 4.

A3.2.e) Experimentos con la cámara termográfica.

Por último, se ha realizado un experimento en el que se pretende observar si la distribución de temperaturas en la batería es uniforme o se producen variaciones a lo largo de ésta, y en el caso de que así sea, corregir el modelo teórico presentado.

Se realizará la descarga de una batería a unos 100 A durante aproximadamente una hora y se irán tomando imágenes con una cámara termográfica (FLUKE Ti400), para observar el comportamiento mencionado, cada 15 minutos.

A continuación se mostrarán únicamente las capturas de la cámara térmica para $t=60\text{min}$:

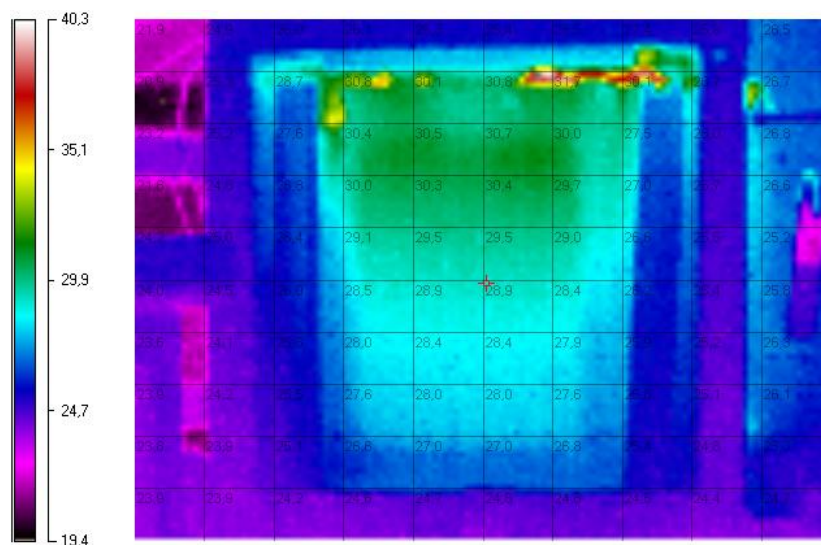


Figura A14: Distribución temperaturas cámara térmica ($t=1\text{h}$, $I=180\text{A}$).

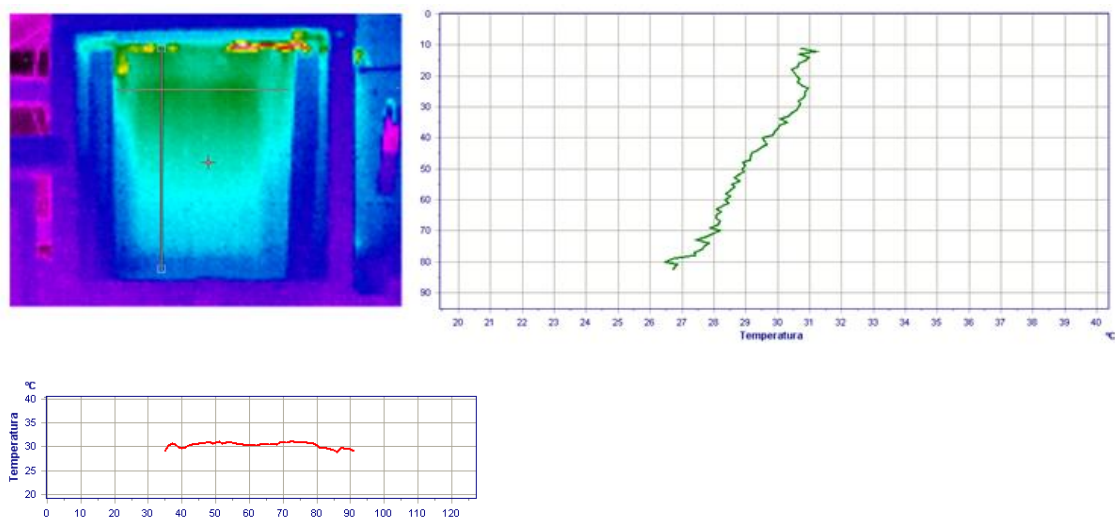


Figura A15: Perfil de temperaturas dado por la cámara térmica. Izquierda: perfil longitudinal.

Abajo: perfil transversal. ($t=1h$, $I=180A$)

Se utiliza el software Fluke Inside IR 4.0 para la adquisición y comparación de los datos obtenidos por la cámara.

Como se puede observar, existe un gradiente de temperatura en la dirección longitudinal de unos $4,7^{\circ}C$. Sin embargo, en la dirección transversal el gradiente es prácticamente nulo ($\sim 0,3^{\circ}C$), por lo se considerará despreciable, suponiendo la temperatura constante en esta dirección a cada altura desde la base.

Estos últimos resultados se utilizarán para comprobar la validez del modelo teórico utilizado para el cálculo y , en caso de discrepancia, para corregirlo, como se explicará más adelante.

Anexo 4: Cálculo de la Resistencia interna

Las fuentes de tensión, en este caso en forma de batería no son perfectas. Una fuente de tensión real está compuesta de una fuente de tensión ideal en serie con una resistencia interna. Esta resistencia interna es una resistencia deducida por el comportamiento de la batería, dando lugar a pérdidas en forma de calor y limitando la capacidad de descarga.

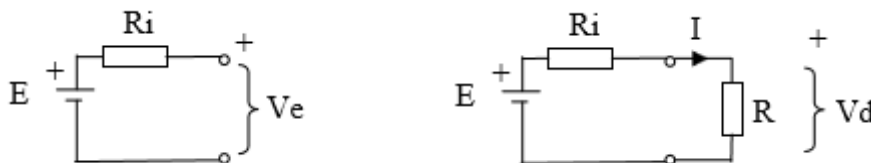


Figura A16: Circuito para la medición de la resistencia interna

La resistencia interna se obtiene realizando 3 pasos:

- Se mide la tensión en vacío V_e . En ausencia de corriente esta tensión será igual a la fuerza electromotriz de la batería, E.
- Se conecta una resistencia de potencia en bornes de la batería, con cable de gran sección y pequeña longitud, para que la resistencia del cableado no afecte a la medición.
- Se mide la tensión en bornes de la resistencia, V_d , y la corriente del circuito con carga, I.

La ecuación del circuito con la carga es la siguiente $V_e = V_d + R_i \cdot I$ (A5)

despejando la resistencia interna queda $R_i = \frac{V_e - V_d}{I}$ (A6)

Realización de la medida de resistencia interna.

Para la realización de la medida de resistencia interna se utilizó una batería SE180AHA024, dos cables de conexión con una sección de 70 mm² y dos resistencias de potencia conectadas en paralelo de 1 Ω cada una de ellas.

Siguiendo los pasos indicados anteriormente obtenemos: $V_e = 3,304$ V , $V_d = 3,284$ V, $I=6,612$ A Aplicando la ecuación A6, la resistencia interna de la batería SE180AHA024 es de 3,02 m Ω Este resultado puede utilizarse como un valor homogéneo para todas las baterías que conforman la batería de tracción.

Anexo 5: Determinación del modelo teórico del comportamiento de las baterías

Para determinar el modelo teórico del comportamiento de las baterías, en lo que a generación de calor y distribución de temperaturas se refiere se han utilizado tanto los datos de los proyectos anteriores como los de los experimentos realizados a lo largo de este proyecto.

En primer lugar se consideró que las baterías tenían una resistencia uniforme a lo largo de toda su estructura, con lo que se consideró la resistencia calculada en un proyecto anterior [5] (TRANSFORMACIÓN DE UN VEHÍCULO PROPULSADO POR UN MACI EN UN VEHÍCULO ELÉCTRICO DE ALTAS PRESTACIONES, por Iván Lozano Domínguez), cuyo cálculo se muestra en el Anexo 4. La resistencia interna de las baterías, con la que se calculan las pérdidas en forma de calor en la misma viene dada en la hoja de características de las baterías SE180AHA, sin embargo se decidió calcularla a través de métodos experimentales para obtener un modelo más aproximado del comportamiento real, obteniendo $R_{int} = 0,00302 \Omega$.

Tras aplicar el modelo propuesto al calentamiento de las baterías se observaron diferencias entre el calentamiento real y el calculado teóricamente ya que el calentamiento no seguía una distribución uniforme sino que pasaba de un valor mínimo en la parte más baja de la célula a un valor máximo en la zona de los bornes, como se explica en el Anexo 3.

Aplicando el modelo que considera una resistencia interna uniforme igual a $3,02\text{m}\Omega$, se observa que éste modela el calentamiento de la batería en la parte superior de la misma, como se muestra a continuación.

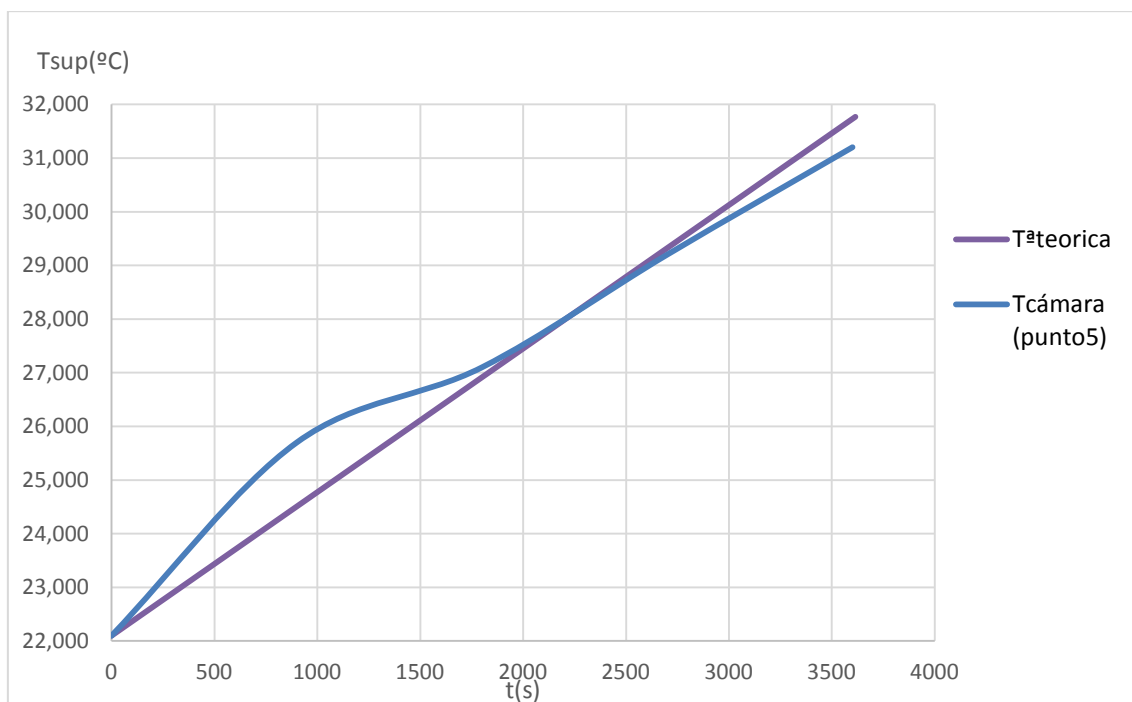


Figura A17: Evolución de la temperatura de la célula en la zona superior ($t=1\text{h}$, $I=100\text{A}$).

Siendo sin embargo la evolución del calentamiento en la parte inferior de la célula la que sigue:

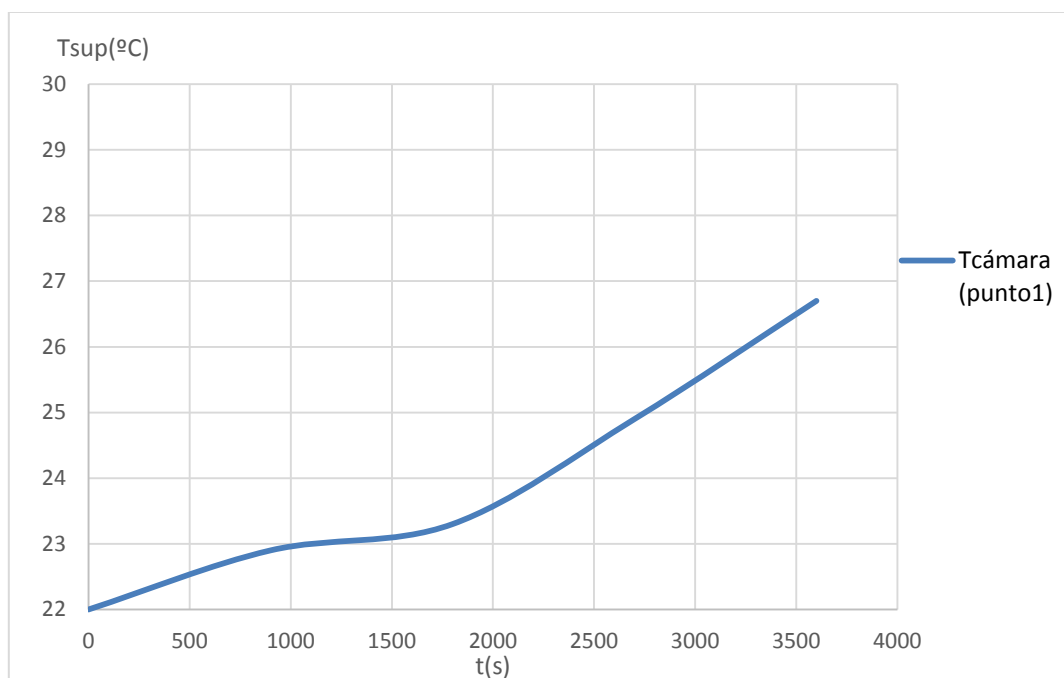


Figura A18: Evolución de la temperatura de la célula en la zona inferior (t=1h, I=100A).

Así pues, se deduce que la resistencia interna no puede ser uniforme a lo largo de la célula, y debe variar de un valor mínimo en la parte más baja hasta un valor máximo en la parte superior.

Para determinar la resistencia en la parte inferior se realizó de nuevo el cálculo de la resistencia interna en un experimento de descarga de la batería y se dedujo una resistencia cuyo efecto de calentamiento sobre la célula se ajustaría con una determinada distancia desde la zona más baja, realizando luego una interpolación lineal para determinar la variación de la resistencia.

En el experimento con la cámara termográfica se obtuvo un valor medio de la resistencia interna siguiendo el mismo procedimiento que en experimentos anteriores, obteniendo $R_{int_{media}} = 0,00158 \, \Omega$, definiéndose además 5 puntos de medición para comparar con los resultados teóricos.

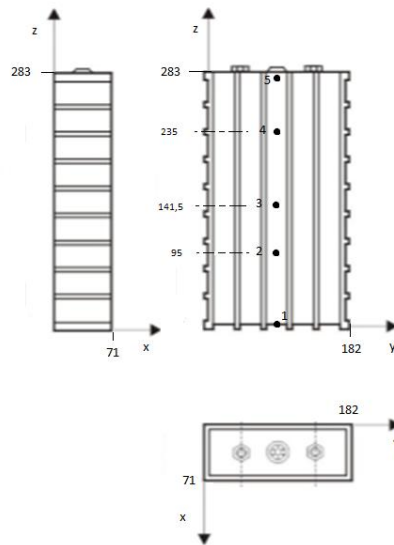


Figura A19: Puntos de toma de temperaturas.

Utilizando este valor se obtiene una distribución de temperaturas correspondiente a la zona más alejada de los bornes en la célula, con lo que se coge como valor más bajo de la resistencia interna, siendo el más alto el valor de 3,02 mΩ calculado en un primer momento.

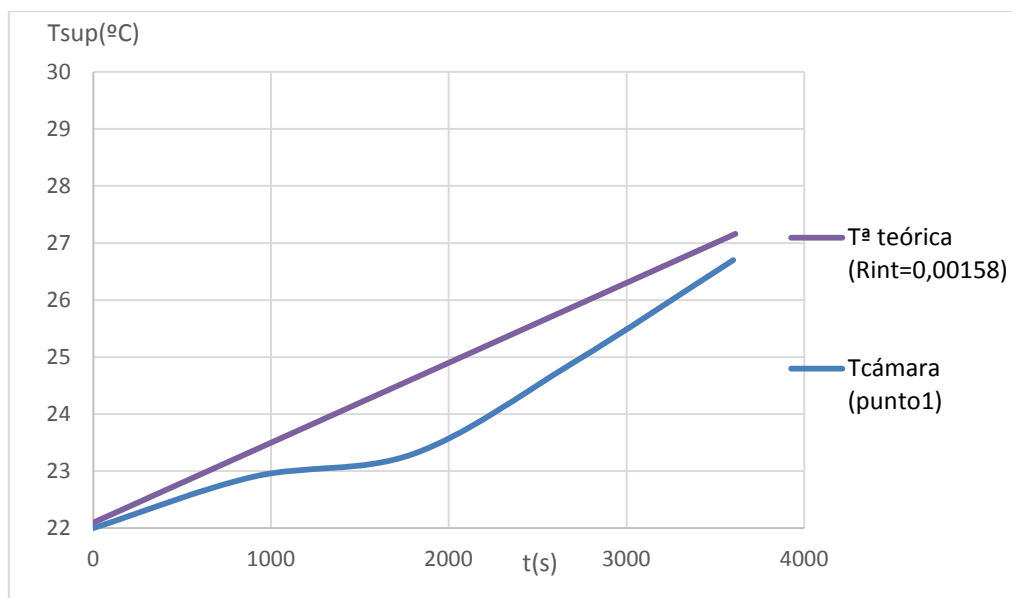


Figura A20: Comparación evolución de la temperatura de la célula en el punto 1 (t=1h, I=100A).

Por otro lado, se puede observar que a partir del punto 4, la temperatura alcanzada sigue un perfil aproximadamente constante (Figura A3.16).

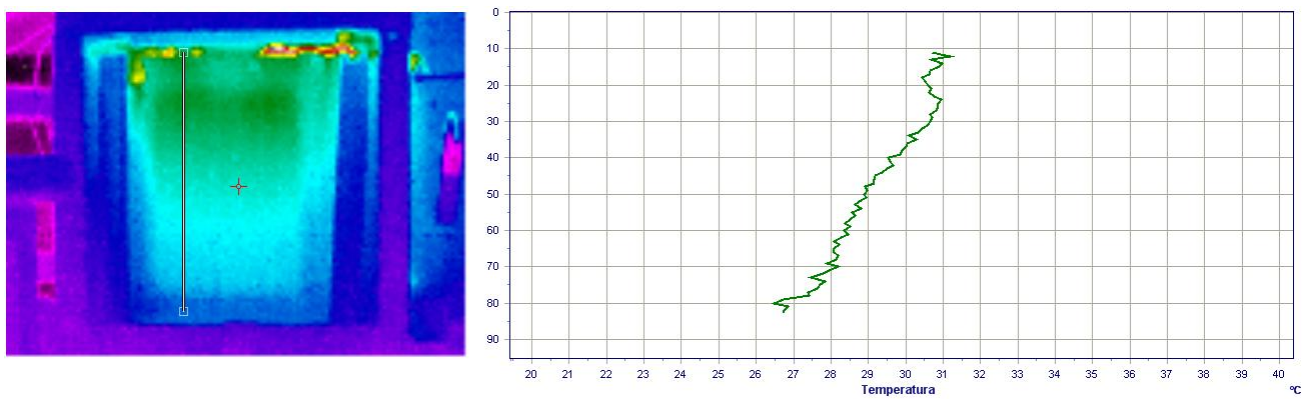


Figura A21: Perfil de temperaturas dado por la cámara térmica ($t=1h$, $I=180A$).

Así pues se considera para el modelo teórico una resistencia interna constante entre el punto 4 y el 5, obteniendo el modelo final presentado a continuación:

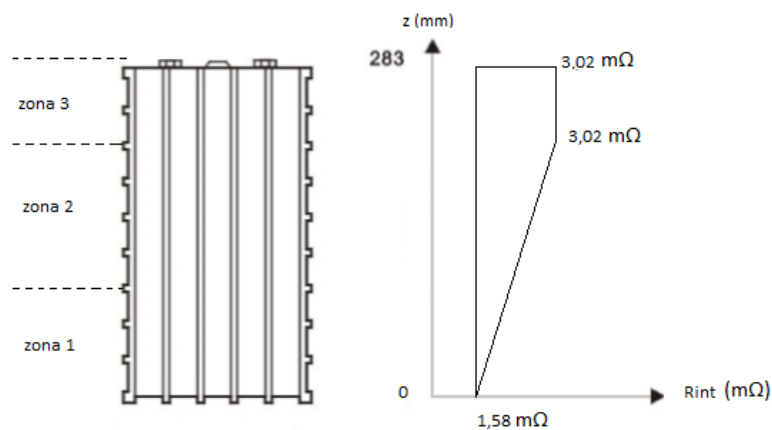


Figura A22: Modelo teórico de la célula electroquímica LFP.

y obteniendo el siguiente perfil de temperaturas en $t=60min$

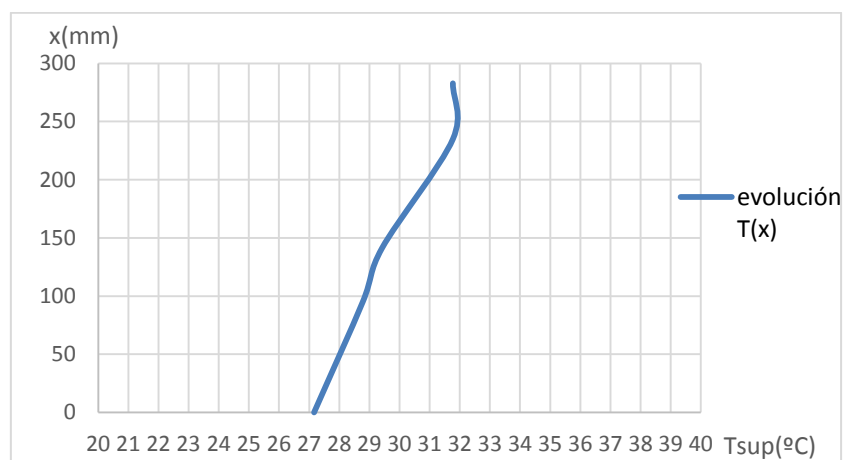


Figura A23: Perfil de temperaturas dado por los cálculos teóricos ($t=1h$, $I=180A$).

Anexo 6: Cálculo teórico del calor en las baterías

A6.1.Procedimiento teórico de cálculo para el caso de una célula individual:

- Geometría de la célula

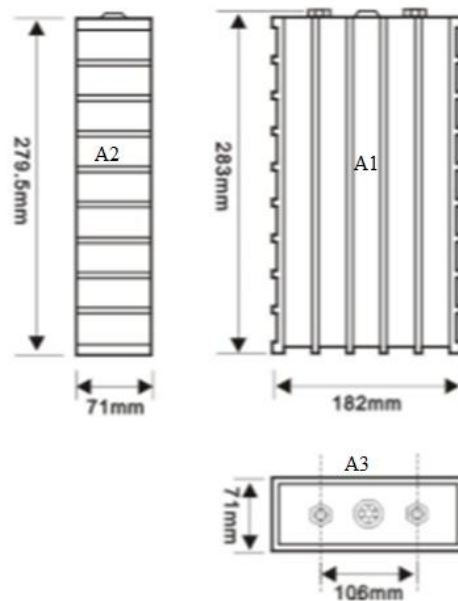


Figura A24: Características geométricas de una célula LFP.

- Datos para el cálculo:

Tabla A12: Datos para el cálculo teórico de la temperatura alcanzada por la célula.

C (Ah)	180
I (A)	180
t(s)	3600
m (kg)	5,6
A1 (m^2)	0,050869
A2 (m^2)	0,019809
A3 (m^2)	0,012922
Rint (Ω)	0,00302
Ti ($^{\circ}\text{C}$)	20
h ($\text{W}/m^2 K$)	8
Cp ($\text{J}/\text{kg} \cdot K$)	2430

- Cálculos:

1. Cantidad de energía generada en el interior del sólido de $t=0$ a $t=t$:

$$W(J) = mC_p (T_1(t) - T_i) = R.I^2.t \quad (A7)$$

$$T_1(t) = \frac{W}{mC_p} + T_i = \frac{RI^2t}{mC_p} + T_i \quad (A8)$$

Esta es la temperatura que alcanza el sólido al desprender una cierta cantidad de energía dada por W.

siendo T_i la temperatura inicial de la célula en $^{\circ}C$

R la resistencia interna de la batería, variable en función de la distancia a los bornes, en Ω , la cual al disponer de un mayor número de baterías debe multiplicarse por este ($R_{total} = n_{bat} \cdot R$)

I la intensidad que circula por la batería, ya sea en carga o en descarga, que depende del régimen al que esté funcionando el motor, en amperios (A)

C_p la capacidad calorífica de la célula, calculada en el Anexo 3 e igual a $2006,34 \frac{J}{kg.K}$

m como masa de las baterías que componen el grupo, e igual a $5,6 \times n_{baterías}$, en kg

y t , tiempo de paso de la corriente eléctrica, en segundos.

Por ejemplo, para el caso del grupo 3 de baterías, funcionando durante una hora a 180 A, con una temperatura inicial de 45°C, el cálculo queda como sigue;

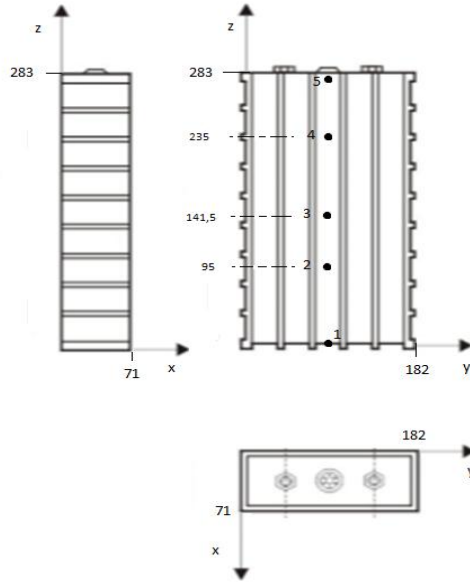


Figura A24: Definición puntos cálculo temperaturas.

$$T_{punto1}(t) = \frac{64 \times 0,00158 \times 180^2}{64 \times 5,6 \times 2006,34} 3600 + 45 \approx 61,4^\circ C$$

$$T_{punto2}(t) = \frac{64 \times 0,00208 \times 180^2}{64 \times 5,6 \times 2006,34} 3600 + 45 \approx 66,6^\circ C$$

$$T_{punto3}(t) = \frac{64 \times 0,00235 \times 180^2}{64 \times 5,6 \times 2006,34} 3600 + 45 \approx 69,4^\circ C$$

$$T_{punto4}(t) = \frac{64 \times 0,00302 \times 180^2}{64 \times 5,6 \times 2006,34} 3600 + 45 \approx 76,35^\circ C$$

$$T_{punto5}(t) = \frac{64 \times 0,00302 \times 180^2}{64 \times 5,6 \times 2006,34} 3600 + 45 \approx 76,35^\circ C$$

2. Ritmo y cantidad de calor evacuado por el entorno en un tiempo t:

(transferencia de calor desde el cuerpo en ∂t) = (decremento de energía del cuerpo en ∂t)

$$Q(W) = h(T_s - T_a)A_p = R.I^2 \quad (A9)$$

$$W(J) = mC_p \partial T = R.I^2.t \quad (A10)$$

$$h(T_s - T_a)A_p \partial t = mC_p \partial T \quad (A11)$$

$$-\frac{hA_p \partial t}{\rho V C_p} = \frac{\partial(T - T_\infty)}{(T - T_\infty)} \quad (\text{A12})$$

$$\text{con } m = \rho V$$

$$\ln \frac{(T(t) - T_\infty)}{(T_i - T_\infty)} = -\frac{hA_p}{\rho V C_p} t \quad (\text{A13})$$

$$\frac{(T(t) - T_\infty)}{(T_i - T_\infty)} = e^{-\frac{hA_p}{\rho V C_p} t} \quad (\text{A14})$$

$$T(t) = T_\infty + (T_i - T_\infty) e^{-\frac{hA_p}{\rho V C_p} t} \quad (\text{A15})$$

$$\text{con } T_i = T_{\text{puntoN}}(t) \text{ y } T_\infty = T_{\text{amb}}$$

obtenemos:

$$T(t) = T_{\text{amb}} + (T_{\text{puntoN}}(t) - T_{\text{amb}}) e^{-\frac{hA_p}{\rho V C_p} t} \quad (\text{A16})$$

$T(t)$ nos da la temperatura a la que se encuentra el sólido de volumen $V(m^3)$ y densidad $\rho(kg/m^3)$, al verse refrigerado en su superficie $A_p(m^2)$ por un fluido exterior con un coeficiente de convección determinado, $h(W/m^2 K)$, que se tomará como un coeficiente de convección natural, $h = 8 W/m^2 K$ [7], [12].

Sin embargo, se necesita hacer una corrección de la temperatura del aire que rodea el conjunto de las baterías, ya que esta aumentará al aumentar la temperatura de las baterías.

Calculamos la transferencia de calor entre el sólido y el aire aplicando el método de diferencias finitas (MDF) en su forma explícita al espacio entre la superficie del conjunto de baterías y el cajón que las contiene.

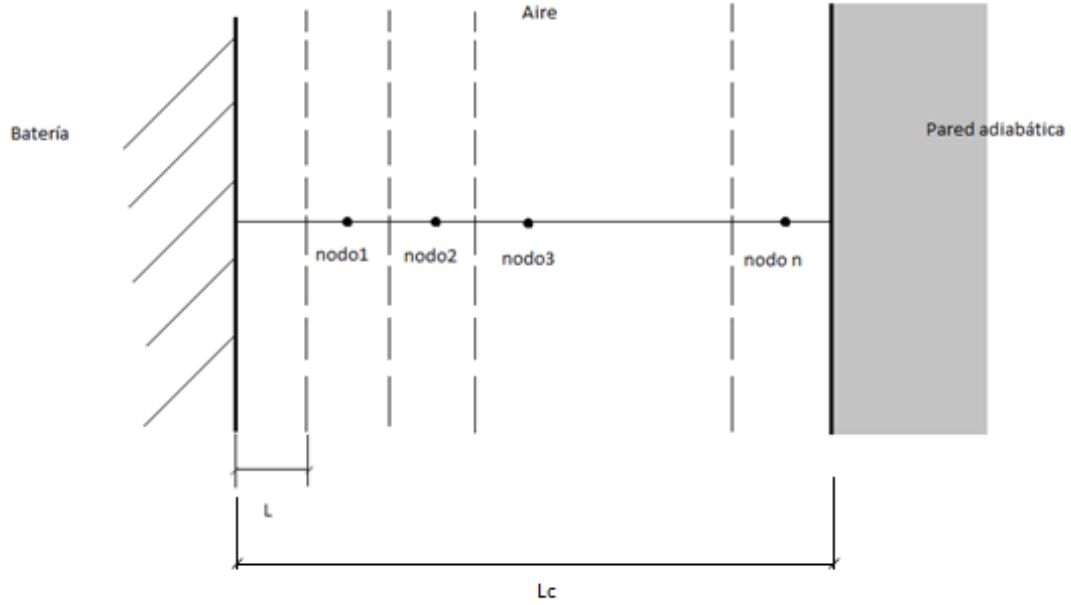


Figura A25: Discretización sistema unidimensional para el método MDF.

$$T_i^{p+1} = Fo(T_{i-1}^p + T_{i+1}^p) + (1 - 2Fo)T_i^p \quad (A17)$$

con

$Fo = \frac{a \cdot \Delta t}{L_c^2}$, número de Fourier, número adimensional que caracteriza la conducción de calor, y correspondiente a la relación entre la velocidad de la conducción de calor y la velocidad del almacenamiento de energía;

L_c , longitud característica definida por la distancia entre la superficie de las batería y la pared de cada uno de los cofres;

$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$, difusividad térmica, calculada como la conductividad térmica del aire, su densidad y su capacidad calorífica a la temperatura del aire.

Conociéndose las condiciones iniciales (temperaturas en todos los nodos para $t=0$), se puede calcular directamente la temperatura de cualquier nodo en cualquier instante.

Para que la solución no oscile, Fo (número de Fourier) debe cumplir;

$$Fo < \frac{1}{2} \Rightarrow \Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2}{a}$$

Sustituyendo las propiedades del aire y aplicando el volumen y el área de cada contenedor de baterías, la ecuación en diferencias finitas resultaría finalmente:

$$T_i^{p+1} = \frac{1}{2}(T_{i-1}^p + T_{i+1}^p) \quad (A18)$$

como condición de contorno adicional, debido a que la pared de la derecha es adiabática, se incluye que la temperatura en el nodo n en el instante t es igual a la temperatura en el nodo n-1 en el instante t-1 : $T_n^t = T_{n-1}^{t-1}$

A continuación se realizará un promedio de la temperatura en esta sección y se utilizará como temperatura ambiente para el cálculo del enfriamiento por convección de la batería o grupo de baterías.

Se muestra el ejemplo para el caso mostrado anteriormente:

con n=3 y tomando los valores de las propiedades del aire constantes a una temperatura media de $T_i = 50^\circ C$

$$L_c = 0,022m$$

$$a = \frac{\lambda(50^\circ)}{\rho(50^\circ)C_p(50^\circ)} = 25,92 \times 10^{-6} m^2 / s$$

$$Fo = \frac{a \cdot \Delta t}{L_c^2} = 0,5 \rightarrow \Delta t = 2,334s$$

El método de diferencias finitas aplicado al espacio entre las baterías y la pared del cofre da los siguientes valores:

Tabla A13: Valores de la temperatura del aire con el método de diferencias finitas.

p	t (s)	nodo 0	nodo 1	nodo 2	Tmedia=Taíre
0	0	45	45	45	45
1	2,334	45,020	45,000	45,000	45,007
2	4,668	45,041	45,010	45,000	45,017
3	7,002	45,061	45,020	45,010	45,030
4	9,336	45,081	45,036	45,020	45,046
5	11,671	45,102	45,051	45,036	45,063
...
1539	3592,188	76,284	76,223	76,202	76,236
1540	3594,522	76,304	76,243	76,223	76,257
1541	3596,856	76,324	76,263	76,243	76,277
1542	3599,190	76,345	76,284	76,263	76,297
1543	3601,524	76,365	76,304	76,284	76,318

Y con esto , se calcula la temperatura de cada zona, por ejemplo para la zona 5;

$$T_5(t) = T_{amb} + (T_{punto5}(t) - T_{amb})e^{-\frac{hA_p}{\rho VC_p}t}$$

$$T_5(t) = 76,318 + (76,365 - 76,318)e^{-\frac{8 \times 2,69}{5,6 \times 2006,34}t} = 76,36013^\circ C$$

Se calcula cuánto afecta la temperatura del aire circundante con dicho coeficiente de convección natural :

$$\Delta T = 76,365 - 76,36013 = 0,00487^\circ C \rightarrow 0,0064\%$$

Se deduce que el efecto del enfriamiento por el aire es completamente despreciable, ya que este sigue casi la misma evolución en su temperatura que las baterías, debido a la estrechez de los huecos presentes en el cofre. Así pues, de aquí en adelante, para la convección natural se podrá despreciar la transferencia de calor por convección.

A6.2. Cálculo de la contribución de la radiación.

Como todo cuerpo a una temperatura por encima del cero absoluto, el conjunto de baterías emite cierta cantidad de calor a través de su superficie en forma de radiación.

El cálculo del calor liberado por radiación se realiza mediante la ley de Stefan-Boltzmann :

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A T_s^4 \quad (A19)$$

con

ε , emisividad de la carcasa de las baterías, correspondiente a la media para el plástico, obtenida de la tabla A14.

σ , constante de Stefan-Boltzmann, e igual a $5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$

A , área exterior del conjunto de baterías en m^2

T_s , temperatura superficial máxima (K)

Tabla A14: Valores de la emisividad de diferentes materiales.

Material	Emisividad (ϵ)
Cuerpo negro	1
Piel humana	0.98
Agua	0.98
Amianto	0.95
Cerámica	0.95
Barro	0.95
Cemento	0.95
Tejido	0.95
Grava	0.95
Papel	0.95
Plástico	0.95
Goma	0.95
Madera	0.95
Cobre (oxidado)	0.68
Acero inoxidable	0.1
Cobre (pulido)	0.02
Aluminio (pulido)	0.05

Calculando el calor para el grupo de baterías nº 3 en las condiciones del apartado anterior, y tomando la temperatura media obtenemos:

$$Q_{rad} = 0,95 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 2,69 \times 70,58^4$$

$$Q_{rad} = 3,60W$$

Se calcula la contribución de la radiación como

$$(\%Q_{rad}) = \frac{Q_{rad}}{Q_{Rint\ media} + Q_{rad}} \times 100 = \frac{3,60}{77,69 + 3,60} \times 100 = 4,43\% \quad (A20)$$

Siendo $(\%Q_{rad}) < 5\%$ podemos considerar que su contribución es despreciable, y los cálculos del calor liberado por el sólido se realizarán sin tener en cuenta la radiación.

A6.3. Resultados para cada uno de los grupos de baterías.

Se muestra en los siguientes gráficos la evolución de la temperatura, a una intensidad dada, durante el periodo de carga o descarga correspondiente. Se toma como valor inicial de temperatura $T_i = 45^\circ C$.

Además, se muestran los valores límites indicados en la hoja de características de la batería.

A6.3.a). GRUPO1.

- 16 A, 40500 s :

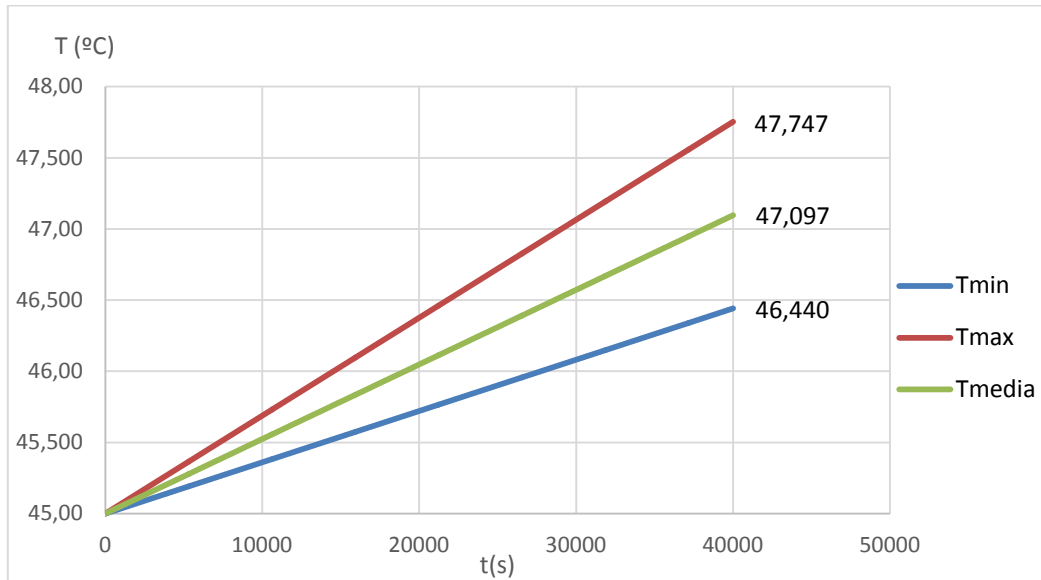


Figura A26: Evolución de la temperatura de las del baterías grupo 1 (t=40500s, I=16A)

- 54 A, 10800 s :

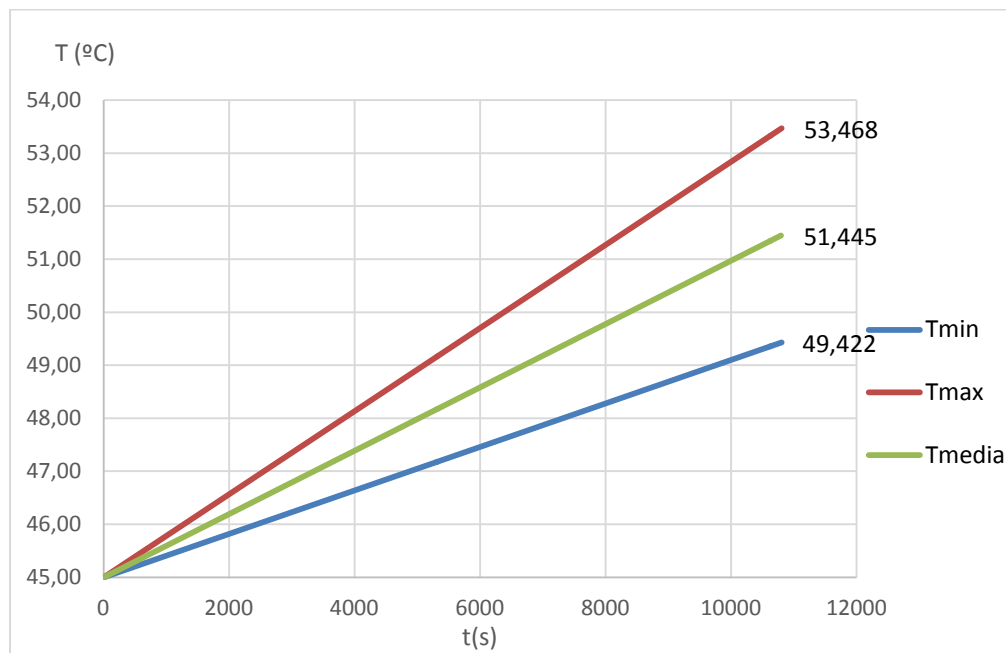


Figura A27: Evolución de la temperatura de las del baterías grupo 1 (t=10800s, I=54A)

- 100 A, 6480 s :

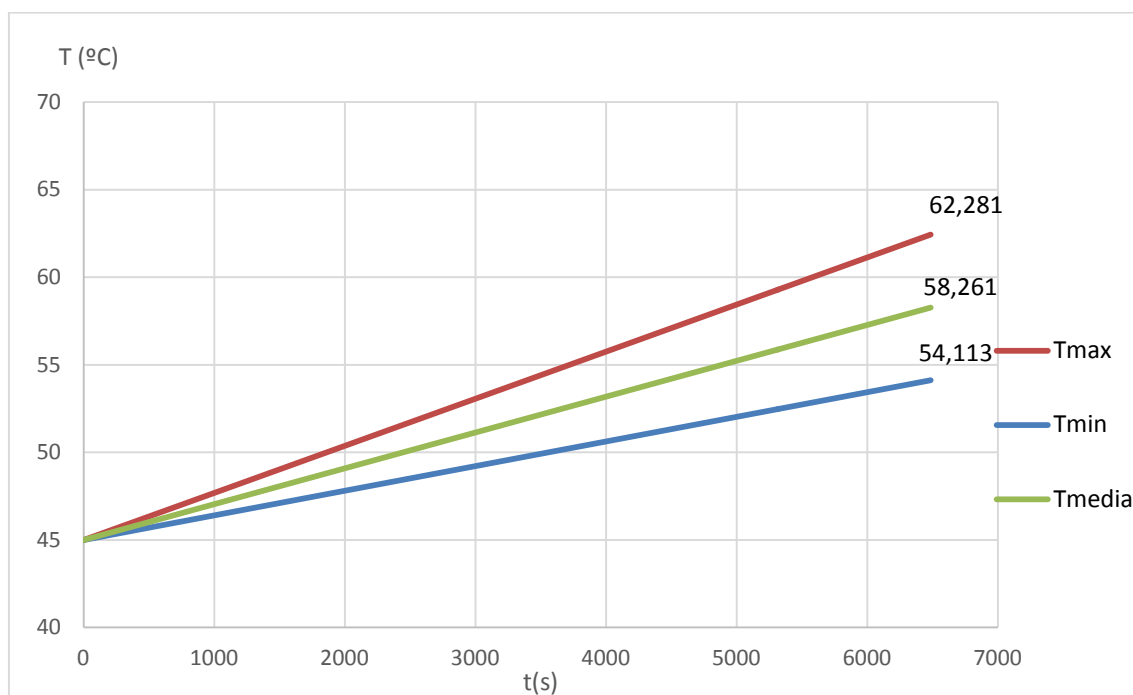


Figura A28: Evolución de la temperatura de las del baterías grupo 1 (t=6480s, I=100A)

- 180 A, 3600 s :

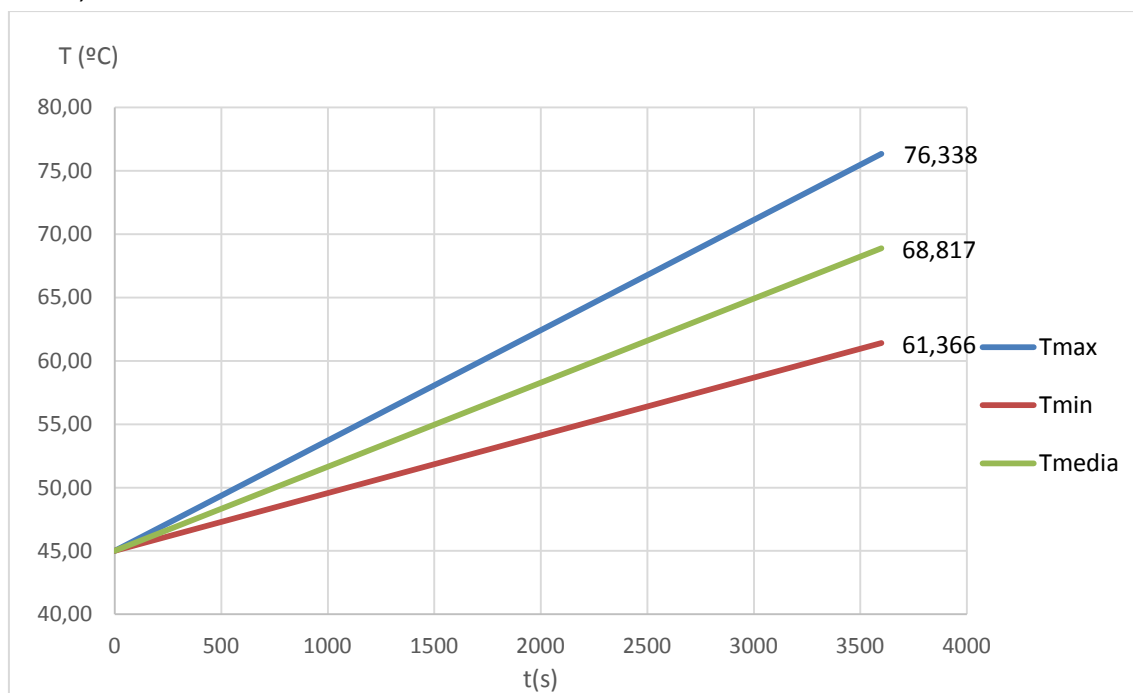


Figura A29: Evolución de la temperatura de las del baterías grupo 1 (t=3600s, I=180A)

- 180+500 A; 3600s

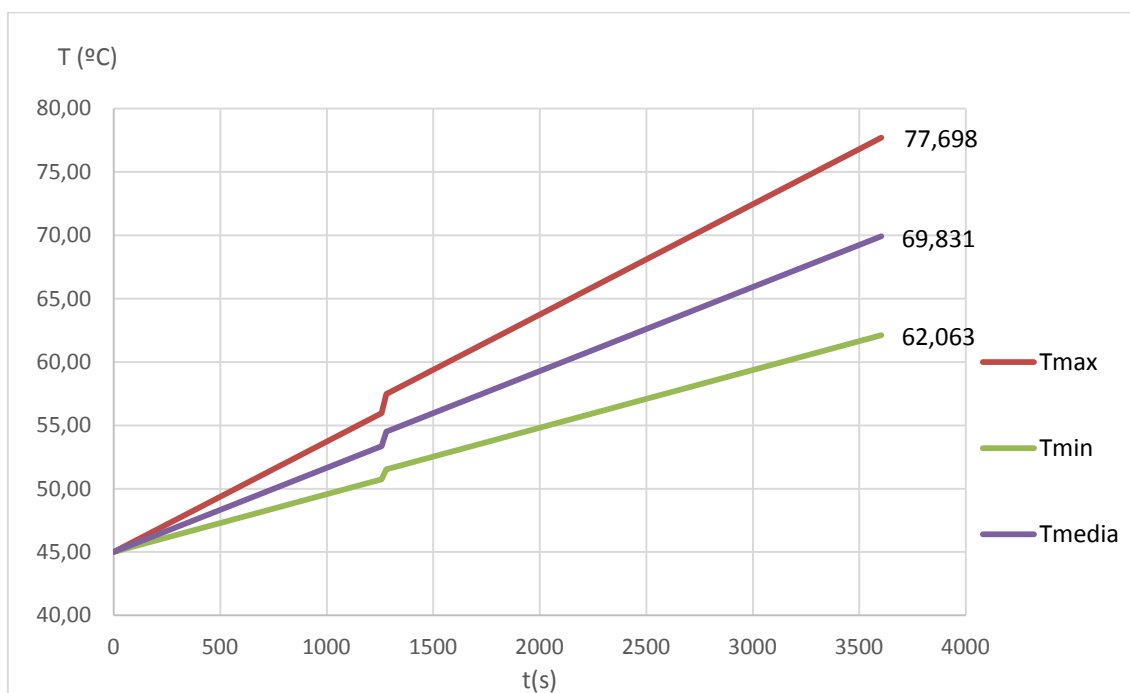


Figura A30: Evolución de la temperatura de las del baterías grupo 1 (t=3580s, I=180A, + t=20s, I=500A)

A6.3.b). GRUPO2.

- 16 A, 40500 s :

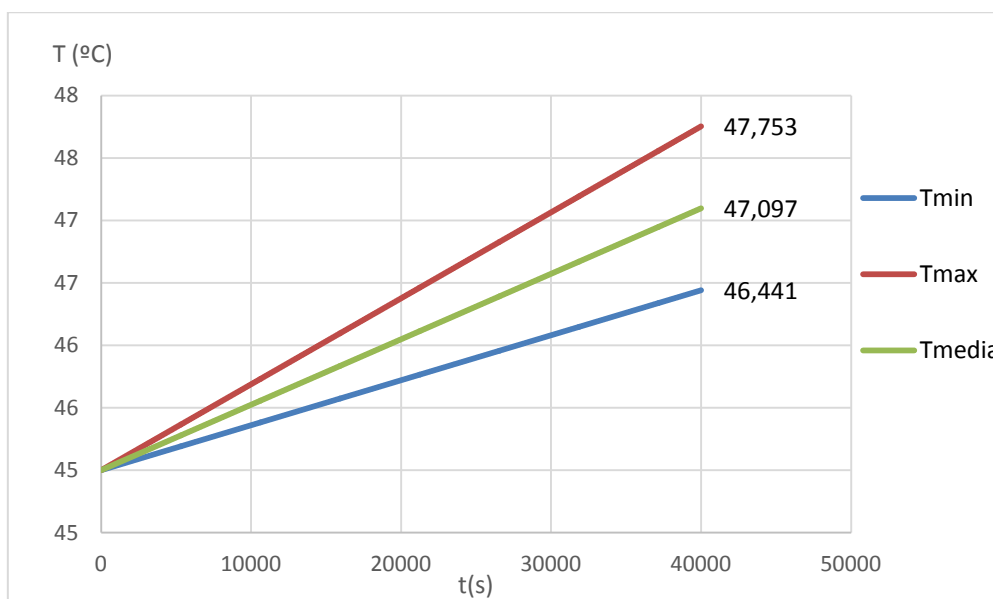


Figura A31: Evolución de la temperatura de las del baterías grupo 2 (t=40500s, I=16A)

- 54 A, 10800 s :

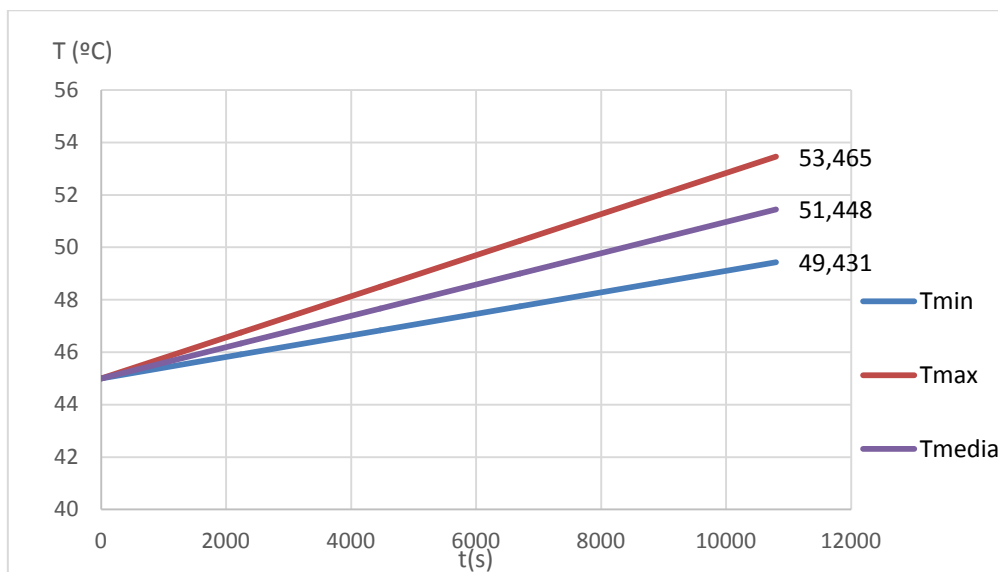


Figura A32: Evolución de la temperatura de las del baterías grupo 2 (t=10800s, I=54A)

- 100 A, 6480 s :

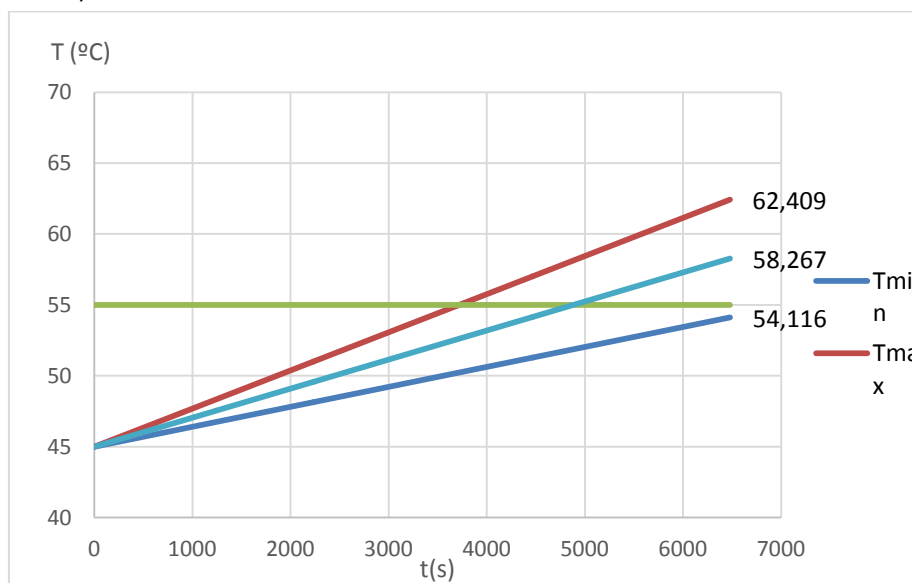


Figura A33: Evolución de la temperatura de las del baterías grupo 2 (t=6480s, I=100A)

- 180 A, 3600 s :

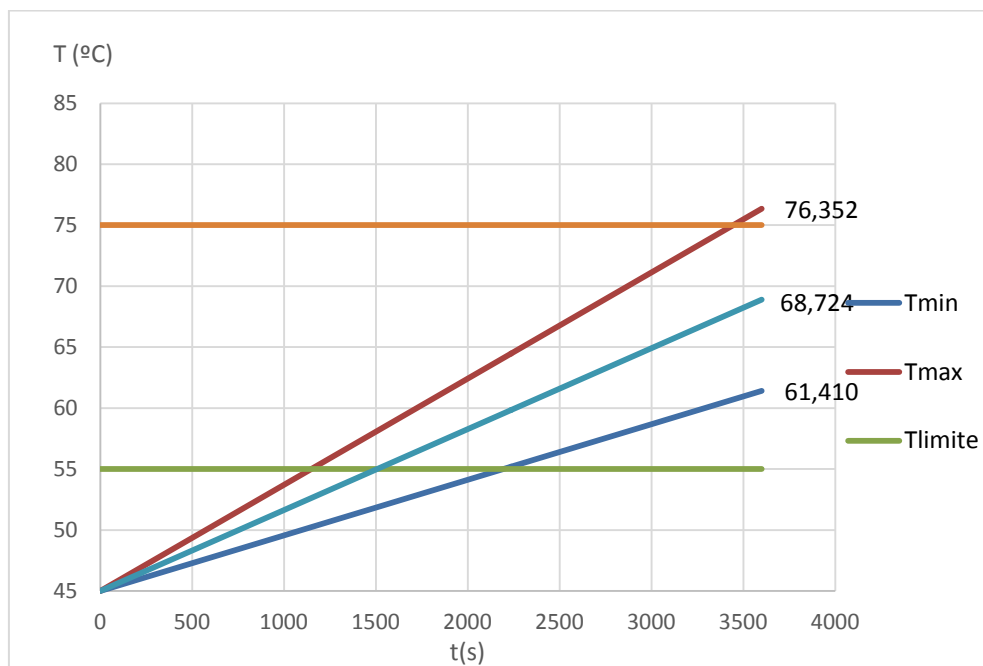


Figura A34: Evolución de la temperatura de las del baterías grupo 2 (t=3600s, I=180A)

- 180+500A A, 3600 s :

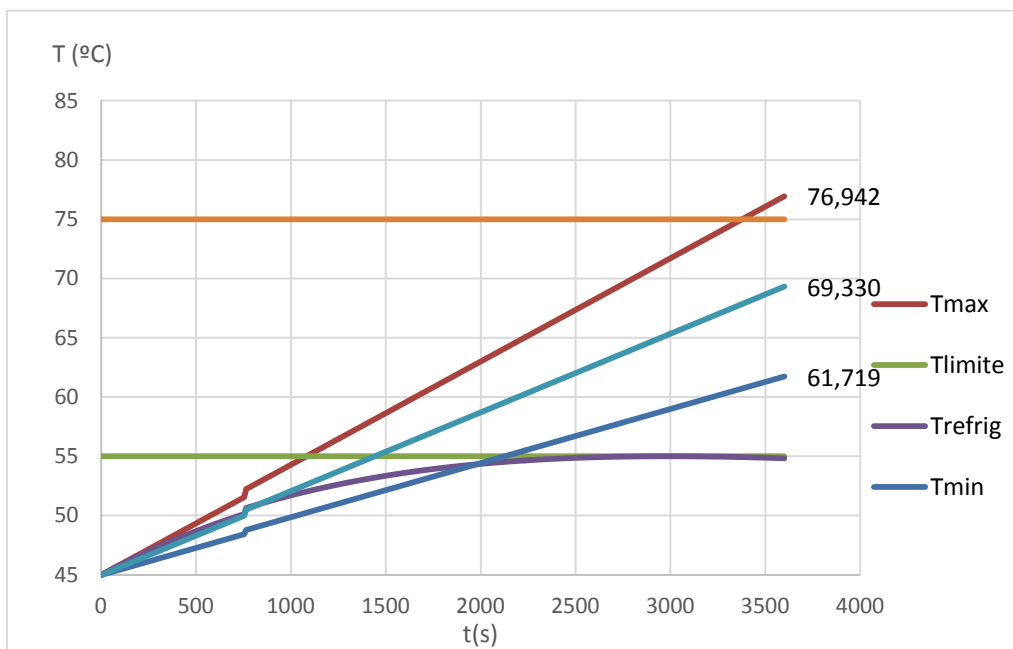


Figura A35: Evolución de la temperatura de las del baterías grupo 2 (t=3580s, I=180A, + t=20s, I=500A)

A6.3.c). GRUPO3.

- 54 + 500 A, 10800s

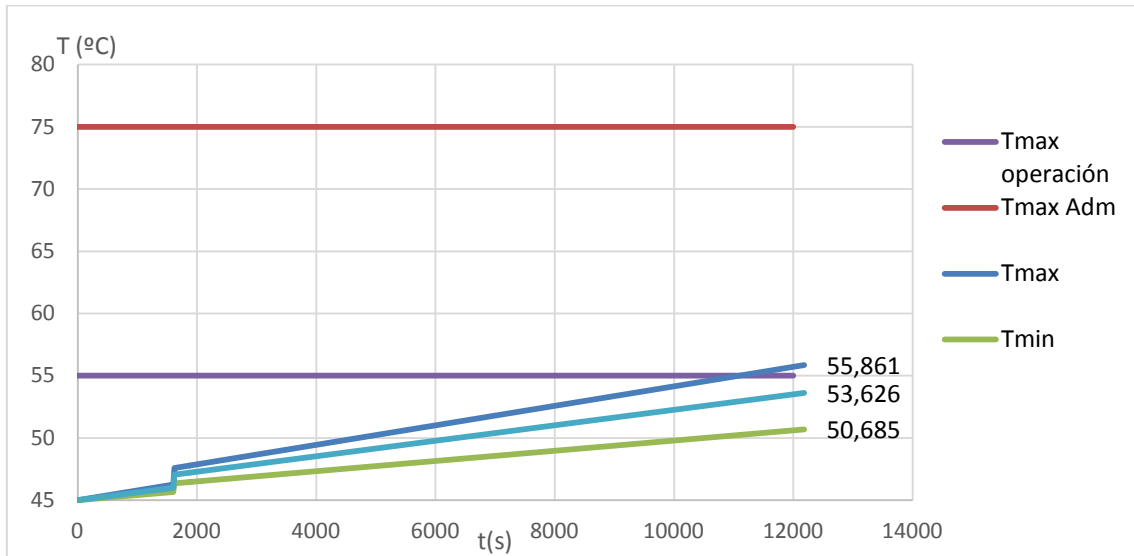


Figura A36: Evolución de la temperatura de las del baterías grupo 23(t=10800s, I=54A)

- 180+500A, 3600s

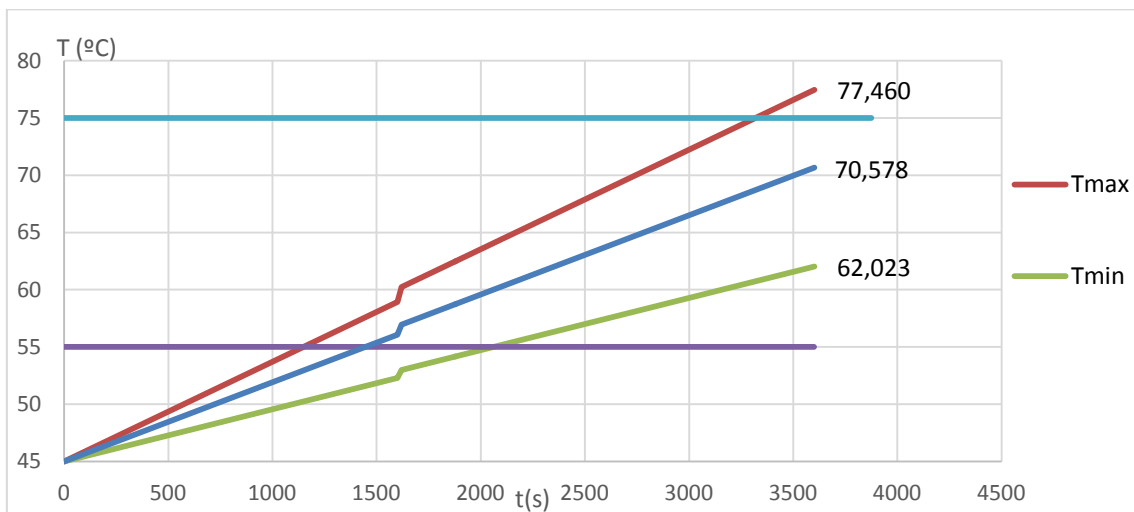


Figura A37: Evolución de la temperatura de las del baterías grupo 3 (t=3580s, I=180A, + t=20s, I=500A)

A6.4. Resumen de resultados:

Tabla A15: Temperatura máxima alcanzada por cada grupo de baterías en las diferentes condiciones de operación

Tª máxima	Caso 1 (16A)	caso 2 (54 A)	caso 3 (100A)	caso 4 (180A)	caso 5 (180+500A)
Grupo 1	47,7515	53,4688	62,281	76,338	76,94866
Grupo 2	47,7515	53,4647	62,409	76,3524	76,9328
Grupo 3	47,7776	55,8606	62,3276	76,3638	77,4604

Anexo 7: Coeficiente h en convección forzada para cada grupo

A7.1.Cálculo teórico del coeficiente de convección forzada.

Como se ha indicado en anexos anteriores, la temperatura máxima recomendada a la que debería verse sometida cada una de las baterías (y por lo tanto, el conjunto), es de 55°C, la máxima admisible de 75°C, por lo que en ningún caso deberá sobrepasar este último valor, intentando que se acerque lo más posible al primero.

Para el cálculo del coeficiente de convección, se supondrá que se disponen de todas las superficies de cada conjunto de baterías salvo la inferior, por lo tanto las áreas de transferencia de calor por convección serán en cada caso

$$A_{conv} = A_{total} - A_{inferior} \quad (A21)$$

siendo cada una;

$$A_{convG1} = 0,878 \text{ m}^2$$

$$A_{convG2} = 0,513 \text{ m}^2$$

$$A_{convG3} = 1,869 \text{ m}^2$$

El cálculo del coeficiente de convección se realizará a partir de la temperatura media alcanzada por cada uno de los grupos de baterías en la situación más desfavorable (180A, 1 hora). Se utilizará aire a la temperatura ambiente máxima como fluido refrigerante (45°C)

Refrigeración del conjunto debida a la circulación del aire:

$$h(T_s - T_a)A_c \partial t = mC_p \partial T \quad (A22)$$

$$\ln \frac{(T(t) - T_\infty)}{(T_i - T_\infty)} = - \frac{hA_c}{\rho VC_p} t \quad (A23)$$

con $T_i = T_1(t)$; $T_\infty = T_{amb}$ y $T(t) = T_{\max_{admisible}}$ si $T(t) > T_{\max_{admisible}}$

obtenemos:

$$h = - \ln \frac{(T_{\max_{adm}} - T_{amb})}{(T_1(t) - T_{amb})} \cdot \frac{\rho VC_p}{A_c t} \quad (A24)$$

Tabla A16: Temperatura media y coeficientes de convección.

	Tmedia (°C)	h (W/m ² K)
Grupo 1	70,832	53,921
Grupo 2	70,832	51,944
Grupo 3	70,656	100,647

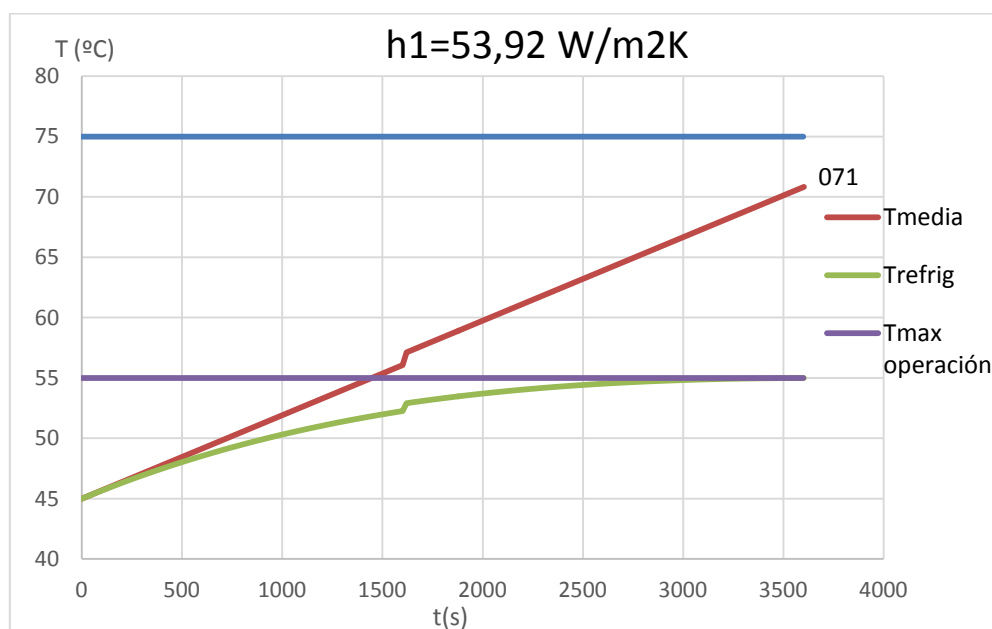


Figura A38: Evolución de la temperatura en el grupo 1 con refrigeración.

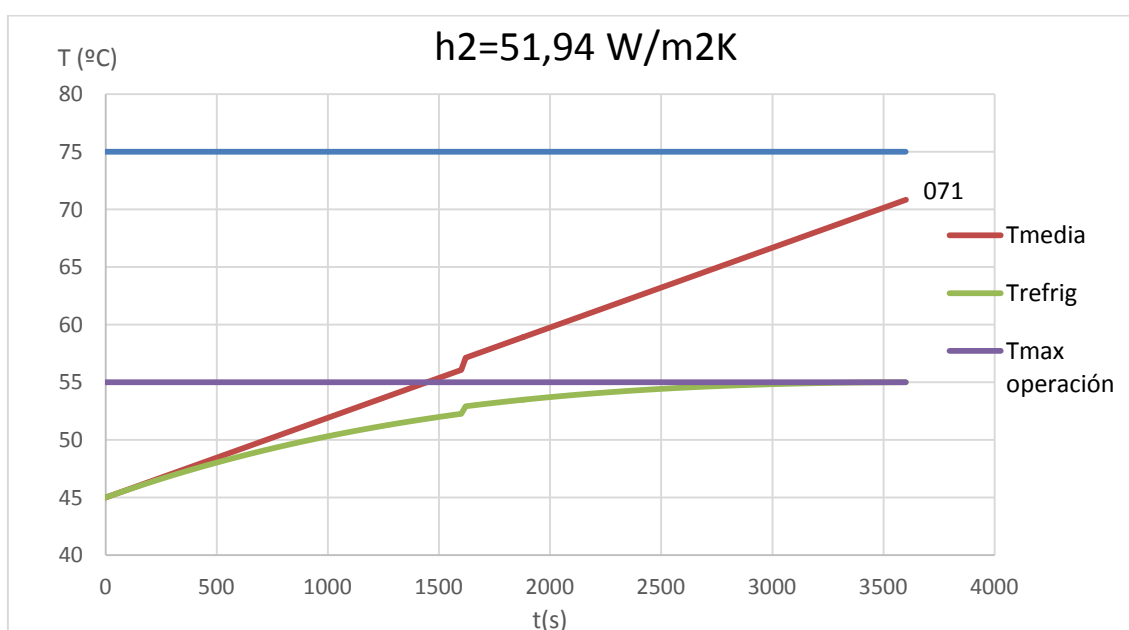


Figura A39: Evolución de la temperatura en el grupo 2 con refrigeración.

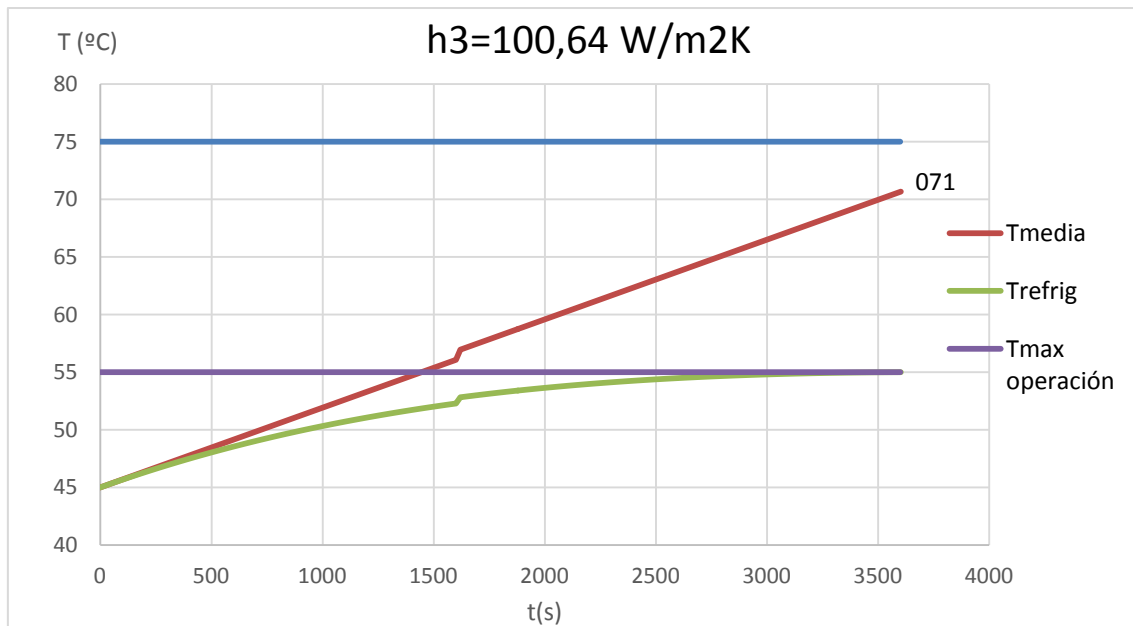


Figura A40: Evolución de la temperatura en el grupo 3 con refrigeración.

A7.2. Refrigeración de los grupos de baterías.

Los coeficientes de convección se han calculado suponiendo que se pueda instalar el sistema de refrigeración óptimo para cada caso. Este será un sistema con el que se pueda hacer circular el aire a temperatura ambiente alrededor de toda la superficie disponible de cada grupo de baterías.

Se describe a continuación la disposición de los ventiladores/extractores y se muestran las ecuaciones necesarias para el cálculo, sin llegar a realizarlo ya que esto se encuentra fuera del alcance del presente proyecto.

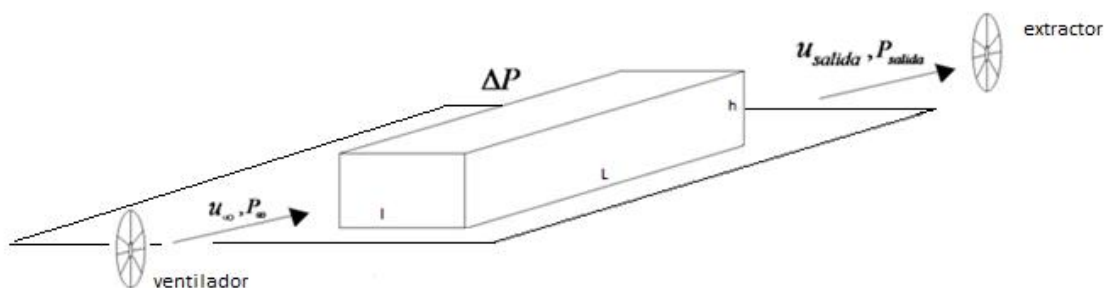


Figura A41: Esquema de refrigeración de los grupos 1 y 2

A7.3. Procedimiento de cálculo del sistema

1. Cálculo del número de Nusselt como

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}D}{\lambda} \quad (A25)$$

siendo D la longitud característica del objeto.

2. Cálculo del número de Reynolds a través de una de las correlaciones para objetos en flujo cruzado(se recomienda la correlación de Hilpert:

$$\bar{Nu} = C \cdot \text{Re}_D^m \cdot \text{Pr}^{1/3} \quad (A26)$$

con C y m de la Tabla A4.2.

3. Se calcula la velocidad del aire necesaria como

$$u_\infty = \frac{\text{Re} \cdot \nu}{L} \quad (A27)$$

4. Se calcula la fuerza de arrastre como

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_{\text{aire}} u_\infty^2 A_D \quad (A28)$$

con C_D coeficiente de sustentación, a obtener experimentalmente.

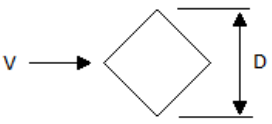
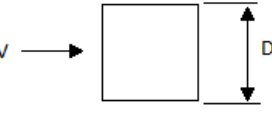
5. Las pérdidas de presión serán

$$\Delta P = F_D \cdot A_D \quad (A29)$$

6. Y por último se obtiene la potencia de los ventiladores necesarios como

$$W_{\text{ventilador}} = \Delta P \cdot Q \text{ siendo } Q = u_\infty \cdot A_{\text{vent}} \quad (A30)$$

Tabla A17: Constantes de la correlación (A26) para flujo cruzado sobre cuerpos no circulares.

Geometría	Rango de validez del Re	C	m
	2500-7500	0,261	0,624
	5000-1E5	0,222	0,588
	2500-8000	0,16	0,699
	5000-1E5	0,092	0,675

Anexo 8: Cálculo del coeficiente de convección para el Grupo 3.

A8.1. Perfil de temperaturas.

En primer lugar se muestran los perfiles de temperatura en los casos límite.

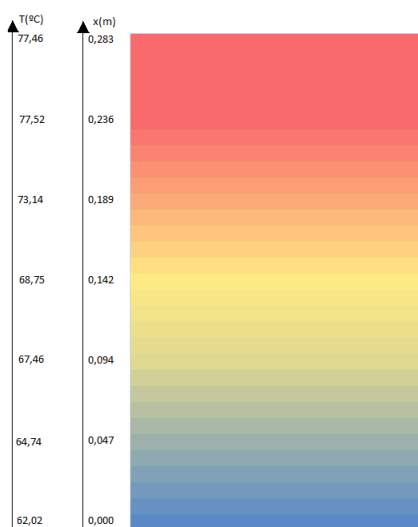


Figura A42: Perfil de temperaturas de una célula LFP para $t=1h$, $I=180 A$.

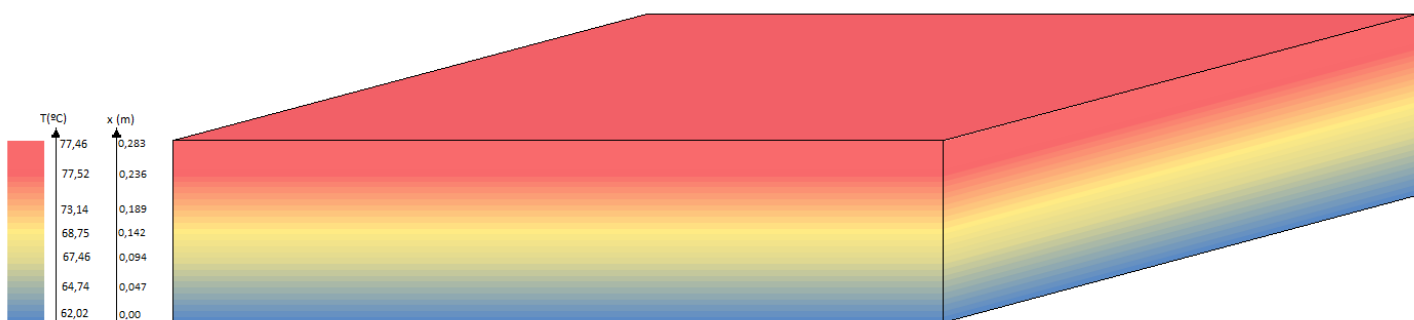


Figura A43: Perfil de temperaturas del grupo 3 para $t=1h$, $I=180 A$.

Dado que la geometría de los cofres limita las posibles disposiciones del sistema de refrigeración, se ha optado por la solución más sencilla, que consistirá en refrigerar

únicamente la parte superior del grupo de baterías. Se calcularán diversas formas de refrigerar dicha superficie, con las que deberán cumplirse dos criterios fundamentales:

1. La temperatura de la superficie refrigerada deberá ser en todo caso inferior o igual a la temperatura máxima recomendada en la hoja de características (55°C).
2. La temperatura máxima en cualquier del conjunto de baterías deberá ser siempre inferior a la temperatura máxima admisible (75°C).

A8.2. Cálculo del coeficiente h.

Ya que sólo se refrigerará la parte superior del grupo, el sistema de refrigeración se instalará de tal forma que una corriente de fluido evacúe el calor de dicha superficie evitando que la misma alcance una temperatura mayor a 55°C. Las condiciones de la refrigeración vendrán fijadas con anterioridad y serán las siguientes:

1. Método: convección
2. Fluido: aire
3. Temperatura: 45°C

Para que la temperatura se mantenga en la superficie será necesario un determinado coeficiente de convección que se calculará de la siguiente manera:

Se planteará el problema como una superficie modelada como una placa de pequeño espesor y determinada superficie (la correspondiente a la superficie superior del grupo de baterías)) con un flujo de calor uniforme (placa isoflujo), correspondiente a la cantidad de calor evacuada en esa superficie.

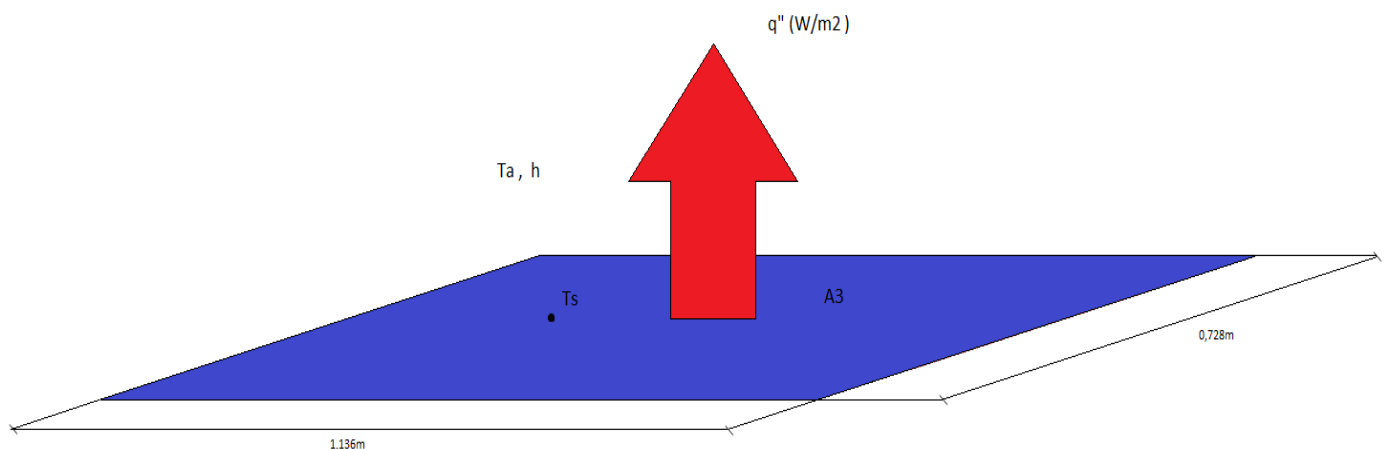


Figura A44: Flujo de calor sobre la superficie del grupo 3 de baterías.

Cálculo del flujo de calor:

Dimensiones:

$$L = 1,136m \quad A_1 = l * h = 0,203476m^2$$

$$l = 0,728m \quad A_2 = L * h = 0,317512m^2$$

$$h = 0,283m \quad A_3 = L * l = 0,827008m^2$$

$$A_{total} = 2 * (A_1 + A_2 + A_3) = 2,695992m^2$$

$$V = A * h = 0,23114874m^3$$

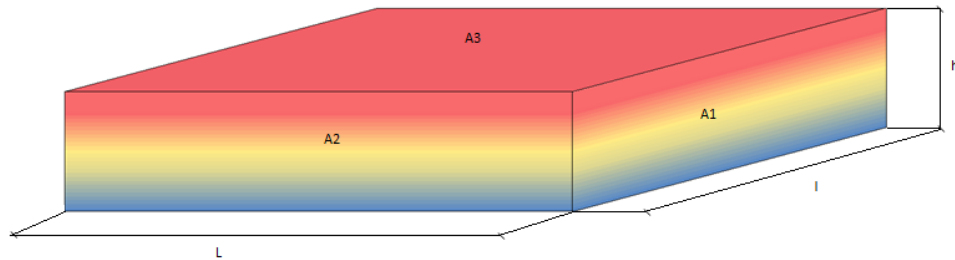


Figura A45: Características geométricas del grupo 3 de baterías.

Calor generado en el sólido:

$$q''' = \frac{Pot_{media}}{V} = \frac{nRint_{media} * i^2}{V} \quad (A31)$$

$$q''' = \frac{0,00239 * 64 * 180^2}{0,23114874} = 21440,32 W/m^3$$

Flujo de calor en toda la superficie del sólido:

$$Q = nRi^2 = 64 * 0,00239 * 180^2 = 4955,9W \quad (A32)$$

$$Q_{tot}'' = \frac{Q}{A_{total}} = \frac{4955,9}{2,69} = 1842,34 W/m^2 \quad (A33)$$

El flujo de calor en cada una de las superficies será:

$$Q_i'' = Q_{tot}'' * (\%A_i) \quad ; \quad 1 \leq i \leq 6 \quad (A34)$$

$$(A_1 \%) = 0,0754m^2$$

$$\text{con } (A_2 \%) = 0,117m^2$$

$$(A_3 \%) = (A_{inf} \%) = (A_{sup} \%) = 0,306m^2$$

utilizando la resistencia media para las superficies laterales;

$$Q_{A1}'' = 139,37 \text{ W/m}^2$$

$$Q_{A2}'' = 217,57 \text{ W/m}^2$$

Para las superficies superior e inferior se utilizarán las resistencias que afectan sobre esa zona para calcular el flujo de calor.

$$Q_{\text{inf}}'' = \frac{Q_{\text{min}}}{A_{\text{total}}} A_{\text{sin } f} (\%) = \frac{n R_{\text{inf}} i^2}{Lx l x h} A_{\text{inf}} (\%) \quad (\text{A.4.15})$$

$$Q_{\text{inf}}'' = 373,6 \text{ W/m}^2$$

$$Q_{\text{sup}}'' = \frac{Q_{\text{max}}}{A_{\text{total}}} A_{\text{sup}} (\%) = \frac{n R_{\text{sup}} i^2}{Lx l x h} A_{\text{sup}} (\%)$$

$$Q_{\text{sup}}'' = \frac{64 \times 0,00302 \times 180^2}{2,69} 0,306 = 712,36 \text{ W/m}^2$$

Balance de flujos:

Debiendo ser la suma de los flujos de calor superficiales igual a el flujo medio por unidad de superficie:

$$\sum Q_i'' = Q_{\text{inferior}}'' + Q_{\text{superior}}'' + 2Q_{A1}'' + 2Q_{A2}'' = 1800 \text{ W/m}^2$$

$$\sum Q_i'' \approx Q_{\text{tot}}''$$

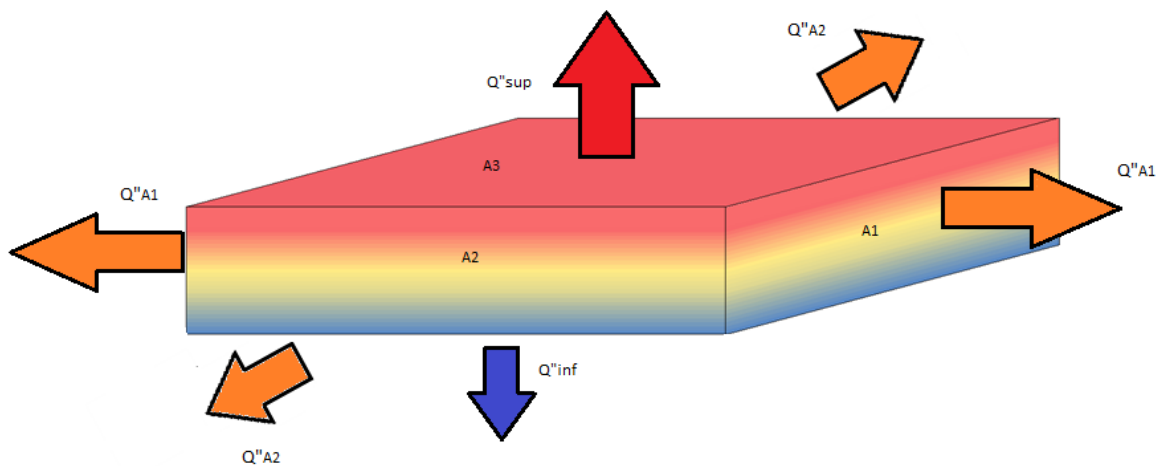


Figura A46: Balance de flujos de calor superficiales sobre el grupo 3.

El flujo de calor superficial de la superficie superior (A3) es entonces

$$Q_{\text{sup}}'' = 712,36 \text{ W/m}^2$$

Coefficiente de convección:

El coeficiente de convección que produce la refrigeración se ha calculado de tal manera que una corriente de aire a la temperatura de $T_{\infty} = 45^{\circ}\text{C}$ sea capaz de evacuar el calor generado en el sólido correspondiente a la superficie indicada (A3). Así, la potencia de refrigeración deberá igualar al flujo de calor superficial en 3.

$$Q_{\text{refrig}} = q'' \quad (\text{A35})$$

Al considerar únicamente la convección, a potencia de refrigeración será:

$$Q_{\text{refrig}} = h * (T_s - T_{\infty}) \quad (\text{A36})$$

$$\text{con } T_{\infty} = T_{\text{ambiente}} = 45^{\circ}\text{C}$$

$$\text{y } T_s = T_{\text{SupMáxima}} = 55^{\circ}\text{C}$$

Obteniendo el coeficiente h como sigue:

$$h = \frac{q''}{(T_s - T_{\infty})} = 71,2532108 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Además, este coeficiente debe ser capaz de mantener la temperatura máxima de cada una de las células por debajo del valor límite (75°C)

A8.3. Distribución de temperatura final.

Para comprobar la validez del coeficiente de convección calculado, se calculará la temperatura máxima de cada célula a través del método de diferencias finitas en 1D, ya que en el modelo se desprecia la variación de la temperatura en la dirección transversal, como se ha explicado en anexos anteriores (Anexo3 Ensayos de laboratorio).

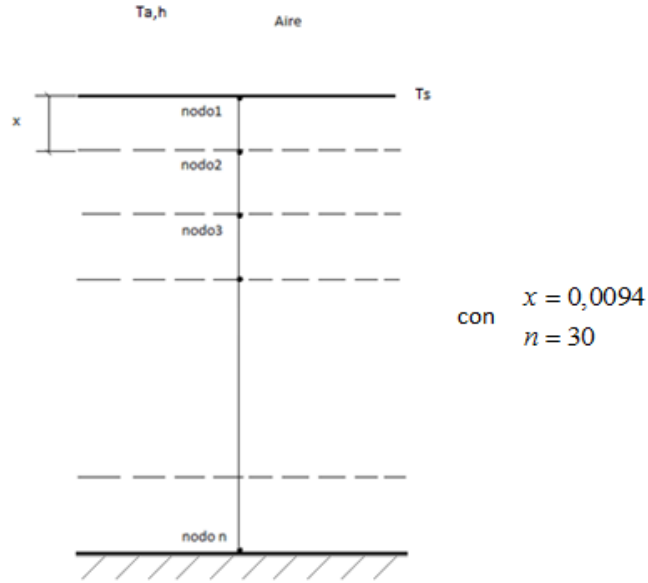


Figura A47: Discretización unidimensional de una célula para el MDF.

$$T_i^{p+1} = Fo(T_{i-1}^p + T_{i+1}^p) + (1 - 2Fo)T_i^p \quad (A37)$$

con

$$Fo = \frac{a \cdot \Delta t}{L_c^2} \quad ; \quad L_c = \frac{V}{A_s} \quad ; \quad a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

Conociéndose las condiciones iniciales (temperaturas en todos los nodos para $t=0$), se puede calcular directamente la temperatura de cualquier nodo en cualquier instante.

Para que la solución no oscile, Fo (número de Fourier) debe cumplir

$$Fo < \frac{1}{2} \Rightarrow \Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2}{a}$$

Sustituyendo las propiedades del aire y aplicando el volumen y el área de cada contenedor de baterías, la ecuación en diferencias finitas resultaría finalmente:

$$T_i^{p+1} = \frac{1}{2}(T_{i-1}^p + T_{i+1}^p) \quad (A38)$$

como condición de contorno adicional, se incluye que la temperatura en el nodo $n=5$ (en el que se alcanza mayor temperatura) en el instante t es igual a la temperatura teórica alcanzada sin refrigeración en ese nodo menos diferencia de temperatura entre el nodo $n-1$ en el instante $t-1$ y el nodo n en el instante t , es decir, la cantidad de calor que se transmite de un nodo a otro durante el tiempo característico definido por Δt :

$$T_5^t = T_{5teórica}^t - (T_n^{t-1} - T_{n-1}^{t-1}) \quad (A39)$$

con n=30 y tomando los valores de las propiedades una célula constantes a una temperatura media de $T_i = 50^\circ C$

$$L_c = 0,283m$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} = \frac{0,25}{1550,5 \times 2006,3} = 8,0410^{-8} m^2 / s$$

$$Fo = \frac{a \cdot \Delta t}{L_c^2} = 0,5 \rightarrow \Delta t = 553s$$

Tabla A18: Resultados de la temperatura en los nodos del MDF sobre el grupo 3 (T en °C).

p	t (s)	T0	T1	T2	T3	T4	T5
0	0,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00
1	553,66	49,83	49,83	49,83	49,83	49,83	49,83
2	1107,32	54,65	54,65	54,65	54,65	54,65	54,65
3	1660,98	55,00	56,12	57,24	58,37	59,49	60,61
4	2214,63	55,00	56,73	58,46	60,19	61,92	63,65
5	2768,29	55,00	57,71	60,41	63,12	65,83	68,53
6	3321,95	55,00	58,48	61,95	65,43	68,90	72,38
7	3875,61	55,00	58,81	62,62	66,43	70,24	74,05

T14	T15	T16	T27	T28	T29	T30	Tmedia
45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00
49,00	48,91	48,81	47,80	47,71	47,62	47,53	48,86
52,96	52,77	52,59	50,52	50,33	50,15	49,96	52,68
57,86	57,56	57,25	53,90	53,59	53,29	52,98	56,87
60,55	60,21	59,86	56,08	55,73	55,39	55,04	59,20
64,70	64,27	63,84	59,16	58,73	58,30	57,88	62,75
68,04	67,56	67,07	61,77	61,29	60,80	60,32	65,64
69,55	69,05	68,55	63,04	62,54	62,04	61,54	66,96

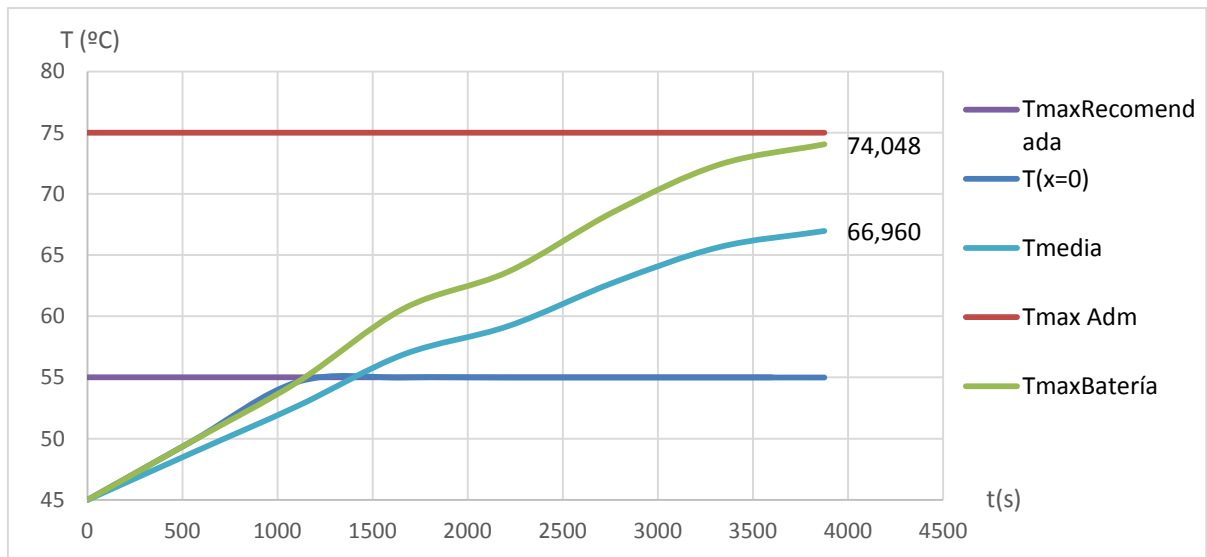


Figura A48: Evolución de las temperaturas en las baterías del grupo 3 refrigerado en su superficie.

Anexo 9: Cálculo del sistema de refrigeración

A9.1. Introducción.

El sistema de refrigeración se calculará únicamente para el grupo de baterías número 3, ya que será este el único de los tres grupos en el que podrá implementarse dicho sistema.

El problema planteado, con las condiciones de contorno correspondientes exigirá la discusión de varias soluciones, de las cuales se elegirá la más óptima atendiendo a numerosos criterios de los cuales cabe destacar la eficacia de la refrigeración, sencillez de la geometría, la baja potencia del sistema, el espacio ocupado, la evacuación del fluido caliente, así como el costo tanto constructivo como económico.

A9.2. Planteamiento:

A continuación se muestra el problema planteado y las condiciones de contorno a las que está sujeto:

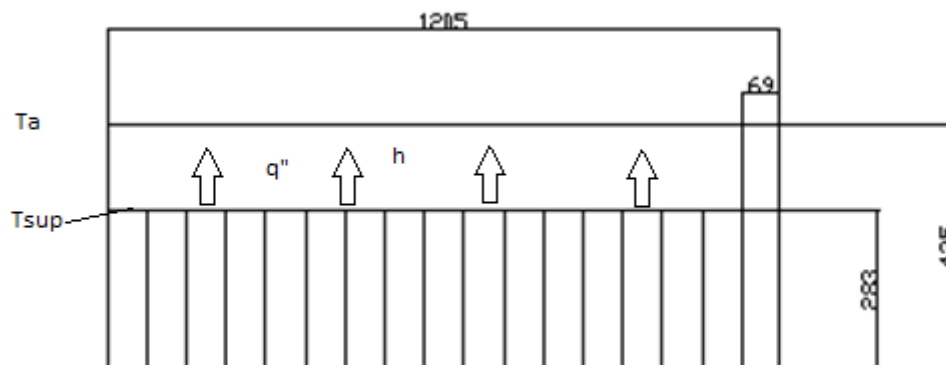


Figura A49: Planteamiento del problema en el cofre 3 de baterías.

$$q'' = 712,532108 \text{ W/m}^2$$

$$T_a = 45^\circ \text{ C}$$

$$h = 71,2532108 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$T_{\text{sup}} = 55^\circ \text{ C}$$

A9.2.a) Flujo paralelo a la superficie.

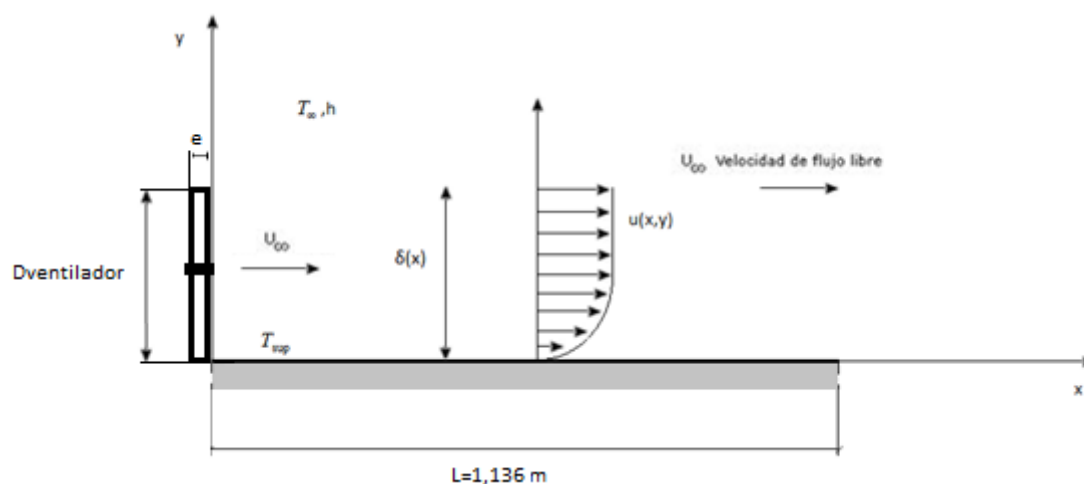


Figura A50: Representación de flujo paralelo a la superficie y sus características.

Se desechará el régimen laminar, debido principalmente a que la superficie a refrigerar no es plana sino que en realidad posee numerosas heterogeneidades debido a la presencia de los bornes, y se considerará únicamente régimen turbulento.

A partir de la analogía Chilton-Colburn:

$$\overline{Nu} = 0,0296 \cdot \text{Re}_x^{4/5} \cdot \text{Pr}^{1/3} \quad (\text{A40})$$

$$\text{con } \overline{Nu} = \frac{\bar{h} \cdot D}{\lambda} \quad \text{y} \quad D = L_{\text{característica}}$$

En la deducción de estas expresiones se han supuesto las propiedades termofísicas del fluido constantes, debiéndose calcular estas a la temperatura de película:

$$T_p = \frac{T_{\text{sup}} + T_{\infty}}{2} = 50^\circ \text{C} \text{ y válido para } 5 \times 10^5 < \text{Re} < 10^7 \text{ pero extrapolable hasta } \text{Re} = 10^8$$

con un error inferior al 15% , con $\text{Re} = \frac{u_{\infty} L}{\nu}$

A partir del Re obtenido, se calculará la velocidad a la que debe circular el fluido sobre cada grupo de baterías para que se dé el coeficiente de convección necesario.

Obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla A19: Características del flujo paralelo a la superficie.

L (m)	Nusselt	Re	u_{∞} (m/s)	U(Km/h)
1,136	2,88E+03	1,93E+06	31,33	8,7

Cumplimiento de las restricciones:

Tabla A21: Restricciones de la ecuación A4.21.

Restricción Re	Re calculado	Cumple SI/NO
$5E+05 < Re < 1E+07$	1,93E+06	Si

A9.2.b) Chorros normales a la superficie.

Según se ve en la Figura A51, el chorro se suele descargar a alta velocidad (turbulentamente), en un ambiente en reposo desde una tobera, normalmente de sección circular (diámetro D) o alargada (anchura W). El chorro a la salida tiene un perfil de velocidades uniforme (aproximadamente) y conforme avanza se vuelve no uniforme y se desacelera.

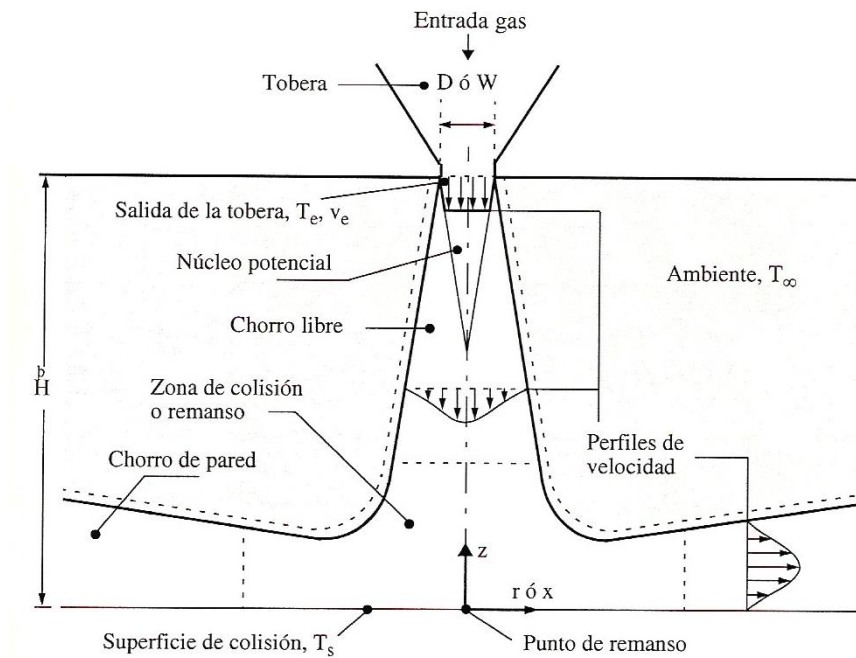


Figura A51: Chorro de gas normal a la superficie de refrigeración.

b.1) Grupo de toberas alargadas (de rendija):

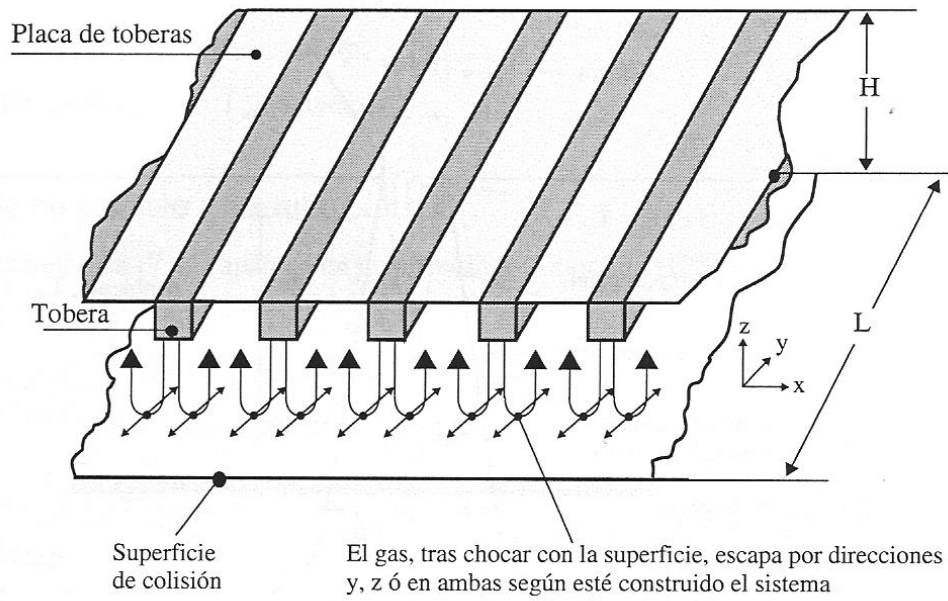


Figura A52: Colisión superficial de un conjunto de chorros alargados.

con $H = 0,152m$ y $L = 0,728m$

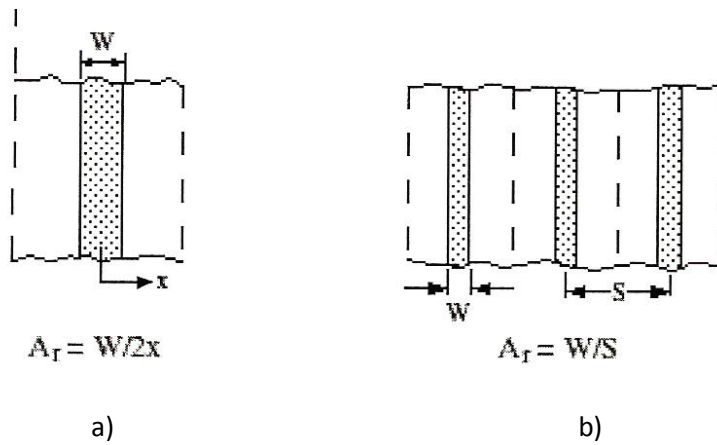


Figura A53: Sección de los aspectos pertinentes de a) chorro alargado único, b) conjunto de chorros alargados.

Cogiendo para S y W los valores corresponden a

$$S_{opt} = 0,364m \text{ y } W_{opt} = 0,0228m$$

Para este caso se tienen las relaciones siguientes:

$$\bar{Nu} = \frac{2}{3} A_{r,0}^{3/4} \left(\frac{2Re}{\frac{A_r}{A_{r,0}} + \frac{A_{r,0}}{A_r}} \right)^{2/3} Pr^{0,42} \quad (A41)$$

$$\text{donde } A_{r,0} = \left[60 + 4 \left(\frac{H}{2W} - 2 \right)^2 \right]^{-1/2}$$

Válido para: $1500 < Re < 4000$; $2 < H/W < 80$; $SH/WL > 1$; $0,008 < A_r < 2,5$

obteniendo los siguientes resultados:

Tabla A22: Características del flujo en grupo de toberas alargadas.

l (m)	Nu	Re	u (m/s)
1,136	108,31	3,53E+04	15,18

Cumplimiento de las restricciones:

Tabla A23: Restricciones para la ecuación A4.22.

	Retricción	Valor calculado	Cumple SI/NO
Re	$1500 < Re < 4000$	35336,5	No
H/W	$2 < H/W < 80$	6,667	Si
SH/WL	$SH/WL > 1$	2,136	Si
Ar	$0,008 < Ar < 2,5$	0,058	Si

b.2) Grupo de toberas redondas(disposición alineada)

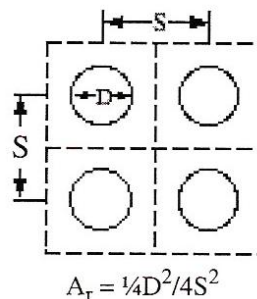


Figura A54: Sección de los aspectos pertinentes de disposición alineada de chorros redondos.

Con $D = 0,055\text{m}$ y $S = 0,288672\text{m}$

Para este caso se tienen las relaciones siguientes:

$$\overline{Nu} = F_2(Re)G\left(\frac{H}{D}, A_r\right)K\left(A_r, \frac{H}{D}\right)Pr^{0,42} \tag{A42}$$

con $F_2 = 0,5Re^{2/3}$;

$$G = 2A_r^{1/2} \frac{1 - 2,2A_r}{1 + 0,2\left(\frac{H}{D} - 6\right)A_r^{1/2}} \quad ; \quad K = \left[1 + \left(\frac{H/D}{0,6/A_r^{1/2}}\right)^6\right]^{-0,05}$$

Válido para $2000 < Re < 10^5$; $2 < H/D < 12$; $0,004 < A_r < 0,04$

obteniendo los resultados siguientes:

Tabla A24: Características del flujo en grupo de toberas redondas en disposición alineada.

Nu	G	K	Re	u (m/s)
139,837	0,088	1,000	2,23E+05	74,273

Con la disposición mostrada a continuación:

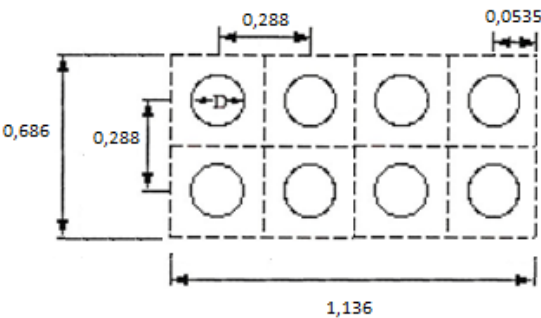


Figura A55: Sección a instalar de los aspectos pertinentes de disposición alineada de chorros redondos.

cumplimiento de las restricciones:

Tabla A25: Restricciones para la ecuación A4.23 en disposición alineada.

	Retricción	Valor calculado	Cumple SI/NO
Re	$2000 < Re < 1e5$	2,23E+05	No
H/D	$2 < H/D < 12$	2,582	Si
Ar	$0,004 < Ar < 0,04$	0,0022	No

b.3) Grupo de toberas redondas(disposición alternada)

En este caso, las ecuaciones son las mismas que en el apartado anterior, variando solamente la geometría, de la forma en que se muestra:

$$A_T = \pi D^2 / 2 \sqrt{3} S^2$$

Figura A56: Sección de los aspectos pertinentes de disposición alineada de chorros alternados.

Con $D = 0,06\text{m}$ y $S = 0,288672\text{m}$

Y así:

Tabla A26: Características del flujo en grupo de toberas redondas en disposición alternada.

Nu	G	K	Re	u (m/s)
152,549	0,261	0,990	5,07E+04	15,459

Obteniéndose la distribución siguiente:

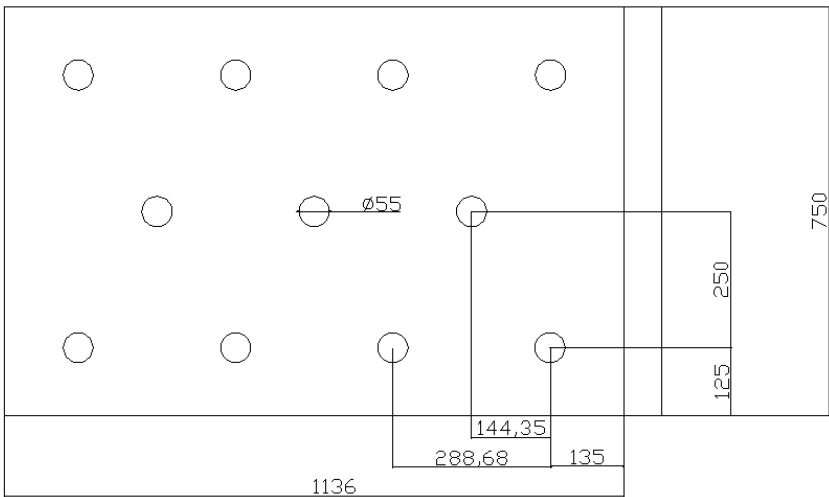


Figura A57: Sección a instalar de los aspectos pertinentes de disposición alineada de chorros redondos.

Cumplimiento de las restricciones:

Tabla A27: Restricciones para la ecuación A4.23 en disposición alternada.

	Restricción	Valor calculado	Cumple SI/NO
Re	$2000 < Re < 1e5$	5,07E+04	Si
H/D	$2 < H/D < 12$	2,367	Si
Ar	$0,004 < Ar < 0,04$	0,039	Si

Como se puede observar, sólo dos de las disposiciones cumplen las restricciones impuestas por las correlaciones experimentales (flujo paralelo y la disposición alternada de toberas redondas). Para la elección de una de ellas se tendrán en cuenta los criterios comentados al inicio del anexo, con lo que se elegirá la disposición que requiera la mínima potencia en los ventiladores, en un principio, que corresponde a la disposición alternada de toberas redondas. Además de ello, esta disposición consigue una mejor refrigeración al incidir el chorro de aire perpendicularmente a la superficie a refrigerar. Por otro lado, la facilidad de montaje se hace evidente al estar los ventiladores situados en la tapa del cofre de las baterías, y al ser esta de madera. La extracción del flujo caliente puede realizarse sencillamente por los laterales instalando únicamente unas rejillas de extracción. Por último, al ser la velocidad necesaria mucho mejor (la mitad aproximadamente), el diámetro de los ventiladores disminuye considerablemente, así como la potencia de accionamiento de estos y el número de revoluciones, y con todo ello, el costo.

Anexo 10: Planos y construcción de las toberas

Se han utilizado planchas de aluminio de 0,5 mm de espesor para crear los perfiles de la Figura A58, los cuales se han doblado en un cilindro de metal y unido con un adhesivo multimateriales.

En la Figura A59 se puede ver el desarrollo efectuado para su construcción.

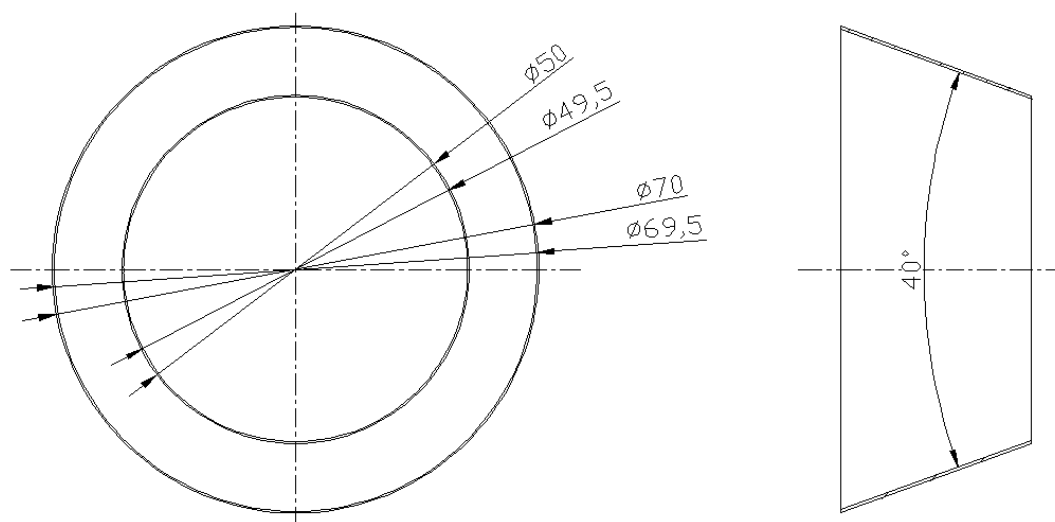


Figura A58: Planos de la tobera a instalar.

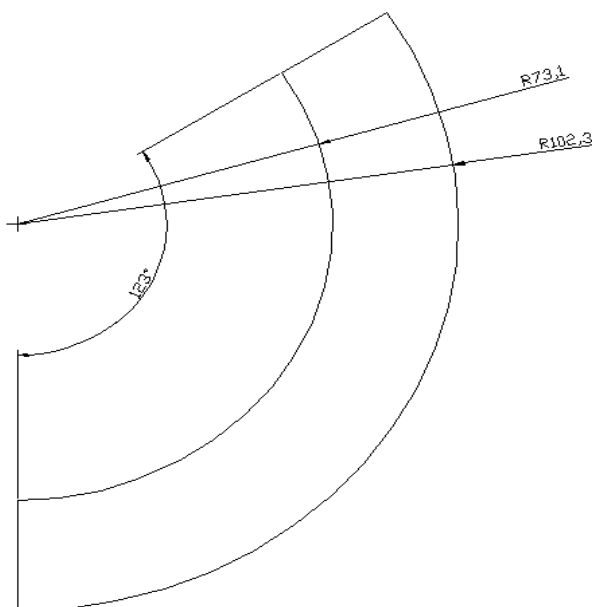


Figura A59: Desarrollo plano de la tobera.

Anexo 11: Hoja de características ventilador SUNON
PF70201V1-000U-A99