



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Caracterización del proceso de fuga térmica inducido por
punzonamiento en celdas de ion-litio

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Gómez Soriano, Alejandro

Tutor/a: Monsalve Serrano, Javier

Cotutor/a: García Martínez, Antonio

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto, a nivel personal, concentra todos los años de esfuerzo y sacrificios realizados durante todo el grado y también, representa un final de etapa, la cual, dará paso a otras nuevas que seguirán enriqueciéndome como profesional y como persona.

Es por ello por lo que necesito agradecer a todas las persona que han estado ahí para que esto haya sido posible.

A mi familia.

Gracias a mis padres, por siempre estar ahí, por su apoyo incondicional, por haber sido oyentes de todo lo que sucedía en cada proceso de este largo camino y de forma indiscutible, gracias por sus innumerables esfuerzos para haberme permitido estudiar lo que, en cierta manera, siempre quise. Sin vosotros esto, no sería posible.

Gracias a mi pareja, por su apoyo incondicional, por haber sido compañera de este viaje que no siempre ha sido con viento a favor, por haber estado ahí cuando lo he necesitado, gracias por todo.

Gracias a mis hermanos, por su fuerza y su apoyo en cada una de las decisiones que he tomado a lo largo del camino y sus por sus consejos.

Gracias a mis abuelos, por haberme enseñado a ser quien soy, por haber despertado esa curiosidad en mi cuando era tan solo un niño pequeño, por haberme cuidado y por tantas cosas más. A los que están aquí, gracias y a los que no pudisteis llegar a leer esto por unos meses, allá donde estéis, gracias.

A mis amigos, compañeros y profesores.

No podría terminar este apartado de agradecimientos sin mencionar a aquellos amigos que siempre estuvieron allí. También a esos profesores que siempre tenían un hueco para saciar mi curiosidad, aunque no procediera con la clase, y así sembrar el precedente de en quien me he convertido: Jaime, Carlos, Santiago... Gracias.

Para terminar, gracias a mis tutores, Javier y Antonio, por brindarme la oportunidad de realizar el presente proyecto, gracias al IUI CMT-Motores Térmicos por permitirme formar parte del equipo y haber podido disfrutar de las instalaciones durante la realización de los ensayos, y gracias a mis compañeros de trabajo durante estos meses, por invertir su tiempo en aconsejarme y guiarme durante estos meses de trabajo. Gracias.

A todos los que me apoyasteis, gracias, esto es por vosotros, a los que no lo hicisteis, gracias, esto es para vosotros.

RESUMEN

Hoy en día, la sociedad está avanzando hacia un modelo de transporte alternativo, fruto de la inmediata necesidad de reducir las emisiones de CO₂ y de gases contaminantes. El vehículo eléctrico parece perfilarse como una de las soluciones futuras, a pesar de que éste presenta determinadas dificultades cuando se plantea su implantación a gran escala. Tecnologías como la hibridación (en cada una de sus variantes), no resuenan tanto en las conversaciones cotidianas, pero, son una tecnología con mucho potencial que podría combinar los mejor de los dos extremos. Sea cual sea el futuro de la movilidad, todos necesitarán baterías para almacenamiento de energía, por lo que es necesario desarrollar la investigación en este campo para que se pueda realizar la evolución en la movilidad de manera segura. Es por esto por lo que el presente proyecto puede relacionarse con los ODS número nueve y once, los cuales establecen como objetivos temas tan importantes como la sostenibilidad de las ciudades o la mejora de la industria e infraestructura a través de la innovación.

El proceso de fuga térmica inducida por el punzonamiento es un tipo de ensayos en el cual se analiza la reacción que sucede en la batería cuando es expuesta a un abuso mecánico severo. El ensayo se basa principalmente en la introducción de un punzón de dimensiones determinadas en la batería mientras se monitorizan parámetros como por ejemplo la temperatura, la presión o la posición de la aguja. También pueden realizarse estudios varios tras el punzonamiento como análisis de gases o partículas. Asimismo, el objetivo de este trabajo será caracterizar una serie de baterías, del mismo modelo, mediante el análisis de los datos obtenidos durante el ensayo. Para alcanzar el objetivo del trabajo se emplearán los laboratorios del Instituto de investigación CMT-Motores Térmicos.

Índice General

| | |
|---|----|
| DOCUMENTO 1: MEMORIA..... | 14 |
| CAPÍTULO 1: Introducción | 15 |
| 1.1 Objeto..... | 16 |
| 1.2 Antecedentes | 16 |
| 1.3 Motivación y justificación..... | 18 |
| 1.4 Viabilidad de proyecto..... | 18 |
| 1.5 Estructura | 19 |
| CAPÍTULO 2: Conceptos previos..... | 21 |
| 2.1 Introducción | 22 |
| 2.2 Contexto de los vehículos eléctricos en nuestra sociedad..... | 22 |
| 2.3 La batería de litio..... | 25 |
| 2.4 Principales tipos de baterías de litio | 27 |
| 2.4.1 Baterías NMC..... | 27 |
| 2.4.2 Baterías NCA..... | 28 |
| 2.4.3 Baterías LFP | 28 |
| 2.5 Proceso de fuga térmica..... | 29 |
| 2.6 Conclusiones..... | 30 |
| CAPÍTULO 3: Herramientas experimentales y teóricas | 31 |
| 3.1 Introducción | 32 |
| 3.2 Descripción de herramientas experimentales..... | 32 |
| 3.2.1 Esquema de la sala de ensayos | 32 |
| 3.2.2 La batería..... | 33 |
| 3.2.3 Sistema de carga de la batería..... | 34 |
| 3.2.3.1 Fuente de alimentación bidireccional | 34 |
| 3.2.3.2 Soporte de carga de la batería | 35 |
| 3.2.4 Equipo del calorímetro | 35 |
| 3.2.4.1 Calorímetro | 35 |
| 3.2.4.2 Equipo de penetración | 37 |
| 3.2.5 Equipo termográfico..... | 38 |
| 3.2.5.1 Cámara termográfica..... | 38 |
| 3.2.5.2 Métodos de obtención de datos | 39 |
| 3.2.6 Equipos auxiliares..... | 40 |
| 3.3 Descripción de herramientas teóricas..... | 42 |
| 3.3.1 Protocolo CCCV..... | 42 |
| 3.3.2 Cálculos varios | 44 |

DOCUMENTO 1: MEMORIA

| | |
|---|----|
| 3.3.2.1 Cálculos de liberación de calor en la pila | 44 |
| 3.3.2.2 Capacidad calorífica..... | 44 |
| 3.3.2.3 Parámetros límite | 47 |
| 3.4 Conclusión | 47 |
| CAPÍTULO 4: Resultados | 48 |
| 4.1 Introducción | 49 |
| 4.2 Descripción experimental..... | 49 |
| 4.3 Resultados experimentales | 50 |
| 4.3.1 Batería 1, SOC50, T20 | 50 |
| 4.3.2 Batería 2, SOC50, T20 | 53 |
| 4.3.3 Batería 3, SOC50, T20 | 56 |
| 4.3.4 Batería 4, SOC50, T50 | 58 |
| 4.3.5 Batería 5, SOC100, T20 | 61 |
| 4.3.6 Batería 6, SOC100, T20 | 65 |
| 4.4 Resumen de resultados | 68 |
| 4.4.1 Temperatura frente a tiempo | 69 |
| 4.4.2 Energía liberada..... | 70 |
| 4.4.3 Tasa de temperatura frente a temperatura..... | 73 |
| 4.5 Conclusión | 75 |
| CAPÍTULO 5: Conclusiones | 76 |
| 5.1 Introducción | 77 |
| 5.2 El fenómeno de venteo | 77 |
| 5.3 La importancia de la evacuación de la materia | 78 |
| 5.4 El efecto del SOC en la liberación de calor | 79 |
| 5.5 El efecto de la temperatura inicial en la liberación de calor | 80 |
| 5.7 El efecto del fallo mecánico..... | 81 |
| 5.6 Relación de potencia eléctrica/potencia térmica..... | 82 |
| 5.7 El efecto de la ventana de zafiro | 84 |
| 5.8 La refrigeración de las celdas | 85 |
| 5.9 Trabajos futuros..... | 86 |
| 5.9.1 Análisis del comportamiento térmico | 86 |
| 5.9.2 Repetitividad en los ensayos | 87 |
| 5.9.2.1 Análisis de diferentes estados de carga..... | 87 |
| 5.9.2.2 Análisis del envejecimiento | 87 |
| 5.9.2.3 Análisis de conjuntos de baterías | 88 |
| CAPÍTULO 6: Referencias bibliográficas..... | 89 |

DOCUMENTO 1: MEMORIA

| | |
|--|-----|
| DOCUMENTO 2: PLIEGO DE CONDICIONES | 93 |
| CAPÍTULO 1: Introducción | 95 |
| 1.1 Introducción | 96 |
| 1.2 Estructura | 96 |
| 1.3 Condiciones legales | 96 |
| CAPÍTULO 2: Condiciones para el desarrollo del proyecto..... | 97 |
| 2.1 Introducción | 98 |
| 2.2 Condiciones de los equipos de trabajo | 98 |
| 2.2.1 Ensayos | 98 |
| 2.2.1.1 Fuente Bidireccional | 98 |
| 2.2.1.2 Calorímetro | 98 |
| 2.2.1.3 Equipo de penetración | 99 |
| 2.2.1.4 Cámara termográfica..... | 99 |
| 2.2.2 Redacción | 99 |
| 2.3 Condiciones de los programas empleados..... | 99 |
| 2.3 Conficiones del puesto de trabajo..... | 100 |
| 2.3.1 Ergonomía | 101 |
| 2.3.2 Emergencias. Vías y salidas de evacuación | 103 |
| 2.3.3 Ruido | 103 |
| 2.3.4 Protección contra incendios..... | 103 |
| 2.3.5 Condiciones termo-higrométricas..... | 103 |
| 2.3.6 Iluminación..... | 104 |
| 2.3.7 Instalación Eléctrica..... | 104 |
| 2.4 Condiciones de la sala de ensayo | 104 |
| 2.4.1 Condiciones de realización de los ensayos..... | 105 |
| 2.4.2 Condiciones de la sala de ensayo | 105 |
| 2.4.2.1 Dimensiones y accesibilidad..... | 105 |
| 2.4.2.2 Ventilación y extracción de gases..... | 106 |
| 2.4.2.3 Aislamiento térmico y acústico | 107 |
| 2.4.2.4 Iluminación..... | 107 |
| 2.4.2.5Protección eléctrica..... | 107 |
| 2.4.2.6 Almacenamiento de las celdas..... | 107 |
| 2.4.3 Tratado de instrumental | 107 |
| 2.4.3.1 Termopares..... | 108 |
| 2.4.3.2 Cámara termográfica..... | 108 |
| DOCUMENTO 3: PRESUPUESTO | 109 |

DOCUMENTO 1: MEMORIA

| | |
|--|-----|
| CAPÍTULO 1: Introducción | 111 |
| 1.1 Introducción | 112 |
| 1.2 Estructura | 112 |
| CAPÍTULO 2: Cuadro de precios | 113 |
| 2.1 Mano de obra | 114 |
| 2.2 Materiales..... | 114 |
| CAPÍTULO 3: Obtención de Costes | 115 |
| 3.1 Metodología | 116 |
| CAPÍTULO 4: Unidades de obra | 118 |
| 4.1 Introducción | 119 |
| 4.2 Cuadro de precios descompuestos | 119 |
| 4.2.1 Proceso experimental..... | 119 |
| 4.2.2 Procesado de datos y análisis de resultados..... | 120 |
| 4.2.3 Redacción de documentos | 121 |
| CAPÍTULO 5: Presupuestos finales | 122 |
| 5.1 Presupuesto parcial..... | 123 |
| 5.2 Presupuesto total | 123 |

Índice de Tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1. Química del cátodo según modelo de vehículo | 24 |
| Tabla 2. Características generales de la batería..... | 33 |
| Tabla 3. Resumen de resultados primer ensayo..... | 52 |
| Tabla 4. Resumen de resultados segundo ensayo..... | 55 |
| Tabla 5. Resumen de resultados tercer ensayo..... | 58 |
| Tabla 6. Resumen de resultados cuarto ensayo..... | 61 |
| Tabla 7. Resumen de resultados quinto ensayo..... | 65 |
| Tabla 8. Resumen de resultados sexto ensayo..... | 68 |
| Tabla 9. Resumen temperatura media máxima y tiempo de máximo (Ensayo 1-4)..... | 69 |
| Tabla 10. Resumen temperatura media máxima y tiempo de máximo (Ensayo 5,6)..... | 70 |
| Tabla 11. Energía liberada acumulada - Ensayos (1-4)..... | 71 |
| Tabla 12. Energía liberada acumulada - Ensayos (5,6)..... | 72 |
| Tabla 13. Energía liberada, acumulada vs media - SOC50%..... | 73 |
| Tabla 14. Energía liberada, acumulada vs media - SOC100%..... | 73 |
| Tabla 15. Resumen general de resultados..... | 75 |
| Tabla 16. Influencia del estado de carga..... | 80 |
| Tabla 17. Influencia de la temperatura inicial..... | 81 |
| Tabla 18. Características de fuente bidireccional..... | 98 |
| Tabla 19. Características de calorímetro..... | 98 |
| Tabla 20. Características de equipo de penetración..... | 99 |
| Tabla 21. Características de cámara termográfica..... | 99 |
| Tabla 22. Características de ordenador personal..... | 99 |
| Tabla 23. Cuadro de precios de mano de obra..... | 114 |
| Tabla 24. Cuadro de precios de materiales..... | 114 |
| Tabla 25. Amortización de materiales..... | 116 |
| Tabla 26. Cuadro de precios descompuestos de proceso experimental..... | 119 |
| Tabla 27. Cuadro de precios descompuestos de análisis de resultados..... | 120 |
| Tabla 28. Cuadro de precios descompuestos de redacción de documentos..... | 121 |
| Tabla 29. Presupuesto parcial..... | 123 |
| Tabla 30. Gastos asociados..... | 123 |
| Tabla 31. Presupuesto final..... | 124 |

Índice de ecuaciones

| | |
|--|-----|
| Ecuación [1]: Cálculo de Intensidad en función de Tasa C | 42 |
| Ecuación [2]: Calculo de intensidad de descarga | 43 |
| Ecuación [3]: Cálculo de SOC según tiempo de descarga..... | 43 |
| Ecuación [4]: Cálculo de calor liberado acumulado | 44 |
| Ecuación [5]: Ecuación general de cálculo de calor..... | 46 |
| Ecuación [6]: Calor de elemento de referencia | 46 |
| Ecuación [7]: Calor de batería de litio | 46 |
| Ecuación [8]: Entorno adiabático | 46 |
| Ecuación [9]: Cálculo de calor de entorno adiabático | 46 |
| Ecuación [10]: Cálculo de capacidad calorífica de batería de litio | 46 |
| Ecuación [11]: Cálculo de temperatura media de la celda..... | 69 |
| Ecuación [12]: Cálculo del incremento de temperatura según el ensayo | 72 |
| Ecuación [13]: Cálculo de calor liberado medio | 72 |
| Ecuación [14]: Cálculo de energía almacenada en una batería | 82 |
| Ecuación [15]: Cálculo de energía almacenada en una batería de SOC determinado | 83 |
| Ecuación [16]: Cálculo de energía transmitida a la rueda | 84 |
| Ecuación [17]: Cálculo de capacidad calorífica de la batería..... | 84 |
| Ecuación [18]: Cálculo de la amortización..... | 116 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Ventas de vehículos eléctricos en los últimos cuatro años | 23 |
| Figura 2. Matriculaciones según sistema propulsivo | 23 |
| Figura 3. Ventas de vehículos en el 2022 | 24 |
| Figura 4. Batería LG - INR18650..... | 25 |
| Figura 5. Módulo de baterías | 25 |
| Figura 6. Estructura interna de la batería de litio..... | 26 |
| Figura 7. Estructura química NMC..... | 28 |
| Figura 8. Estructura química LFP | 29 |
| Figura 9. Esquema de sala de ensayos | 32 |
| Figura 10. Fuente bidireccional | 34 |
| Figura 11. Soporte de baterías | 35 |
| Figura 12. Detalle, conector del soporte..... | 35 |
| Figura 13. Representación del calorímetro | 37 |
| Figura 14. Detalle ventana calorímetro | 37 |
| Figura 15. Representación de montaje | 38 |
| Figura 16. Detalle de montaje | 38 |
| Figura 17. Montaje de cámara termográfica | 39 |
| Figura 18. Procesado de imágenes termográficas..... | 40 |
| Figura 19. Distribución temporal de temperaturas (Ej.) | 40 |
| Figura 20. Esquema de montaje de termopares | 41 |
| Figura 21. Montaje general del ensayo | 41 |
| Figura 22. Gráfica de carga CCCV | 43 |
| Figura 23. Metodología "HWS" | 45 |
| Figura 24. Gráfica calentamiento (REF.) | 46 |
| Figura 25. Gráfica calentamiento (LIB) | 46 |
| Figura 26. Batería pintada color negro mate..... | 49 |
| Figura 27. Tasa Temperatura vs Temperatura - Ensayo 1 | 51 |
| Figura 28. Distribución térmica - Ensayo 1 | 51 |
| Figura 29. Resultado final celda - Ensayo 1 | 52 |
| Figura 30. Tasa Temperatura vs Temperatura - Ensayo 2 | 53 |
| Figura 31. Distribución térmica - Ensayo 2..... | 54 |
| Figura 32. Resultado final celda - Ensayo 2 | 55 |
| Figura 33. Tasa Temperatura vs Temperatura - Ensayo 3 | 56 |
| Figura 34. Distribución térmica - Ensayo 3..... | 57 |
| Figura 35. Resultado final celda - Ensayo 3 | 58 |
| Figura 36. Tasa Temperatura vs Temperatura - Ensayo 4 | 59 |
| Figura 37. Distribución térmica - Ensayo 4..... | 60 |
| Figura 38. Resultado final celda - Ensayo 4 | 61 |
| Figura 39. Tasa Temperatura vs Temperatura - Ensayo 5 | 62 |
| Figura 40. Distribución térmica - Ensayo 5..... | 62 |
| Figura 41. Imagen 0 - Ensayo 5..... | 64 |
| Figura 42. Imagen 1 - Ensayo 5..... | 64 |
| Figura 43. Imagen 2 - Ensayo 5..... | 64 |
| Figura 44. Imagen 3 - Ensayo 5..... | 64 |
| Figura 45. Resultado final celda - Ensayo 5 | 64 |

DOCUMENTO 1: MEMORIA

| | |
|---|----|
| Figura 46. Tasa Temperatura vs Temperatura - Ensayo 6 | 66 |
| Figura 47. Distribución térmica - Ensayo 6..... | 66 |
| Figura 48. Imagen 0 - Ensayo 6..... | 67 |
| Figura 49. Imagen 1 - Ensayo 6..... | 67 |
| Figura 50. Imagen 2 - Ensayo 6..... | 67 |
| Figura 51. Imagen 3 - Ensayo 6..... | 67 |
| Figura 52. Resultado final celda - Ensayo 6 | 68 |
| Figura 53. Temperaturas medias vs Tiempo (Ensayo 1-4) | 69 |
| Figura 54. Temperaturas medias vs Tiempo (Ensayo 5,6) | 70 |
| Figura 55. Energía liberada acumulada - (Ensayos 1-4)..... | 71 |
| Figura 56. Energía liberada acumulada - (Ensayos 5,6)..... | 72 |
| Figura 57. Resumen Tasa Temp. vs Temp. SOC50% - SUP | 74 |
| Figura 58. Resumen Tasa Temp. vs Temp. SOC50% - INF | 74 |
| Figura 59. Resumen Tasa Temp. vs Temp. SOC100% - SUP | 74 |
| Figura 60. Resumen Tasa Temp. vs Temp. SOC100% - INF | 74 |
| Figura 61. Batería con venteo de masa | 78 |
| Figura 62. Batería sin venteo de masa | 78 |
| Figura 63. Rendimientos BEV | 84 |

Tabla de símbolos

NMC: Batería con cátodo de níquel manganeso y cobalto.

LFP: Batería con cátodo de litio y ferro-fosfato.

NCA: Batería con cátodo de níquel cobalto y óxido de aluminio.

SOC: Estado de carga (*State of Charge*)

AC: Corriente alterna

DC: Corriente continua

CCCV: Corriente Constante Voltaje Constante (*Constant Current Constant Voltage*)

Hz: Hercios

I_{Bat} : Corriente de carga de la batería

C_{nom} : Capacidad nominal de la batería

C_{bat} : Capacidad de la batería disponible

Ah: Amperios hora

Wh: Vatios hora

C_p : Capacidad calorífica a presión constante.

t_0 : Tiempo inicial.

T_{onset} : Temperatura de inicio de reacción.

$T_{critical}$: Temperatura límite de reacción exotérmica.

LIB: Batería de Iones de Litio (*Lithium-Ion Battery*).

T_{bat} = temperatura estimada del centro de la batería.

T_{inf} = temperatura medida por el termopar inferior.

T_{sup} = temperatura medida por el termopar superior.

$\Delta t (T_{max})$ = tiempo de máxima temperatura.

T_{max_sup} = máxima temperatura registrada por termopar superior.

T_{max_inf} = máxima temperatura registrada por termopar inferior.

T_{mid_max} = temperatura media de la celda.

$dTdt_{max}$ = Máxima tasa de temperatura.

ΔT_{i_max} = Incremento máximo de temperatura del ensayo "i".

Q_{med} = Energía liberada según la temperatura media de la celda.

$\Delta T_{50\%-100\%}$ = Incremento de temperaturas entre ensayos SOC100% y SOC50%

DOCUMENTO 1: MEMORIA

$\Delta T_{20^{\circ}\text{C}-50^{\circ}\text{C}}$ = Incremento de temperaturas entre ensayos $T_{\text{onset}}=[20^{\circ}\text{C}, 50^{\circ}\text{C}]$.

$E_{\text{elec-100\%}}/ E_{\text{elec-50\%}}$ = Energía eléctrica almacenada al SOC 100% y SOC50%.

V_{max} = Voltaje máximo de la batería.

η_g = Rendimiento global de la cadena de potencia.

E_r = Energía eléctrica transmitida a la rueda.

H_{bat} = Capacidad de liberar calor de la celda por unidad de masa.

AHR = Calor liberado acumulado al final del ensayo ("*Accumulated Heat Release*").

m_{bat} = Masa de la batería antes del ensayo.

DOCUMENTO 1: MEMORIA

DOCUMENTO 1: MEMORIA

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Objeto

En el presente proyecto se plantea como objeto principal, el estudio y caracterización de la fuga térmica en baterías de ion litio inducido por un abuso mecánico severo como es el punzonamiento de esta. A través de este proyecto se pretende contribuir en el desarrollo de nuevos grupos de baterías más seguros para permitir nuevas alternativas de movilidad sostenible.

Concretamente se analizará la reacción de fuga térmica durante el momento del punzonamiento, usando herramientas de monitorización especializadas, como, calorímetro (ARC) o herramientas ópticas. Cada una de las herramientas a disposición de este proyecto se encuentran en los laboratorios del instituto de investigación CMT-Motores Térmicos, y van acompañadas de sus correspondientes programas de obtención de datos. Posteriormente, con el fin de obtener resultados comparativos, se procesarán los datos obtenidos mediante herramientas de cálculo como MATLAB.

1.2 Antecedentes

Si bien se trata de un tema en el cual no existe una vasta cantidad de información, en los últimos años destaca la cantidad de recursos que se han destinado a este fin. Como componente fundamental dentro del sistema de movilidad del futuro, las baterías se han convertido en uno de los focos principales de la investigación, consiguiendo grandes cantidades de información en un corto periodo de tiempo.

Para este proyecto ha sido fundamental el trabajo realizado por doctorandos del departamento de combustión del Instituto de Investigación CMT-Motores Térmicos junto con los que se ha desarrollado el código de análisis de datos y se han tomado las imágenes de las cámaras termográficas.

Respecto del tema encontramos una cantidad importante de artículos escritos a cerca de diferentes tema relativamente similares, haciendo especial mención a todos los escritos por el departamento de combustión centro anteriormente nombrado.

Respecto al venteado de la batería, encontramos un artículo en el cual se emplean métodos termográficos y ensayos a diferentes estados de carga: (García, Peng, Monsalve-Serrano, Villalta, & Martinez-Boggio, 2022), "Optical diagnostics of the venting spray and combustion behaviour during Li-ion battery thermal runaway induced by ramp heating".

Encontramos también, estudios de cálculos de distribución de calor en ensayos de penetración como: (Ye, y otros, 2020), "A novel semi-analytical solution for calculating the temperature distribution of the lithium-ion batteries during nail penetration based on Green's function method".

Si hablamos de ensayos de penetración de aguja, sin análisis termográfico, también encontramos: (Huang, y otros, 2020) , "Thermal Runaway Behavior of Lithium Iron Phosphate Battery During Penetration".

CAPÍTULO 1: Introducción

Reparando en diferentes geometrías de celda y métodos de realización del ensayo encontramos: (Q. Walker, y otros, 2022), "The effect of cell geometry and trigger method on the risks associated with thermal runaway of lithium-ion batteries".

También podemos encontrar publicaciones a cerca de los diferentes mecanismos y comportamientos que sigue la ateria en función de parámetros como el estado de carga o la posición de la penetración (Mao, Chen, Wu, & Wang, 2018), "Failure mechanism of the lithium ion battery during nail penetration".

Otro trabajo en el cual podemos establecer referencias sobre el ensayo de penetración, por su trabajo empleando técnicas de rayos x y técnicas ópticas es: (Yokoshima, y otros, 2018), "Direct observation of internal state of thermal runaway in lithium ion battery during nail-penetration test".

Es importante también hablar acerca de la caracterización mecánica de la batería, por si fuera necesario implementar en un futuro algún tipo nuevo de mecanismo de penetración. Para ello, encontramos trabajos como: (Ma, y otros, 2019), "Mechanics-morphologic coupling studies of commercialized lithium-ion batteries under nail penetration test".

Volviendo a centrar el objetivo en ensayos de penetración de aguja encontramos trabajos como: (V. Shelke, y otros, 2022), "Characterizing and predicting 21700 NMC lithium-ion battery thermal runaway induced by nail penetration".

Finalmente cabe mencionar un trabajo complete acerca del tema principal del presente trabajo como: (Zhao, Luo, & Wang, 2015), "Modeling Nail Penetration Process in Large-Format Li-Ion Cells".

1.3 Motivación y justificación

La contaminación y la emisión de gases de efecto invernadero, es un tema fundamental que necesitamos resolver como sociedad y, para ello, las nuevas generaciones necesitamos trabajar en nuevas alternativas que permitan el desarrollo sostenible. Los vehículos eléctricos, hoy en día se perfilan como principal alternativa a la movilidad personal, que, habitualmente ha estado copada por los motores de combustión interna alternativos. Si bien a título personal no considero que estos vehículos eléctricos de baterías sean la solución absoluta, para un futuro sostenible se debe pasar sin lugar a duda por las baterías como fuente de almacenamiento de energía.

Los motores de combustión interna alternativos, son una tecnología que lleva gran cantidad de tiempo perfeccionándose y existe gran cantidad de información sobre ellos. Contrasta la situación con las tecnologías de los vehículos eléctricos, pues hasta hacer relativamente poco, no eran objeto principal de estudio, como podían serlo los motores mencionados anteriormente. No obstante, en los últimos años, debido a la creciente demanda de vehículos eléctricos, impulsados por las políticas nacionales y europeas, han surgido gran cantidad de preguntas acerca de la fuente principal de almacenamiento de éstos, las baterías.

Las dudas que han surgido fruto del rápido crecimiento del mercado de estos vehículos, van desde la seguridad, pasando por la autonomía y hasta el comportamiento que pueden llegar a tener bajo determinadas condiciones de uso ciclos de carga. Son muchos los temas en los que hay que profundizar, pero, la demanda de los vehículos eléctricos se espera que aumente cada vez más, por lo que debemos proporcionar respuestas a todas las incógnitas lo más rápido posible.

Mientras que en el mercado siguen vendiéndose vehículos eléctricos, es fundamental que los esfuerzos de los investigadores se concentren en la seguridad de las baterías, pues a pesar de que la sociedad demande respuestas a cerca de la practicidad de estos vehículos como por ejemplo autonomía o envejecimiento de baterías, lo primordial en estos primeros pasos de esta nueva alternativa de movilidad es la seguridad.

Es por eso por lo que este trabajo va a tratar la caracterización de baterías cuando son sometidas a un abuso mecánico severo como es el punzonamiento de éstas. De esta manera lo que se pretende proporcionar son datos útiles que permitan avanzar en el desarrollo de grandes paquetes de baterías conociendo todos los posibles riesgos existentes y trabajando para que no supongan un peligro para el usuario final.

1.4 Viabilidad de proyecto

Para poder comenzar con este proyecto, es necesario estudiar la viabilidad de este, tanto económica, como técnica como humana. Mediante este estudio se pretende justificar que este proyecto es completamente realizable y puede llevarse a cabo.

Este proyecto se basa en unos experimentos realizados con anterioridad para los cuales se han empleado los recursos técnicos y económicos del Instituto de Investigación CMT-Motores Térmicos por lo que estos quedan totalmente cubiertos.

CAPÍTULO 1: Introducción

Dentro del apartado de recursos económicos, puede decirse que el presente proyecto no requiere de gran cantidad de financiación, pues los datos empleados, son fruto de experimentos realizados dentro del marco de la investigación de uno de los proyectos que desarrolla el instituto de investigación mencionado. De esta manera, los costes asociados a la parte experimental del proyecto, no serán considerados para el siguiente estudio de viabilidad. En cuanto al procesado de datos, el código ha sido desarrollado íntegramente para el procesado específico de estos resultados y puesto que ha sido elaborado dentro del mencionado instituto de investigación, no se le asocian ningún tipo de costes asociados a las licencias de uso.

En lo relativo a los recursos humanos, podemos asegurar que quedan cubiertos en su totalidad por el instituto de investigación, gracias a la colaboración tanto de alumnos como doctorandos, profesores y técnicos.

Finalmente, en cuanto a recursos técnicos se refiere, como ya se ha mencionado anteriormente, solo se tendrán en cuenta los relacionados con este proyecto de manera que ningún tipo de herramienta o equipo utilizados en los experimentos se tendrá en cuenta para el estudio de viabilidad de este proyecto. De esta manera, los recursos técnicos quedan reducidos a un ordenador personal, acceso a internet y a programas de procesado de datos que son operados gracias a las licencias estudiantiles que proporciona la UPV.

Debido a todo lo mencionado anteriormente, este apartado concluye asumiendo la viabilidad del proyecto.

1.5 Estructura

En el siguiente apartado se pretende describir la estructura del siguiente proyecto y justificar así la decisión tomada.

Para el proyecto se va a adoptar una estructura comúnmente usada en estos trabajos de investigación. Se va a dividir en tres documentos fundamentales: Memoria, pliego de condiciones y Presupuesto.

Para conseguir una correcta comprensión a cerca del trabajo, la memoria será dividida en seis capítulos. Con esta división se pretende exponer los motivos de la realización y proporcionar al lector unas bases de conocimiento necesarias para la correcta comprensión del proyecto. También se pretende explicar de manera concreta la realización de la parte experimental del proyecto y la posterior obtención y procesado de los resultados. Finalmente, también se expondrán las conclusiones obtenidas a raíz del mencionado análisis de los datos obtenidos.

En el primer capítulo, que es en el que nos encontramos actualmente, se ha hecho una descripción del proyecto y de los objetivos que persigue, así como la motivación detrás del mismo. También se han expuesto las investigaciones realizadas anteriormente, los antecedentes. Éstas si bien no son estrictamente necesarias para la realización de este proyecto, si pueden servir como validación de resultados o en caso contrario como marcadores de error.

Durante el segundo capítulo se va a realizar una contextualización en el marco de las baterías, la combustión de éstas y los diferentes mecanismos que existen para la caracterización. También se procederá a hablar brevemente de los diferentes tipos que existen, en función de su química.

CAPÍTULO 1: Introducción

En el tercer capítulo se procederá con la explicación de la parte experimental y del procesado de datos. Durante el mismo se realizarán descripciones tanto de la sala de ensayos como de los diferentes equipos empleados durante los experimentos. También se mencionarán los mecanismos de procesado de los datos, desde el código desarrollado para el procesado como modelos matemáticos empleados para la obtención de resultados.

En el capítulo cuarto se procederá a exponer los resultados obtenidos sobre los experimentos, lo cual puede considerarse la parte más importante del presente proyecto. En él se analizarán las variaciones de los resultados en función de las diferentes variables cambiantes de los experimentos.

El capítulo quinto, se basará principalmente en el capítulo anterior, puesto que será la exposición de las conclusiones obtenidas a raíz del procesado de datos de los experimentos descritos en el tercer capítulo.

En el sexto capítulo y final de éste primer documento se procederá a una revisión de las diferentes fuentes bibliográficas empleadas durante la realización de este proyecto.

Pasando al segundo documento, el pliego de condiciones, se explicarán los requerimientos concretos, tanto técnicas como legales para la correcta realización de este proyecto.

Finalmente, en el tercer documento, se presentará el presupuesto para la realización del presente proyecto. El presupuesto contendrá el cuadro de precios descompuestos y el presupuesto final del proyecto.

CAPÍTULO 2: Conceptos previos

2.1 Introducción

En este capítulo se procede a realizar una contextualización del vehículo eléctrico y las baterías en nuestra sociedad hoy en día. Así como una serie de conceptos previos a cerca de las baterías para la correcta comprensión del proyecto.

El capítulo se dividirá en cuatro partes en las cuales se distribuirá la información mencionada anteriormente.

En la primera parte del capítulo se realizará un análisis del uso del vehículo eléctrico en nuestra sociedad y de las baterías que emplean dichos vehículos. De esta manera se pretende explicar la necesidad de investigación en la seguridad de las baterías.

En la segunda parte del capítulo se procederá con una serie de explicaciones a cerca de la batería de litio, qué son, cómo están compuestas y cómo funcionan. Estas explicaciones no serán extremadamente profundas, pues como se ha comentado, el objeto del presente proyecto no es explicar el funcionamiento de las celdas si no el proceso de fuga térmica.

En la tercera parte del capítulo trataremos los tres principales tipos de baterías de litio que existen hoy en el mercado y se realizará una breve descripción de las características de cada una.

Finalmente, en la cuarta parte de este capítulo, se va a realizar una explicación a cerca del proceso de fuga térmica y los diferentes motivos por los que puede aparecer.

2.2 Contexto de los vehículos eléctricos en nuestra sociedad.

Vivimos en una sociedad que, cada vez más, demanda vehículos de propulsión eléctrica. Esto puede verse en la evolución de las ventas de vehículos eléctricos en los últimos años y podemos esperar que esta demanda siga creciendo debido a las estrictas políticas impuestas por la unión europea. En el siguiente gráfico, podemos observar los vehículos eléctricos de baterías matriculados en la unión europea en los pasados cuatro años (2019, 2020, 2021, 2022). En la gráfica, se aprecia un claro crecimiento del número de vehículos matriculados por año y como se ha comentado anteriormente, hoy en día, no hay motivos para pensar que esta tendencia no vaya a continuar en el tiempo.

Las siguientes gráficas, han sido construidas en función de los datos obtenidos de (ACEA, 2021) y (ACEA, 2022) .

CAPÍTULO 2: Conceptos previos

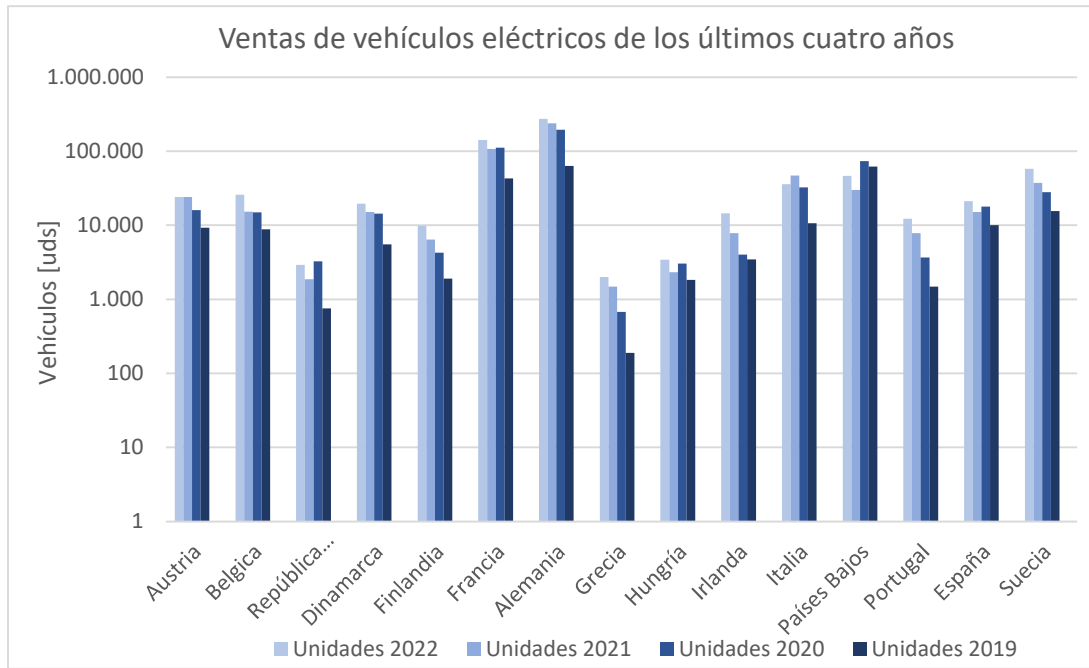


Figura 1. Ventas de vehículos eléctricos en los últimos cuatro años

A continuación, siguiendo con los datos publicados por ACEA, mencionados anteriormente, se puede observar como la matriculación de vehículos de combustión, ha perdido casi un veinte por ciento de unidades matriculadas por año, mientras que los vehículos con tecnologías eléctricas van ocupando poco a poco una parte importante del mercado.

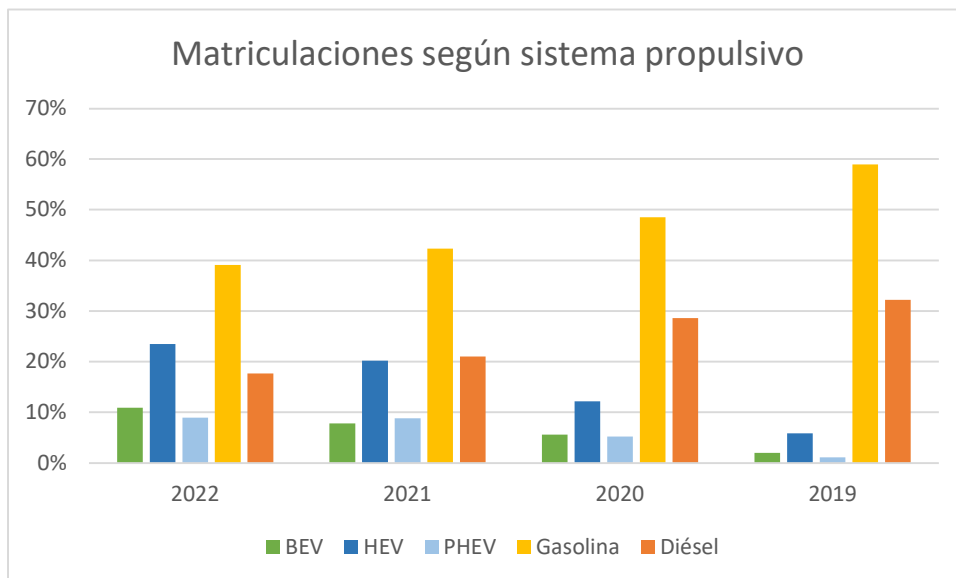


Figura 2. Matriculaciones según sistema propulsivo

Aunque no es el objeto de este proyecto, es importante para el contexto de los vehículos eléctricos mencionar que estas medidas de electrificación total del parque móvil, pueden ser cuestionadas hoy en día en lo que respecta a la reducción de emisiones contaminantes.

CAPÍTULO 2: Conceptos previos

Esto lo podemos observar en el estudio (García, Monsalve-Serrano, Martínez-Boggio, & Soria Alcaide, 2023) “Carbon footprint of battery electric vehicles considering average and marginal electricity mix”.

Debido a la predicción del aumento de la demanda de vehículos eléctricos, a continuación, se muestra una selección de las marcas más conocidas, extraídas de los cincuenta vehículos eléctricos más vendidos en 2022. El fin de este estudio es analizar y ubicar los diferentes tipos de baterías (según su química) que están hoy en día en las calles de las ciudades europeas.

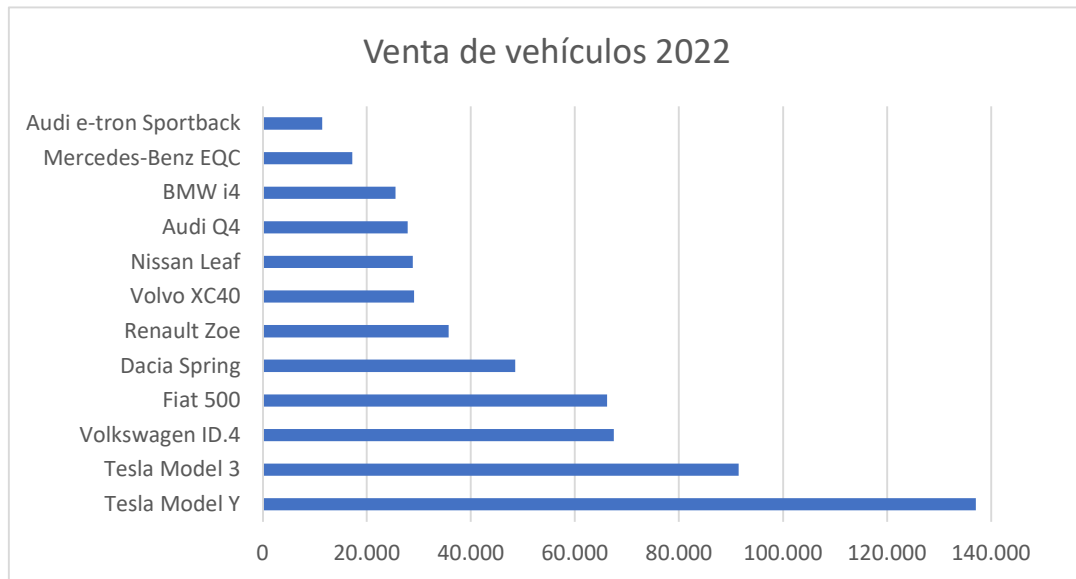


Figura 3. Ventas de vehículos en el 2022

Tabla 1. Química del cátodo según modelo de vehículo

| Vehículo | Química del Cátodo |
|-----------------------|--------------------|
| Tesla Model Y | NMC - |
| Tesla Model 3 | LFP |
| Volkswagen ID.4 | NMC - |
| Fiat 500 | NMC 662 |
| Dacia Spring | NMC 712 |
| Renault Zoe | NMC - |
| Volvo XC40 | NMC - |
| Nissan Leaf | NMC 523 |
| Audi Q4 | NMC 712 |
| BMW i4 | NMC 811 |
| Mercedes-Benz EQC | NMC 662 |
| Audi e-tron Sportback | NMC 622 |

(EV Database - Electric Vehicle Database, 2023)

CAPÍTULO 2: Conceptos previos

Dentro de esta selección encontramos más de medio millón de vehículos vendidos el pasado año y a excepción del vehículo “*Tesla Model Y*” que monta unas baterías de tipo LFP, la gran mayoría de las marcas apuestan por baterías de tipo NMC. Debido a esto, el presente trabajo tratará los resultados obtenidos de baterías con una química similar. Si bien no se pueden considerar exactamente iguales, puesto que como se puede observar en la *Tabla 1*, la proporción de los diferentes compuestos cambia, aunque esto, será explicado más adelante.

2.3 La batería de litio

Para poder hablar en este trabajo a cerca de las baterías de litio, es importante comprender antes una serie de conceptos como: qué es una batería de litio, qué partes la conforman y cómo es su funcionamiento.

En primer lugar, hablaremos a cerca de lo que es una batería de litio. En esencia, no deja de ser un elemento de almacenamiento de energía eléctrica, pero, lo que las diferencia del resto y lo que les ha hecho ganar tanta popularidad en los últimos tiempos son sus características particulares. Entre las más destacables, encontramos su densidad energética, la cual, en comparación al resto de baterías recargables, permite almacenar mayor cantidad de energía en una menor cantidad de peso. Estas baterías no solo se usan en vehículos eléctricos como hemos visto anteriormente, si no que gran cantidad de dispositivos de hoy en día van equipados con ellas. Entre los dispositivos que las usan podemos encontrar desde teléfonos inteligentes, relojes inteligentes o vehículos eléctricos de movilidad personal. Esta gran versatilidad de las baterías de litio, es gracias a la multitud de geometrías en las que puede encontrarse este tipo de batería.

En el presente proyecto, se tratará con baterías de geometría cilíndrica, puesto que, son las más comunes de encontrar en el mercado, a pesar de que existan fabricantes de vehículos que decidan montar baterías prismáticas.

Es importante saber que las baterías que se van a estudiar, en el ámbito de la movilidad eléctrica, conformarían una parte del conjunto total del sistema de almacenamiento de energía de un vehículo. Es decir, los vehículos contienen paquetes de baterías interconectadas entre si a criterio del fabricante para proporcionar las características deseadas.



Figura 4. Batería LG
- INR18650

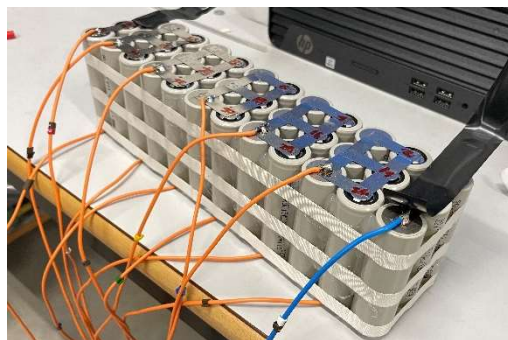


Figura 5. Módulo de baterías

En las imágenes se pueden observar lo que sería una batería o una celda, que se utiliza para crear los módulos de baterías, que se observa en la otra imagen.

La estructura de una batería cilíndrica de litio, se compone de diferentes láminas que, para aumentar la densidad energética, son enrolladas en torno a un núcleo. Basándonos en el funcionamiento básico, podemos diferenciar tres elementos fundamentales de la batería de litio.

CAPÍTULO 2: Conceptos previos

El cátodo es la parte de la batería donde los iones de litio (Li^+) se almacenan cuando la batería está descargada. Éste suele estar hecho de un material de óxido metálico, que varía según el tipo de batería de litio.

El ánodo es la parte de la batería donde los iones de litio se almacenan cuando la batería está cargada. El ánodo suele estar hecho de grafito o de un compuesto de silicio. Cuando la batería se carga, los iones de litio se mueven desde el ánodo hacia el cátodo, lo que carga la batería.

El electrolito es el medio a través del cual los iones de litio se mueven entre el cátodo y el ánodo. El electrolito suele estar hecho de una solución de sales de litio en una solución orgánica, aunque también pueden usarse electrolitos sólidos, esto depende del tipo de batería. El electrolito debe ser un material conductor de iones para permitir el movimiento de éstos, pero también debe ser lo suficientemente estable químicamente para no reaccionar con el cátodo o el ánodo.

Al margen de estas partes principales básicas para el funcionamiento, según cada fabricante también encontramos recubrimientos exteriores, terminales conectados a las láminas de cátodo y ánodo, anillos aislantes etc. (Mughees, 2023)

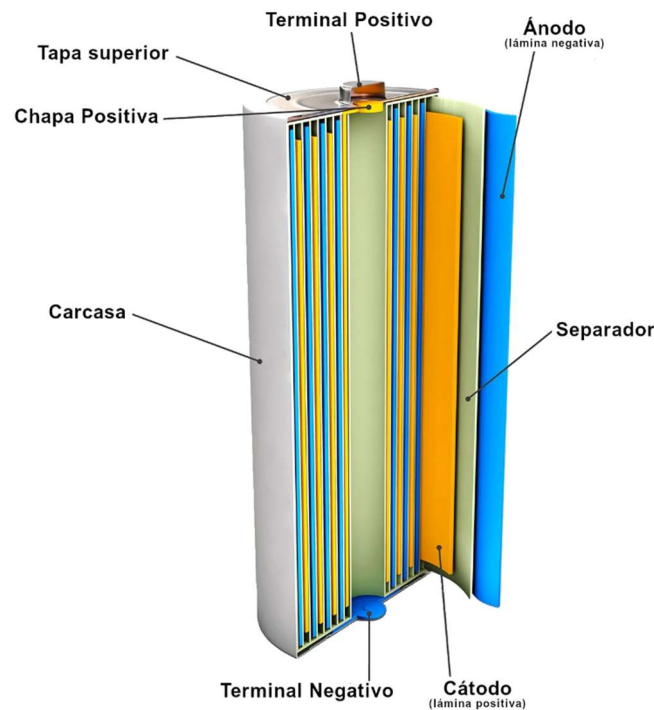


Figura 6. Estructura interna de la batería de litio

Finalmente, se va a explicar de forma sencilla como es el funcionamiento básico de una de estas baterías de litio. Éste se basa en el potencial electroquímico del litio y su alta tendencia a liberar un electrón, por eso las baterías de litio poseen, en comparación, una alta densidad energética (una tres veces más que las baterías de ácido y plomo).

En primer lugar, encontramos al litio en el cátodo, compuesto, como se ha mencionado anteriormente, por un óxido metálico. En él, queda almacenado dentro de la estructura de este el litio, alcanzando un estado de equilibrio. Cuando todos los iones se encuentran en el cátodo, no existe un flujo de electrones por lo que consideramos que la batería se encuentra descargada.

CAPÍTULO 2: Conceptos previos

Para realizar la carga, mediante una fuente externa, se provoca el desprendimiento de un electrón del litio, lo que genera iones libres, que, gracias al electrolito son capaces de llegar al cátodo donde quedan retenidos en una estructura generalmente de grafito.

Los electrones, por otra parte, también quedan atraídos por el ánodo. Cuando se satura el ánodo y cesa este flujo, se considera que la batería se encuentra cargada.

Este estado generado, no se trata de un estado estable, por lo que en el momento se proporciona un medio a los electrones para fluir hacia el cátodo, estos generan una corriente. Debido a esto, los iones son atraídos por el cátodo, lo que provoca una vuelta al estado de equilibrio inicial.

Las diferentes variaciones los materiales que conforman las diferentes partes de una batería, provocan cambios en esta reacción, lo que otorga a las baterías un comportamiento diferente según su composición.

2.4 Principales tipos de baterías de litio

En el mercado, existe gran variedad en cuanto a baterías de litio se refiere, pero, a continuación, debido a los cambios significativos que supone la composición del cátodo, se procederá a exponer los principales tipos de batería según este criterio. (Luoyang Tianhuan energy technology Co., 2022)

2.4.1 Baterías NMC

Las baterías de litio de tipo NMC, son las más comúnmente utilizadas en la industria del vehículo eléctrico. Esto es principalmente debido a su gran densidad energética, la cual, en comparación al resto de baterías de litio, es considerablemente superior. Las siglas NMC hacen referencia directamente a la composición del cátodo, que está compuesto por níquel, manganeso y cobalto la composición exacta de estas baterías varía según cada fabricante incluso modelo. Como se ha podido observar anteriormente en la *Tabla 1*, existen diferentes combinaciones de números que hacen referencia a la composición exacta de esta composición de níquel manganeso y cobalto.

Si bien, como hemos comentado, tienen una alta densidad energética, el precio a pagar tiene que ver con la seguridad. Las baterías NMC tienen una mayor liberación térmica cuando se les induce el fallo mediante un mecanismo de abuso, ya sea térmico, mecánico o eléctrico.

(Saritha, 25 Febrero 2022)

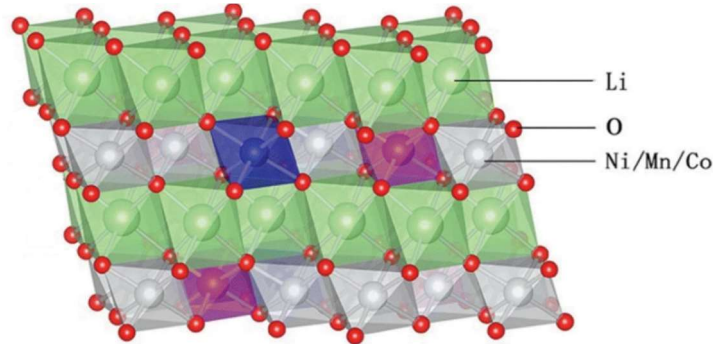


Figura 7. Estructura química NMC

2.4.2 Baterías NCA

Las baterías de tipo NCA, poseen un cátodo compuesto por una aleación de níquel, cobalto y óxido de aluminio. Si bien pueden parecer muy similares a las de tipo NMC, la variación en la composición del cátodo, las hace poseer diferentes propiedades.

Las baterías de tipo NCA, son baterías que tienen una densidad energética considerable, equiparable a las de tipo NCM, pero una vida media notablemente inferior. Una característica destacable de las baterías de tipo NCA, es su capacidad para la carga y descarga, que puede considerarse notablemente mayor que el resto de las baterías de litio.

Esto se debe a que, si bien su densidad energética es inferior a las de tipo NMC, su densidad de potencia es superior. También es importante mencionar la estabilidad que poseen este tipo de celdas ante cambios de temperatura, las cuales son capaces de asumir notables cambios de temperatura y mantener relativamente estables sus propiedades. Finalmente cabe mencionar que estas baterías, al igual que las de tipo NMC, tienen un coste de producción relativamente alto en comparación al resto.

2.4.3 Baterías LFP

Las baterías de tipo LFP, son una tecnología relativamente novedosa, siendo este uno de los motivos por lo que es poco utilizada en la automoción. Si bien este es uno de los inconvenientes de este tipo de baterías, no es el único, la densidad energética, es notablemente inferior a las baterías de tipo NMC, lo que nos las hace aptas para vehículos de altas prestaciones y aumenta el peso que hay que añadirles a los vehículos que planteen montarlas frente a unas de tipo NMC. No obstante, no todos son inconvenientes las baterías de tipo LFP, están compuestas de una aleación de litio y fosfatos de hierro (LiFePO_4), lo cual las convierte en un tipo de batería considerablemente más estable que las de tipo NMC y facilita en gran medida el reciclaje de estas. Sin embargo, esta estabilidad, proporciona un voltaje más estable durante la descarga de la batería, lo que dificulta el cálculo del **SOC** de la batería. A pesar de esto encontramos la vida útil de la batería dentro de las ventajas, puesto que es mayor a las de tipo NMC.

Finalmente, su precio, también juega a su favor, pues se trata de un tipo de batería con unos materiales más económicos que las de tipo NMC.

(Castro, 2010)

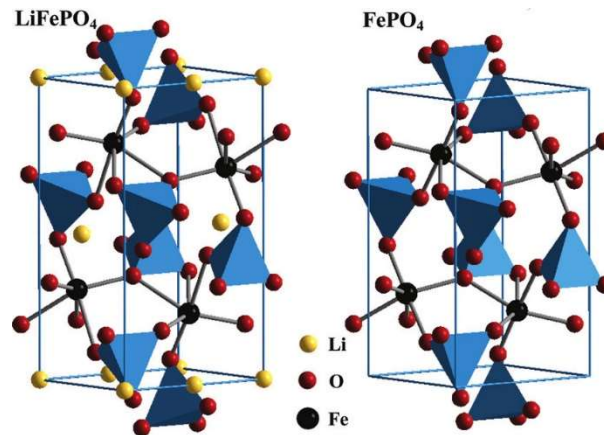


Figura 8. Estructura química LFP

2.5 Proceso de fuga térmica

La fuga térmica o más conocida por su denominación en inglés “*thermal runaway*”, es un proceso altamente exotérmico que, en función de la batería, puede llegar a ser extremadamente violento, provocando eyecciones de material del interior de la celda a muy altas temperaturas y en algunos casos, también explosiones.

El proceso de fuga térmica puede verse inducido por diversas situaciones, como por ejemplo cuando se sobre carga una batería, por cortocircuitos en la misma o defectos de fabricación.

En cualquiera de los casos posibles, generalmente siempre se puede reducir el fenómeno a tres tipos de abuso: mecánico, térmico y eléctrico. Sin ir más lejos en el ejemplo anterior, durante la sobrecarga de una batería, la energía que no puede ser almacenada se transforma en calor, el cual, aumenta la temperatura de la celda y en casos extremos puede llevar incluso a la evaporación del electrolito y dar lugar a la violenta reacción de oxidación de la batería.

El aumento de temperatura de una celda, producido por cualquier tipo de abuso comentado anteriormente, puede desembocar en consecuencias peligrosas, pues, un aumento muy excesivo, podría provocar la evaporación del solvente que actúa como electrolito o fundiendo los electrodos de la batería. Como ha sido demostrado en los estudios mencionados anteriormente. Estas acciones son el causante de la reacción en cadena de liberación de gases inflamables y aumento de la temperatura.

En resumidas cuentas, el proceso de fuga térmica, se trata de una reacción en cadena de liberación de calor y gases inflamables que elevan la presión y la temperatura de la celda pudiendo provocar como se ha comentado anteriormente incendios y explosiones.

En el presente proyecto se tratará con el abuso mecánico de las celdas, realizando un punzonamiento que inducirá la reacción de fuga térmica, este mecanismo de abuso, se trata de abuso mecánico. La descripción concreta de este proceso será detallada más adelante cuando se describan los procesos experimentales seguidos durante los ensayos. A modo de iniciación, este ensayo consiste en introducir la pila instrumentada en un recipiente y realizar un punzonamiento para poder medir y extraer datos del proceso fuga térmica.

2.6 Conclusiones

Tras desarrollar los diferentes apartados de cada capítulo, finalmente se espera haber proporcionado la información suficiente para la correcta interpretación del proyecto.

A lo largo de este capítulo se han ido nombrando características de las celdas a utilizar durante las pruebas experimentales y en esta conclusión, si bien no se profundizará, se expondrán las características principales que han quedado justificadas en este capítulo.

Si bien se han comentado los diferentes tipos principales de baterías, para los ensayos emplearán baterías cilíndricas de tipo NMC, que, como hemos visto anteriormente son muy comunes en el mercado del automóvil eléctrico. La batería tiene unas medidas de dieciocho milímetros de diámetro y sesenta y cinco milímetros de largo y ensayo utilizado para la caracterización de la fuga térmica será la penetración de aguja.

CAPÍTULO 3: Herramientas experimentales y teóricas

3.1 Introducción

En el siguiente capítulo se procederá con la descripción de las herramientas utilizadas para la obtención de datos del proceso experimental del proyecto. También es importante mencionar que, durante el desarrollo de este, se irá exponiendo la metodología a seguir durante el proceso experimental, como pueden ser configuraciones o protocolos de operación.

Ésta se realizará partiendo del conjunto a lo específico, es decir, comenzaremos con la descripción general del laboratorio y posteriormente pasaremos a focalizarnos en los equipos uno por uno. Para finalizar con el capítulo también se mencionarán las diferentes herramientas de software y teóricas empleadas para la obtención y procesado de resultados tales como funciones matemáticas para un correcto filtrado de datos para su graficado o el código desarrollado para este propósito.

3.2 Descripción de herramientas experimentales

En el laboratorio que se procede a describir en el siguiente apartado, se han llevado a cabo los experimentos para la obtención de los datos que se mostrarán posteriormente. Este laboratorio, se encuentra completamente equipado con todos los equipos necesarios para la obtención de datos en el ensayo de penetración de la batería.

3.2.1 Esquema de la sala de ensayos

A continuación, en el siguiente esquema, se muestra de manera simplificada, el montaje del laboratorio durante los ensayos. Mas adelante se expondrán de manera específica cada uno de los equipos.

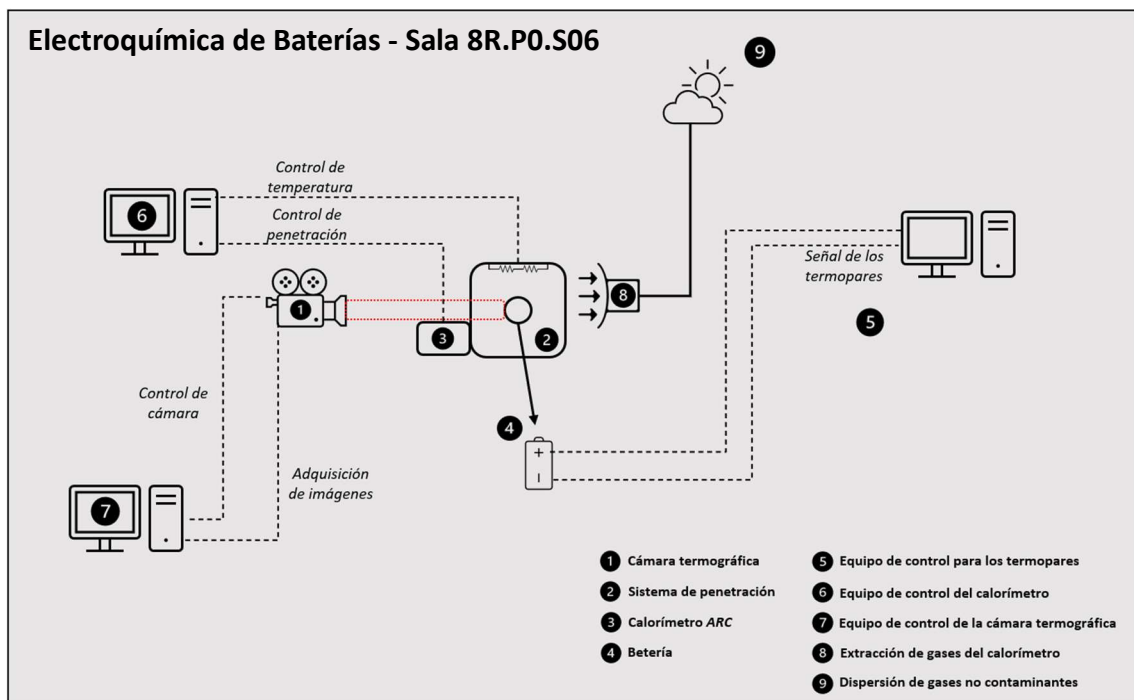


Figura 9. Esquema de sala de ensayos

3.2.2 La batería

Todos los ensayos realizados, han usado exactamente el mismo tipo de batería, variando determinados parámetros como puede ser el estado de carga y la temperatura ambiente del ensayo. La batería se trata del modelo INR18650 MH1 de la marca LG. Esta batería como se indica en el modelo, entra dentro del formato de celdas 18650, lo que hace referencia a sus dimensiones, las cuales se comentaron anteriormente, dieciocho milímetros de diámetro y sesenta y cinco de longitud. Respecto a la química de esta batería, posee un cátodo de litio, níquel, manganeso y óxido de cobre (LiNiMnCoO_2), lo cual la hace entrar en el apartado de baterías de litio NMC. Por otra parte, el ánodo está compuesto de grafito. El electrolito de la batería está compuesto por carbonatos orgánicos y hexafluorofosfato de litio (F_6LiP). Continuando con las características generales de la batería otorgadas por el fabricante, encontramos un peso de cuarenta y nueve gramos, un voltaje nominal de 3,67V y una capacidad nominal de 3.2 Ah. Encontramos también una corriente de carga pico de 3.1A y de descarga de 10^a. La batería posee una energía total de 11.7Wh y un rango de temperaturas de operación entre los veinte grados bajo cero y los sesenta grados centígrados. Dados estos límites de temperaturas, se estudiará el efecto bajo una temperatura cercana al límite superior de operación frente a una temperatura ambiente de veinte grados. A modo de resumen, a continuación, se muestra la tabla que recoge todas las características del fabricante a cerca de la batería.

Tabla 2. Características generales de la batería

| | |
|---|------------------------|
| Batería | LG - INR18650 MH1 |
| Formato | 18650 |
| Cátodo | LiNiMnCoO_2 |
| Ánodo | Grafito |
| Electrolito | F_6LiP |
| Dimensiones [mm] | 18.3x65.0 |
| Peso [g] | 49 |
| Voltaje Nominal [V] | 3.67 |
| Capacidad Nominal [Ah] | 3.2 |
| Corriente de carga Continua/Pico [A] | 1.55/3.1 |
| Corriente de descarga Continua/Pico [A] | 0.62/10.0 |
| Capacidad energética [Wh] | 11.7 |
| Agujeros de venteo | 3 |
| Voltaje SOC 100 [V] | 4.2 |
| Voltaje de corte | 2.5 |
| Rango de operación [°C] | -20 a 60 |

3.2.3 Sistema de carga de la batería

En el siguiente apartado, se expondrán las diferentes herramientas y equipos empleados para la carga de la batería. Puesto que, la parte experimental del presente proyecto incluye baterías en estados de carga (SOC) diferentes al 100%, es necesario disponer de equipos capaces de asegurar de manera precisa estas condiciones de la batería que se va a emplear. Para cumplir con las condiciones la marca elegida ha sido “**Arbin Instruments**”, la cual posee una amplia gama de productos enfocados al trabajo de laboratorio con baterías.

3.2.3.1 Fuente de alimentación bidireccional

En primer lugar, es importante aclarar cuál es el uso de una fuente de este tipo. Una fuente de alimentación bidireccional, se trata de un equipo capaz de servir como fuente de energía y como carga. En otras palabras, la fuente es capaz de proporcionar una corriente y un voltaje determinado a una determinada carga y también es capaz de recibir corrientes e intensidades actuando como carga. Si bien es cierto que existen fuente de alimentación bidireccionales de AC, en este proyecto únicamente se abordarán las fuentes bidireccionales DC.

El equipo elegido se trata del modelo ARBIN LBT21 Series, el cual es un modelo configurable en base a las necesidades de cada laboratorio. La marca ofrece hasta quince configuraciones diferentes con resolución de 24 bits que permite hacer análisis más precisos que con otros equipos. En el caso concreto del laboratorio empleado en este proyecto, dicha fuente posee cuatro canales equipados con sistemas auxiliares de medición de voltaje, lo que permite una medida mucho más precisa. Si bien este auxiliar permite una medida más exacta del voltaje, es necesario un equipo especial de la propia marca para poder aprovechar todo el potencial del equipo. Esta herramienta será expuesta más adelante en este mismo capítulo. La fuente también posee un sistema de medición de temperaturas mediante termopares, los cuales pueden ser Tipo-K o Tipo-T. La ventaja de usar el propio sistema de la fuente es la sincronización de datos que se obtiene la cual facilita en gran medida el procesado de datos. Si bien esta característica es muy útil para determinados experimentos, n es imprescindible para el proceso de ciclo de carga que se va a emplear para el acondicionamiento de la batería.

A través del software que acompaña a este dispositivo, se pueden programar infinidad de ciclos de cualquier tipo para realizar experimentos en baterías. En el caso del presente proyecto, se va a realizar un proceso de carga CCCV, que será explicado más adelante dentro de la parte relacionada con las herramientas teóricas del proyecto. Las celdas que deben encontrarse en un estado de SOC determinado diferente al 100%, se someterán un simple ciclo de descarga con corriente continua. Una vez más, el proceso de descarga, se explicará más adelante como se ha mencionado anteriormente con el proceso de carga.



Figura 10. Fuente bidireccional

3.2.3.2 Soporte de carga de la batería

Como se ha comentado anteriormente, para la obtención precisa de datos a través de los canales auxiliares de medida, son necesarias herramientas a la altura, que no interfieran en la medición. Para ello, la propia marca "Arbin Instruments" dispone de un soporte de baterías (*Battery Holder*). Estos soportes de baterías disponen de un preciso sistema de medición de voltaje independiente, que permite realizar la conexión directa entre los terminales auxiliares de medida de precisión de voltaje y la batería. Estos soportes están diseñados para celdas de tipo cilíndricas de diferentes tipos. Su diseño nos ha permitido la utilización del soporte en múltiples proyectos gracias a su capacidad de adaptación a diferentes modelos, la cual cubre prácticamente todos los modelos comerciales más conocidos, teniendo un límite de longitud de 120mm y un diámetro máximo de 35mm. A continuación, en las siguientes imágenes se muestran en primer lugar el soporte al completo junto con una de las celdas que se va a emplear en el proyecto y posteriormente, al detalle el sistema de toma de medidas de voltaje del soporte.



Figura 11. Soporte de baterías

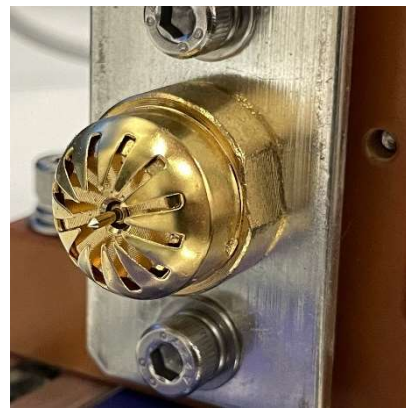


Figura 12. Detalle, conector del soporte

3.2.4 Equipo del calorímetro

En el siguiente apartado se procede con la explicación de los diferentes elementos del calorímetro empleados en los experimentos. Si bien se trata de un conjunto de equipos de la misma marca diseñados para trabajar en conjunto, se va a tratar en diferentes apartados para poder realizar una descripción concreta de cada uno sin lugar a la confusión.

3.2.4.1 Calorímetro

Las pruebas que se realizan en el presente proyecto, requieren de unos equipos específicos entre los que se hace indispensable un calorímetro. La marca elegida en este caso se trata de *THT (Thermal Hazard Technology)*. Esta marca dispone de un conjunto de muy completo de productor orientados a los ensayos de las baterías, entre los que toman un peso especial, los ensayos destructivos.

CAPÍTULO 3: Herramientas experimentales y teóricas

El modelo elegido se trata del “*EV+Accelerating Rate Calorimeter*” (ARC), que se trata de un conjunto de dispositivos tales como el calorímetro, un contenedor de seguridad con sistema de ventilación donde alojarlo, el sistema de adquisición de datos, diferentes tipos de sensores como presión o temperatura y un equipo para realizar ensayos de penetración adaptado al propio calorímetro.

Puesto que el presente proyecto se basa en los ensayos de penetración de aguja, este equipo es el más adecuado para el proyecto, no obstante, como se ha comentado anteriormente, el dispositivo de penetración será explicado más adelante.

El calorímetro ayudará a la contención de la violenta reacción exotérmica producida durante los ensayos de penetración y en determinados ensayos es usado para la toma de diferentes medidas, puesto que el calorímetro, como se ha comentado, posee diferentes instrumentos de monitorización que lo permiten.

Una de las funciones principales para las que puede ser empleado este calorímetro es para la medición del calor liberado en reacciones exotérmicas, gracias a las condiciones de contorno adiabáticas que proporciona. Mediante la medición de la presión y la temperatura durante el ensayo que lo precise, se permite obtener medidas de calor liberado en las diferentes reacciones que se lleven a cabo en su interior. Este, soporta presiones máximas de hasta 200 bar y 315°C. El calorímetro viene equipado con ocho calentadores que son capaces de proporcionar una temperatura de 200°C con un incremento de 0.02°C/min. Esto permite realizar multitud de ensayos a parte del que se va a llevar a cabo en este proyecto como por ejemplo un ensayo HWS (*Heat Wait Seek*) en el que se lleva a la batería a temperaturas extremas. También el calorímetro dispone de seis termopares para medida, control y seguridad del propio equipo. La resolución de las medidas de presión del equipo, son de 0.005 bar y poseen una precisión del 0.02%.

Gracias a las características del equipo, se podrán realizar ensayo a diferentes temperaturas ambiente, puesto que, como se ha comentado anteriormente, los calentadores del dispositivo disponen de gran precisión, lo cual disminuye la variabilidad de las condiciones de contorno de cada ensayo. En el propio calorímetro, se han realizado una serie de modificaciones específicas para permitir realizar experimentos empleando tecnología termográfica mediante cámaras dedicadas a ello situadas en el exterior. Si bien el calorímetro ya disponía de un orificio para poder visualizar el interior, se decidió modificar la ventana original para implementar un nuevo cristal de zafiro para una mayor calidad de los resultados.

A continuación, se muestra una representación del montaje de la nueva ventana en el calorímetro junto con la explosión de esta, obtenidas a través del modelo de diseño realizado.

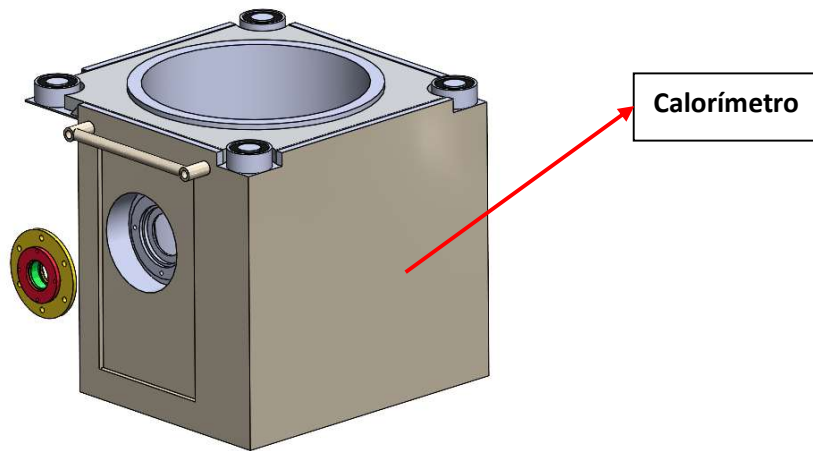


Figura 13. Representación del calorímetro

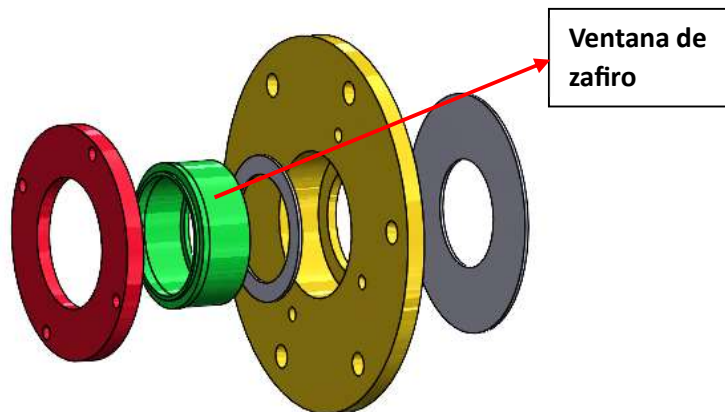


Figura 14. Detalle ventana calorímetro

3.2.4.2 Equipo de penetración

El sistema que se va a describir a continuación es el encargado de realizar la perforación en la batería durante los ensayos del presente proyecto.

El dispositivo que se va a emplear, como se ha comentado anteriormente es de la misma marca que el calorímetro ya descrito. Concretamente se trata del modelo "NPCOcs" de sus siglas en inglés, penetración de aguja y aplastamiento con velocidad controlada. La importancia del control sobre la velocidad de la aguja reside en las posibles variaciones de las reacciones que podrían verse influidas por una penetración altamente agresiva de hasta 100mm/s. El rango de velocidades del dispositivo, varía desde 1mm/s hasta los mencionados 100mm/s.

El equipo viene acompañado de cinco agujas de acero de diferentes durezas las cuales pueden ser cambiadas en función de la celda sobre la que se vaya a trabajar. El motor eléctrico que monta el dispositivo, es capaz de ejercer hasta 26.5kN, lo cual, asándonos en ensayos anteriores realizados en el departamento, cumple holgadamente los requisitos que la batería del proyecto solicita.

El sistema de penetración, también viene acompañado por un soporte interior el cual se atornilla al calorímetro para poder realizar la penetración. A continuación, se muestra una figura donde se muestra el montaje completo del dispositivo.

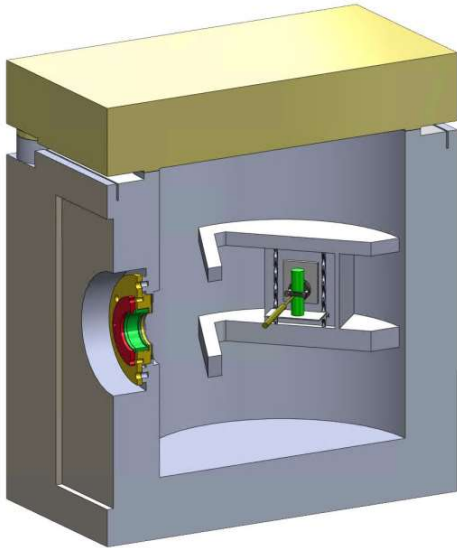


Figura 15. Representación de montaje

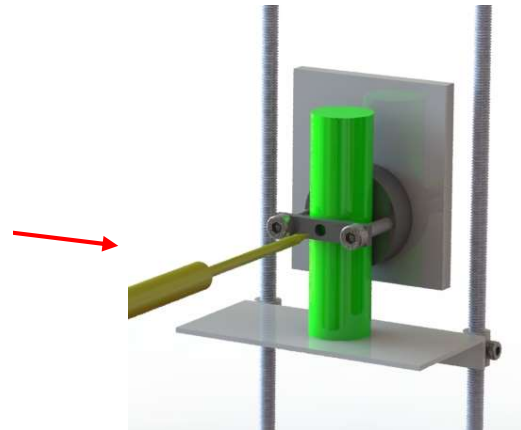


Figura 16. Detalle de montaje

3.2.5 Equipo termográfico

En el siguiente apartado, se va a proceder con la explicación del sistema termográfico empleado para el presente proyecto. El apartado se subdividirá en diferentes partes. La primera de éstas, estará enfocada a la descripción de las cámaras empleadas y a sus características generales. Por otra parte, se encontrará una segunda parte enfocada a la configuración y el método de obtención de datos de las cámaras para estos ensayos.

3.2.5.1 Cámara termográfica

La cámara termográfica será un instrumento fundamental para la toma de medidas por lo que es necesario seleccionar el material cuidadosamente, de manera que se adapte a las necesidades del ensayo a realizar. Para presente proyecto se seleccionó la marca "TelOps", concretamente se seleccionó un modelo de la familia de "Fast IR". Mediante el uso de esta cámara termográfica de alta velocidad, se podrá observar el fenómeno de venteo de los gases producidos por la reacción altamente exotérmica y podrán observarse las diferentes distribuciones de temperaturas en la batería.

Al tratarse de una reacción tan violenta, es necesario emplear sistemas de adquisición de datos lo suficientemente rápidos para no perder información. Con esta gama de cámaras, se podrá obtener una tasa de adquisición de imágenes de hasta 100 000 Hz con una resolución de 64 x 4 píxeles. No obstante, empleando la resolución máxima de 320x256 píxeles, la cámara es capaz de captar imágenes con una tasa de 3100 Hz. Para el presente proyecto, la cámara tendrá una tasa de adquisición de datos de 2000 Hz.

También es importante mencionar que se debe tener una buena sensibilidad en cuanto a la detección de las temperaturas, puesto que, en determinados casos es importante estudiar la temperatura en las primeras fases donde se pasa de pequeños cambios a incrementos considerables. Para ello, la cámara empleada es capaz de detectar diferencias de incluso 0.018 K, lo cual la hace encajar en la aplicación del presente proyecto.

El dispositivo termográfico se encuentra montado en una estructura de aluminio, desarrollada para ajustarse a las características del calorímetro comentado anteriormente, permite la regulación de éste para poder conseguir un buen encuadre de la imagen, aunque posteriormente se pueda ajustar la imagen desde la propia cámara. A continuación, se muestra una imagen del montaje sobre la estructura mencionada.

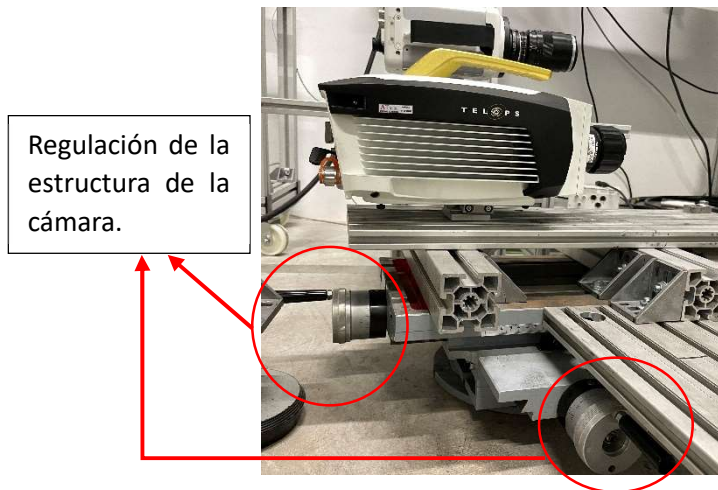


Figura 17. Montaje de cámara termográfica

Finalmente, la cámara será operada desde un ordenador externo equipado con el software de control de manera que, la toma de imágenes no se encuentra sincronizada automáticamente con el software de control del equipo de penetración, por lo que, será necesaria la intervención humana para llevar a cabo la toma de datos. Por seguridad, el equipo de control de la cámara, se encuentra a una distancia prudencial, suficiente para evitar cualquier tipo de riesgo derivado del ensayo.

3.2.5.2 Métodos de obtención de datos

Para la obtención de datos a través de la cámara termográfica, es necesario establecer una serie de configuraciones que a continuación se van a mostrar. Estas configuraciones, o “mascaras” facilitarán el trabajo para poder interpretar los datos, separarlos e identificarlos según donde se encuentren.

Como se ha comentado anteriormente, la adquisición de imágenes se va a configurar en 2000Hz. Cada una de estas imágenes, será distribuida en diez zonas, las cuales estarán distribuidas en orden descendente a lo largo de toda la pila. Mediante estas divisiones en la imagen, se procederá a calcular la temperatura media existente en cada una de las zonas. Posteriormente estas diez zonas serán procesadas y agrupadas de manera que se construirá una distribución espacial para cada una de las imágenes tomadas.

Esta sucesión de imágenes procesadas de esta manera, permiten generar una distribución temporal de la temperatura de la batería a lo largo del proceso de fuga térmica inducido por la penetración de la aguja.

CAPÍTULO 3: Herramientas experimentales y teóricas

A continuación, podemos observar cómo se lleva a cabo el proceso con una de las celdas ensayadas durante los experimentos. De izquierda a derecha, se pueden observar los pasos comentados anteriormente: primero la división en zonas, a continuación, la distribución espacial y finalmente la sucesión de distribuciones espaciales que conforman a distribución temporal.

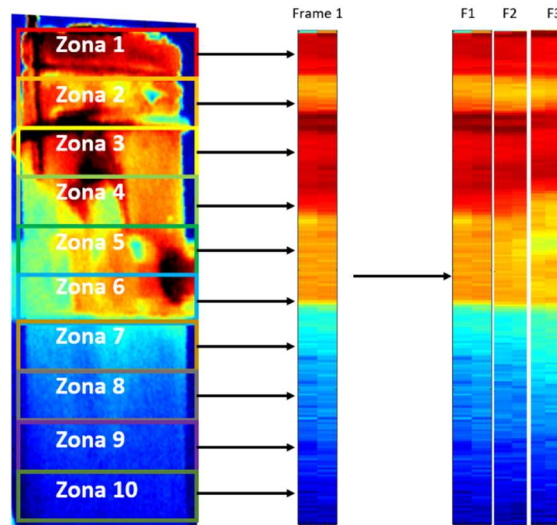


Figura 18. Procesado de imágenes termográficas

Para finalizar este apartado se procede a mostrar un ejemplo de la distribución temporal de temperaturas que se obtiene siguiendo el procedimiento anteriormente descrito. El carácter de esta imagen es solo informativo, el análisis de éstas tendrá lugar más adelante.

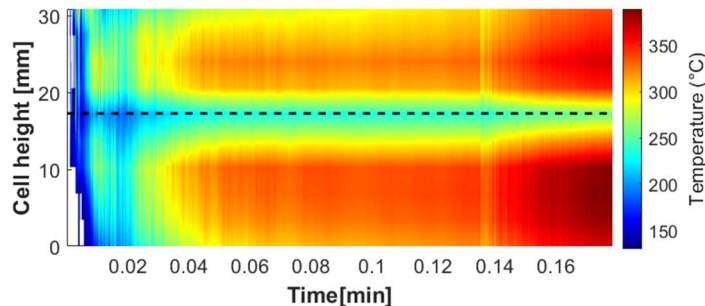


Figura 19. Distribución temporal de temperaturas (Ej.)

3.2.6 Equipos auxiliares

Para terminar con las herramientas experimentales empleadas, es necesario hacer una parada en el uso de termopares tradicionales. Si bien la termografía se trata de un método visual y efectivo, existen diferentes factores que pueden llegar a ser un inconveniente a la hora de realizar las mediciones a través de la cámara. Por plantear un ejemplo, se puede considerar que el venteo de materia de la batería hacia el exterior puede obstruir el campo de visión de la cámara y provocar alteraciones en las medidas. Como se ha comentado, esto se trata de un ejemplo y en el apartado final del presente documento, se evaluarán estos fenómenos si fuera necesario.

Para poder realizar una validación de los datos obtenidos por el método termográfico, se van a añadir dos termopares, los cuales se encuentran colocados a unos cinco milímetros de cada extremo de la batería.

CAPÍTULO 3: Herramientas experimentales y teóricas

Es importante mencionar que estos termopares, puesto que el método de toma de datos principal es la cámara termográfica, no podrán ir colocados con cinta resistente al calor, pues ésta, eliminaría gran parte del área de visión de la cámara en zonas que son sumamente importantes para las conclusiones del experimento. En su lugar, los termopares irán colocados en su lugar empleando un alambre común de acero, el cual es capaz de soportar temperaturas considerablemente elevadas y puesto que no estará expuesto a sollicitaciones mecánicas, no se hará mayor estudio a cerca de la selección de éste.

Los termopares anteriormente mencionados, irán conectados a un receptor de datos, cuya información será procesada posteriormente al ensayo mediante el programa principal empleado en el presente proyecto, *MatLab*.

En el esquema siguiente se puede observar la posición aproximada de los termopares anteriormente mencionados, colocados sobre la batería.



Figura 20. Esquema de montaje de termopares

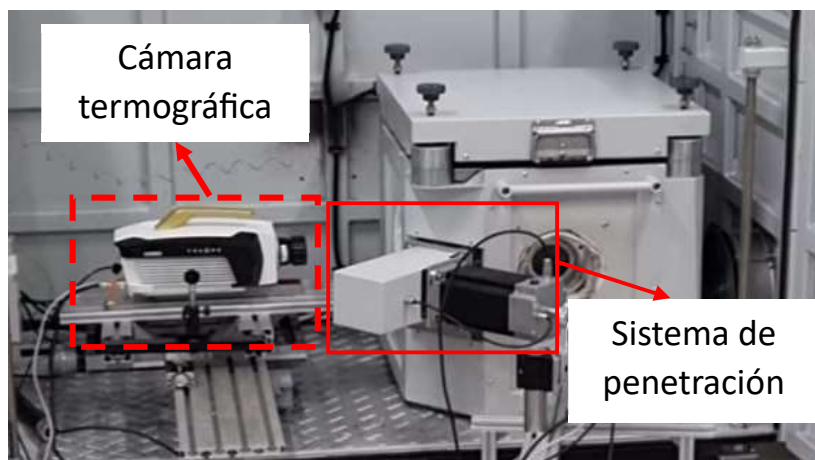


Figura 21. Montaje general del ensayo

3.3 Descripción de herramientas teóricas

En el siguiente apartado, se procederá con la explicación del proceso de obtención de resultados, así como métodos empleados en el acondicionamiento de las baterías. Concretamente se hablará a cerca de las operaciones necesarios para el cálculo de la liberación de calor de cada ensayo y del protocolo de carga que se ha empleado en las baterías para asegurar un estado de SOC determinado.

3.3.1 Protocolo CCCV

Como se ha comentado anteriormente, para los ensayos, se van a emplear baterías en dos estado de carga (SOC) diferentes. Tendremos baterías al 100% de su carga y otras que tan solo se encontrarán al 50%. Mas tarde en los resultados, se podrán observar las consecuencias de esto.

Para asegurar que una batería se encuentra cargada en su totalidad, es necesario emplear el protocolo CCCV, de sus siglas en inglés *“Corriente Constante Voltaje Constante”*. Como anteriormente se ha comentado, el quipo empleado en la carga de las baterías, se trata de la fuente bidireccional, la cual no se volverá a describir. El código programado para la carga de las baterías es asistido por la interfaz del software de la fuente de manera que los pasos seguidos, se comentan a continuación.

En primer lugar, comenzamos con una espera de un minuto antes de comenzar el proceso. A continuación, la fuente realiza una medición de la resistencia interna de la batería. Seguidamente, viene el inicio del proceso CCCV el cual queda configurado previamente con una condiciones que, durante la descripción del protocolo, serán mencionadas.

El protocolo CCCV comienza con una corriente hacia la pila con una intensidad constante, cuyo valor, se determinará en función de la capacidad de la batería, más concretamente, viene definido por la tasa de C de la batería. Para asegurar que la carga es lo más cercana a los valores del fabricante, es necesario realizar una carga a una velocidad moderada, por lo que, se realizará con una tasa de 0.5C. La tasa en este caso de carga, C, de una batería se refiere a la velocidad a la cual la energía carga o descarga la batería. Se expresa como un múltiplo de la capacidad nominal de la batería.

$$Tasa\ C = \frac{I_{Bat}}{C_{nom}} = \frac{I_{Bat}}{3.2Ah} = 0.5C \quad I_{Bat} = 1.6\ A \quad [1]$$

A medida que la batería va aumentando su capacidad, el voltaje de esta va aumentando también por lo que cuando se llega al máximo voltaje proporcionado por el fabricante, se pasa a mantener el voltaje constante mientras la corriente se disminuye progresivamente hasta un valor determinado que en este caso serán 50mA. De esta manera lo que se consigue es, mediante una integral de la intensidad, calcular la capacidad de la batería, que, es una medición directa para poder calcular el estado de carga de esta.

Una vez completado el primer ciclo de carga CCCV, para evitar un posibles estrés en la batería, se realizarán varios ciclos de carga-descarga, empleando una tasa C, como ya hemos visto baja. La tasa C, se calcula de la misma manera para la carga y la descarga con la diferencia de ser, en durante la carga, una corriente hacia la batería y en la descarga la batería es quien proporciona la corriente. El proceso de descarga es algo más sencillo, pues, simplemente, la fuente consumirá una corriente determinada por la tasa de C que hayamos configurado hasta que llegue a su

voltaje mínimo, donde se iniciará un descanso para evitar sobrecalentamientos y se procederá con un nuevo ciclo CCCV.

En el siguiente gráfico, se encuentran representadas las curvas de corriente y voltaje seguidas durante nuestro proceso de carga CCCV. También podemos encontrar diferentes anotaciones a cerca de los pasos que se van siguiendo.

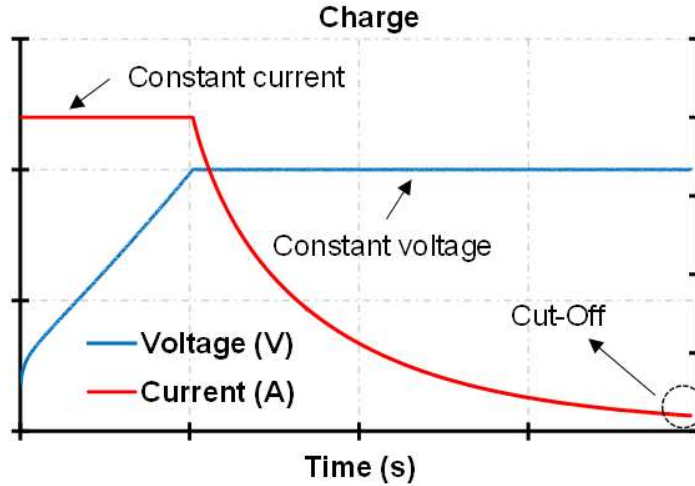


Figura 22. Gráfica de carga CCCV

Una vez explicado el protocolo de carga completa de a batería, es necesario explicar el método para poder asegurar una descarga concreta de la batería. En nuestro caso, la descarga que necesitamos hacer es del 50% de la batería. Basándonos en las fórmulas expuestas anteriormente, podemos determinar un modelo de descargar de las baterías que nos asegure las condiciones que buscamos proporcionar a la celda.

Este proceso, se trata de un método simple que tiene en cuenta la tasa de descarga C y la capacidad de la batería. Como se ha explicado anteriormente, la batería posee una capacidad igual a su capacidad nominal de manera que una descarga empleando una tasa de C de uno tardaría una hora en descargar al completo nuestra batería, pues, consumiríamos los Ah de los que dispone ésta.

Sabiendo esto, se puede deducir que, empleando una tasa de C de uno, durante un tiempo de treinta minutos, obtendremos un consumo del 50% del SOC de la batería, puesto que habremos consumido la mitad de la capacidad de ésta.

Como se ha explicado, el estado de carga de una batería, no deja de ser una relación entre la capacidad nominal de la batería cuando se encuentra totalmente cargada y la capacidad disponible en un momento determinado del tiempo, por lo que a través de las siguiente fórmulas, se corrobora la hipótesis comentada.

$$Tasa\ C = \frac{I_{Bat}}{C_{nom}}; \quad C = 1 \rightarrow I_{Bat} = 3.6A \quad [2]$$

$$SOC(\%) = \frac{C_{bat}}{C_{nom}} \times 100; \quad C_{bat} = I \times t; \quad [3]$$

$$SOC(\%) = \frac{3.6A \times 0.5h}{3.6Ah} \times 100;$$

$$SOC(\%) = 50\%$$

3.3.2 Cálculos varios

3.3.2.1 Cálculos de liberación de calor en la pila

Durante los ensayos realizados, un parámetro fundamental que se busca obtener es la liberación de calor de la batería durante su proceso de fuga térmica para posibles trabajos asociados a estos resultados que serán expuestos más adelante.

Para determinar la liberación de calor producida durante el proceso de fuga térmica se emplearán cálculos básicos de la ingeniería térmica empleando parámetros como la capacidad calorífica de la celda, C_p , puesto que debido a las presiones que se pueden alcanzar, este ensayo no se realiza en un entorno hermético, por lo que se considera presión atmosférica.

Uno de los datos que se obtiene del calorímetro es la tasa de temperatura, que nos indica la variación que sigue la temperatura instantáneamente a lo largo del tiempo. Junto a esto y al resto de parámetros, podemos calcular la liberación de calor a través de la siguiente fórmula:

$$\dot{Q}_{gen} = \int_{t_0}^{t_f} mC_p dT/dt \quad [4]$$

El término de masa de la ecuación, se obtiene mediante una medición directa previa al ensayo. Durante el ensayo, existe liberación de masa del interior de la batería en forma de materia eyectada a alta temperatura. A pesar de ello, estas partículas eyectadas por el fenómeno conocido por su nombre en inglés “venting”, debido a que no salen del calorímetro, puede considerarse que, durante el experimento, no existe variación de masa. Posteriormente al experimento, si se realizará una segunda medida de la masa de la propia celda para así poder estimar la eyección de masa durante el proceso de fuga térmica inducida por la penetración. En futuros trabajos sería posible implementar el ensayo en un recipiente hermético para monitorizar la presión y de esta manera sería posible calcular cuanta masa está siendo eyectada en cada momento. Estos cálculos, ya han sido realizados en otros experimentos del departamento.

El cálculo de la capacidad calorífica de la batería se ha obtenido de los resultados de unos experimentos realizados previamente en el departamento, debido a ello, el proceso se explicará más adelante.

Finalmente, la derivada de la temperatura respecto del tiempo es una medición que proporciona directamente el calorímetro, de manera que cerramos todos los datos necesarios para calcular la liberación de calor de la batería.

3.3.2.2 Capacidad calorífica

La caracterización de una batería en términos de calor específico, es fundamental para los ensayos se realizan en este proyecto, puesto que es fundamental para el cálculo de la energía térmica liberada, que como se ha comentado, es algo fundamental. Si bien es posible obtener estos datos de la literatura científica como, por ejemplo, las publicaciones mencionadas en el apartado de antecedentes, dentro del departamento de CMT- Motores Térmicos, se han realizado varios ensayos para corroborar estos valores.

El método empleado para la realización de estos ensayos será brevemente descrito a continuación, puesto que se trata de un método muy directo, experimentalmente hablando.

CAPÍTULO 3: Herramientas experimentales y teóricas

El ensayo, fue llevado a cabo también en el mismo calorímetros que se emplea para las pruebas de penetración en el presente proyecto. Al tratarse de un equipo completo, no solo permite realizar un solo tipo de ensayo, por lo que, para el experimento del cálculo de la capacidad calorífica, se empleó un proceso de “HWS”, del inglés *Heat Wait Seek*. Este proceso a diferencia de un calentamiento convencional realiza paradas después de cada paso en el calentamiento, de manera que es capaz de detectar cuando el experimento que se está llevando a cabo en ese momento, comienza a ser exotérmico. De manera que permite realizar ensayo con gran precisión, aunque en determinadas situaciones puede suponer un mayor tiempo en los ensayos. (CO2 - Circle Lab, 2023)

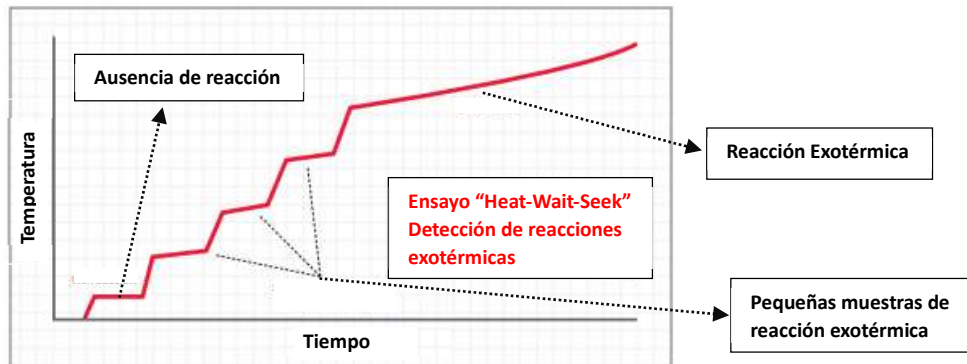


Figura 23. Metodología "HWS"

Como se puede observar en el gráfico anterior, existen zonas en las cuales la temperatura permanece estable, en el tiempo. Durante el reposo del calorímetro entre cada paso de calentamiento, podemos determinar si la reacción libera calor o no, en función de la sensibilidad que se le establezca al calorímetro.

Siguiendo esta característica, una manera de determinar la capacidad calorífica de un elemento desconocido cualquiera, es mediante la comparación entre un elemento ya caracterizado y el que se quiere averiguar. Para ello se hará uso de unas ecuaciones de transferencia de calor, que ya han sido vistas anteriormente.

El objetivo se basa en provocar un calentamiento determinado dentro del calorímetro, en el cual, se ha colocado un elemento de referencia completamente caracterizado y el elemento que queremos caracterizar, en este caso una batería de litio (*LIB*) de tipo 18650. Estos elementos se instrumentan mediante termopares de manera que se pueda medir la temperatura de cada uno de los elementos.

Tras poner el calorímetro en marcha e iniciar el calentamiento, puesto que uno de los elementos se encuentra completamente caracterizado e instrumentado, se puede saber la liberación de calor real que está realizando el calorímetro. Puesto que el calorímetro proporciona un entorno fundamentalmente adiabático, el calor liberado por el calorímetro provocará un aumento de la temperatura en los elementos, en función de su capacidad calorífica. Puesto que el parámetro que se necesita calcular, es proporcional al incremento de temperatura sufrido, y este está siendo obtenido a través de los termopares, se puede hallar la capacidad calorífica de la batería de forma experimental.

Una vez dicho esto, se pasa a exponer las ecuaciones que ilustran la explicación anterior.

De manera general:

$$Q = mC\Delta T \quad [5]$$

$$Q_{ref} = m_{ref}C_{ref}\Delta T_{ref} \quad [6]$$

$$Q_{LIB} = m_{LIB}C_{LIB}\Delta T_{LIB} \quad [7]$$

$$Q_{ref} = Q_{LIB} \quad [8]$$

$$Q_{ref} = Q_{LIB} = m_{ref}C_{ref}\Delta T_{ref} = m_{LIB}C_{LIB}\Delta T_{LIB}$$

$$C_{LIB} = \frac{m_{ref}C_{ref}\Delta T_{ref}}{m_{LIB}\Delta T_{LIB}}$$

Este elemento de referencia, en el caso concreto del ensayo que se ha comentado anteriormente se trató de un elemento de acero F114 Grado 45, de dimensiones conocidas (replicando las dimensiones de una batería de tipo 18650) cuya masa y capacidad calorífica es conocida ($m=129.78$ g; $C_p=473$ J/(kg °K)).

Si bien a continuación se pasa a exponer brevemente los resultados obtenidos en este ensayo, no se profundizará más en la metodología del ensayo puesto que no se trata del objeto principal del presente proyecto.

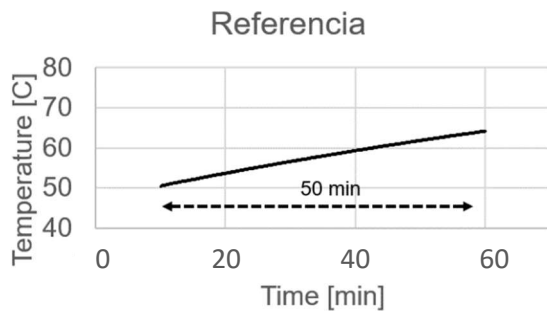


Figura 24. Gráfica calentamiento (REF.)

$$Q = m_{ref}C_{ref}\Delta T_{ref} \quad [9]$$

$$Q = 841 \text{ J}$$

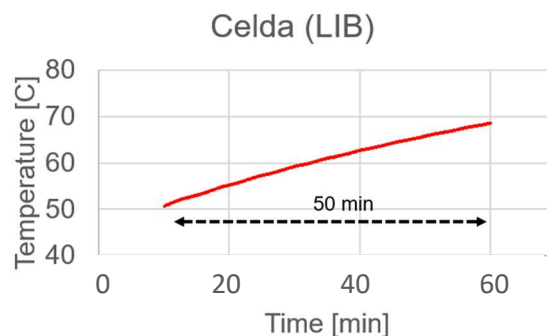


Figura 25. Gráfica calentamiento (LIB)

$$C_{LIB} = \frac{Q}{m_{LIB}\Delta T_{LIB}} \quad [10]$$

$$C_{LIB} = 1.110 \text{ kJ/kgK}$$

De esta manera, se ha expuesto la metodología de caracterización de la capacidad calorífica de la batería a emplear y se han corroborado los datos tomados de la literatura científica.

Para una mayor profundización en el tema será necesario dirigirse al trabajo completo de caracterización realizado, como se ha comentado anteriormente, en el propio departamento de combustión de CMT-Motores Térmicos.

3.3.2.3 Parámetros límite

Para el procesado de los datos y la exposición de resultados, es necesario establecer unos parámetros límite. En este caso, tomaremos como indicador principal la evolución instantánea de la temperatura, de manera que en función de los diferentes valores que adopte se tomarán los valores de temperatura asociados a éste para establecer límites en las diferentes etapas de la reacción de fuga térmica. Para el establecimiento de los siguientes límites se han tomado referencias de ensayos anteriores realizados en el departamento y valores referencia de la literatura mencionada en el apartado de antecedentes.

Uno de los valores importantes que se necesita conocer es la temperatura de inicio de la reacción, en este caso, puesto que se trata de ensayos a temperatura controlada, hablamos de la temperatura en el instante t_0 . A pesar de ello es importante establecer un criterio para poder realizar, si fuera necesario, comparación con otros ensayos. La temperatura de inicio de la reacción la se denominará T_{onset} y esta se tomará cuando el valor de la variación de temperatura supere un valor de $0.02 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, ($dT/dt > 0.02 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$).

Un dato fundamental para la seguridad de las baterías que se debe obtener en los ensayos, es la temperatura en la cual, la reacción se vuelve descontrolada y sin posibilidad de detener la liberación de calor. Esta, la denominaremos $T_{critical}$, y como se ha comentado establece la frontera del control de la reacción exotérmica. Para ello, como se ha comentado emplearemos un valor de la variación temporal de temperatura como indicador. En este caso, la variación que indica que hemos cruzado el límite del control de la reacción se trata de valores superiores o iguales a $100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, ($dT/dt \geq 100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$).

3.4 Conclusión

Este capítulo recoge todos los equipos empleados durante los procesos experimentales del presente proyecto se ha realizado una descripción de sus características básicas y de la manera en la que ha participado en los ensayos.

Finalmente, también se han expuesto las diferentes metodologías y fundamentos teóricos seguidos para alcanzar los estados necesarios para los ensayos y los resultados que se expondrán en el capítulo siguiente. También, se han comentado los diferentes límites establecidos para la obtención y la interpretación de los resultados.

CAPÍTULO 4: Resultados

4.1 Introducción

En el siguiente capítulo se van a exponer los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas con las baterías, en función de los diferentes estados iniciales de los ensayos. También se realizará una descripción del proceso experimental seguido hasta la obtención de los resultados, desde la preparación de las baterías hasta su almacenaje tras el ensayo. Si bien se va a proceder con una descripción del proceso experimental, no se profundizará en los equipos empleados puesto que estos han sido descritos anteriormente.

4.2 Descripción experimental

En primer lugar, se va a realizar una breve descripción del proceso a seguir antes de la obtención de los resultados, tal y como se ha expuesto en la introducción.

Antes del montaje de la batería sobre el soporte del calorímetro, se realizará una calibración de la cámara empleando una réplica de la batería fabricada en aluminio. Esta posee dimensiones idénticas a la celda que se va a emplear. A continuación, empleando un soplete se procede a calentar nuestra réplica y se ajustará la cámara para obtener una resolución óptima para el experimento.

Para el presente proyecto han sido empleadas las celdas descritas en capítulos anteriores, las cuales poseen un recubrimiento plástico de color azul, que podría dificultar las medidas tomadas con la cámara termográfica. Para solventar este problema todas las celdas que van a ser destruidas durante los experimentos van a pasar por un proceso de pintado empleando pintura en aerosol de color negro mate. De esta manera, será más sencillo el reconocimiento de la batería por parte de la cámara. Una vez pintadas, las celdas son pesadas.

A continuación, se procede a la colocación de dos termopares en las posiciones indicadas en el capítulo anterior. Como se comentó anteriormente la manera correcta de colocarlos es mediante alambres para evitar cubrir dentro de lo posible la superficie de la batería y obtener mejores medidas mediante la cámara termográfica.



Figura 26. Batería pintada color negro mate

Tras la preparación de la batería se procede a introducirla en el soporte del calorímetro habilitado para el punzonamiento. A continuación, se cierra el calorímetro y se preparan los equipos para iniciar el experimento. La cámara, previamente ajustada, se prepara a través del equipo auxiliar y mediante el equipo del calorímetro, se lanza el experimento.

CAPÍTULO 4: Resultados

Una vez lanzado el experimento se lanza la grabación de la cámara puesto que ambos equipos de control no se encuentran sincronizados. Una vez producido el punzonamiento y tras la evacuación de gases y enfriamiento de la batería, se procede a retirar la celda y se realiza de nuevo un pesado de la misma de manera que se pueda determinar la masa liberada durante el proceso de fuga térmica.

4.3 Resultados experimentales

A continuación, se va a proceder con la exposición de los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados. Todos ellos, suman un total de seis pruebas, las cuales se dividen en cuatro pruebas a un estado de carga (SOC), al 50% y dos pruebas con baterías con un estado de carga del 100%. Dentro de las pruebas con SOC=50%, se encontrarán tres pruebas con una temperatura ambiente de 20°C y otra de 50°C. Asimismo, con SOC=100% encontraremos una prueba con una temperatura ambiente de 20°C y otro ensayo a 50°C.

Los resultados serán expuestos individualmente y conformarán cada uno de los subapartados del presente capítulo. Los resultados se ordenarán de menor a mayor SOC y de menor a mayor temperatura, respectivamente. Los nombres de cada uno de los subapartados, indicarán las condiciones del ensayo y el número de este, distribuyéndose del uno al seis los números de los ensayos, siguiendo el criterio anteriormente mencionado.

Antes de comenzar con el análisis de resultados de los ensayos es importante comentar que en los gráficos obtenidos por la cámara termográfica que se van a exponer más adelante, se diferencia claramente una zona superior y una inferior, separadas siempre por una franja de color asociado a una menor temperatura. Esta franja de bajas temperaturas que se observa en el gráfico, se trata de la aguja empleada en el ensayo, que, al realizar la punción en el centro de la batería, provoca esta división entre zona superior e inferior.

4.3.1 Batería 1, SOC50, T20

La siguiente batería como se indica en el título del apartado, posee un SOC=50% y se va a realizar el ensayo con una temperatura exterior de 20°C.

La masa inicial de la batería es de 44.8g y tras la penetración y el enfriamiento, tenemos una masa de 23.9g, lo que supone una pérdida de masa del 46.65%. En el gráfico de a continuación se puede observar cómo evoluciona la tasa de temperatura frente a la temperatura medida por los termopares. Siguiendo los criterios límites, encontramos una temperatura crítica de 37.8 °C, temperatura a partir de la cual no es posible detener la reacción exotérmica.

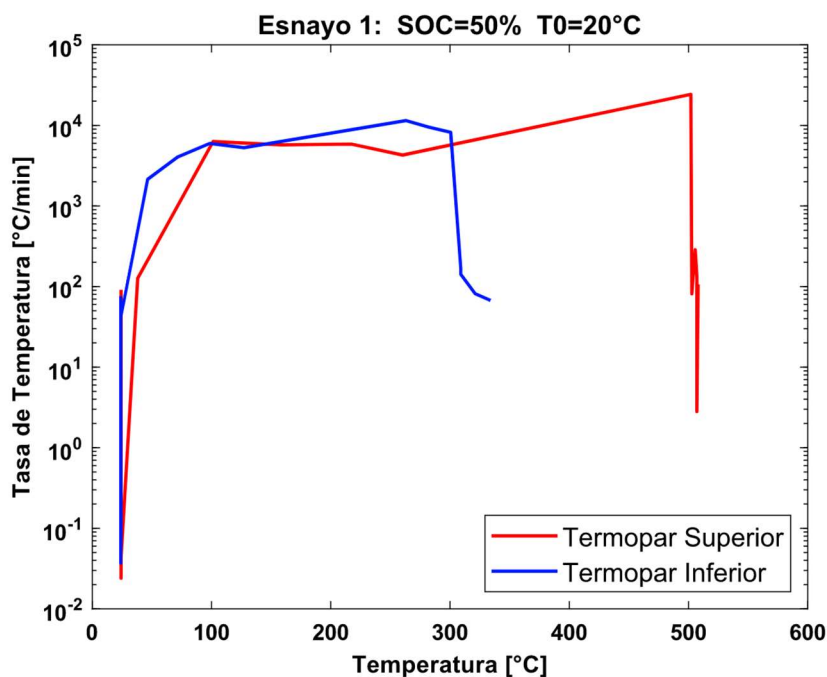


Figura 27. Tasa Temperatura vs Temperatura - Ensayo 1

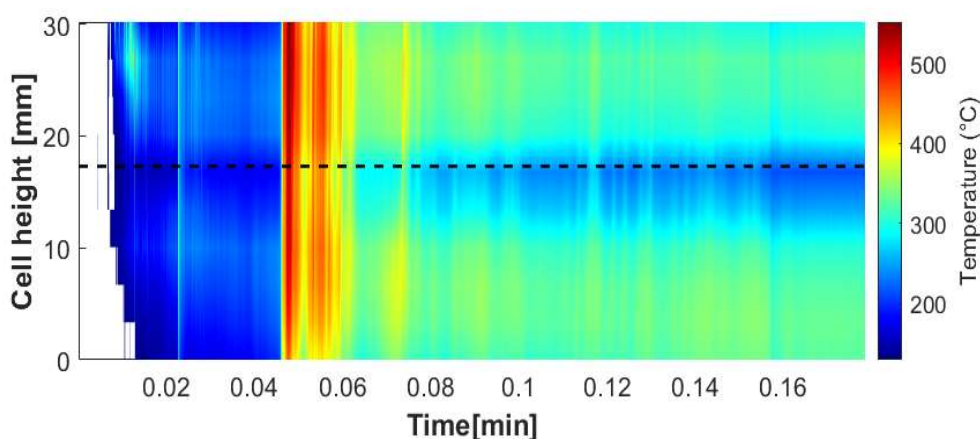


Figura 28. Distribución térmica - Ensayo 1

Si se observa la composición obtenida por la cámara termográfica, se aprecia como durante los segundos iniciales del ensayo, la batería comienza a sufrir un calentamiento relativamente uniforme, puesto la cámara termográfica, ha sido configurada para captar temperaturas a partir de los 130°C. De esta manera, si bien como se ha comentado anteriormente el dispositivo de penetración y la cámara termográfica no se encuentran sincronizadas, se consigue adquirir las mediciones directamente del proceso exotérmico. De esta manera se observa que, a este estado de carga, se produce un primer calentamiento de la batería, que da lugar a la parte más violenta de la reacción.

Puesto que todos los ensayos han seguido la misma ejecución, se encontrarán estas distribuciones de temperatura estables en todos los inicios del resto de experimentos por lo que el fenómeno no se explicará en detalle, si no que, se remitirá a la explicación que se ha dado.

CAPÍTULO 4: Resultados

Volviendo al análisis de los resultados de la penetración, se puede observar en la gráfica del termopar superior, la tasa de temperatura sigue una tendencia que se asemeja a una evolución exponencial que alcanza su máximo alrededor de los 480°C.

Si a continuación se evalúa la distribución de la cámara termográfica, se observa que esto sucede de manera violenta, puesto que si tomamos una referencia de inicio en torno a $t=0.045$ min, (el segundo 2.7 de grabación), antes de llegar al segundo 3.6 ($t=0.06$ min), ya hemos alcanzado el máximo de la temperatura. Esto, nos indica que, como se ha comentado anteriormente, la reacción es altamente exotérmica y violenta, puesto que en aproximadamente 0.3 segundos se ha obtenido una temperatura superior a los 500°C. De ahí ese pronunciado aumento que se observa en la tasa de temperatura al inicio de las gráficas de ambos termopares.

En la distribución espacial de la temperatura se puede observar que esta no es uniforme, antes de la destrucción de la batería y por tanto de la disminución de la temperatura a nivel general de la batería, observamos que el máximo de temperatura se encuentra en la parte superior de la batería, en las cercanías de su terminal positivo. Una de las razones por lo que podría suceder este fenómeno, es debido a que la penetración se ha realizado en la parte superior de la celda, como se indicará podrá ver más adelante.

Si se observa la gráfica de los termopares, encontramos que el termopar inferior de la batería sufre una caída abrupta la cual difiere del comportamiento seguido por el termopar superior.

Tras este ensayo, se pudo observar que la batería había sufrido grandes daños. El ensayo de penetración provocó la rotura de la carcasa cilíndrica de la batería, lo que se asocia también a un desprendimiento del termopar inferior. Esta hipótesis explica por qué este termopar obtiene esas medidas disonantes.

Finalmente se muestra el estado final en el que se encuentra la batería al finalizar este ensayo y refuerza la hipótesis del desprendimiento del termopar inferior.



Figura 29. Resultado final celda - Ensayo 1

Finalmente, en la siguiente tabla, se expone un resumen de los resultados obtenidos del siguiente ensayo. En ella se encuentra, por orden: estado de carga, masa inicial, masa final, temperatura de inicio de reacción, temperatura crítica, temperatura máxima, tasa de temperatura máxima y finalmente la energía liberada según la temperatura superior del termopar.

Tabla 3. Resumen de resultados primer ensayo.

| Ensayo | SOC (%) | M_init (g) | M_end (g) | T_onset (°C) | T_critical (°C) | T _{max} _{-sup} (°C) | T _{max} _{-inf} (°C) | dTdt_max (°C/min) | MHR (kJ) |
|--------|---------|------------|-----------|--------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|----------|
| 1 | 50 | 44.8 | 23.9 | 20 | 37.8 | 508.1 | 334 | 24275 | 20.3 |

4.3.2 Batería 2, SOC50, T20

A continuación, se va a exponer la segunda batería ensayada con un estado de carga del 50% y una temperatura ambiente de 20°C.

La masa inicial es significativamente similar a la del ensayo anterior, 44.7g, y, tras el ensayo, se puede observar que ha perdido un 39.37% de su masa inicial, pesando 27.1g. En comparación al ensayo anterior, se puede apreciar que se ha perdido menos masa durante el proceso de fuga térmica. Esto puede deberse a que el criterio utilizado para determinar la masa final de la batería, no fuera lo suficientemente preciso en el primer ensayo debido a la rotura de la celda. Asumiendo que esta diferencia es debida a la rotura de la primera batería, es necesario estudiar más baterías.

En este caso, se puede observar que la temperatura crítica es más cercana a la ambiente que, en el ensayo anterior, con unos 22.6°C, temperatura la cual, como se ha comentado anteriormente, la reacción pierde la capacidad de detenerse. Esta temperatura significativamente inferior al ensayo anterior, indica que una vez se realiza la penetración, de manera prácticamente instantánea, como podrá comprobarse en la distribución temporal de la cámara termográfica, la reacción se vuelve descontrolada.

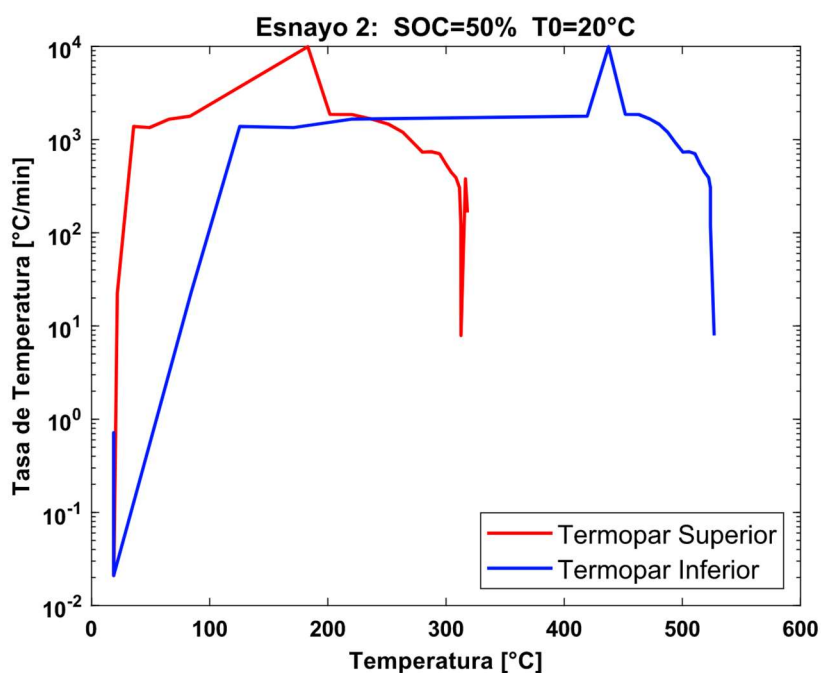


Figura 30. Tasa Temperatura vs Temperatura - Ensayo 2

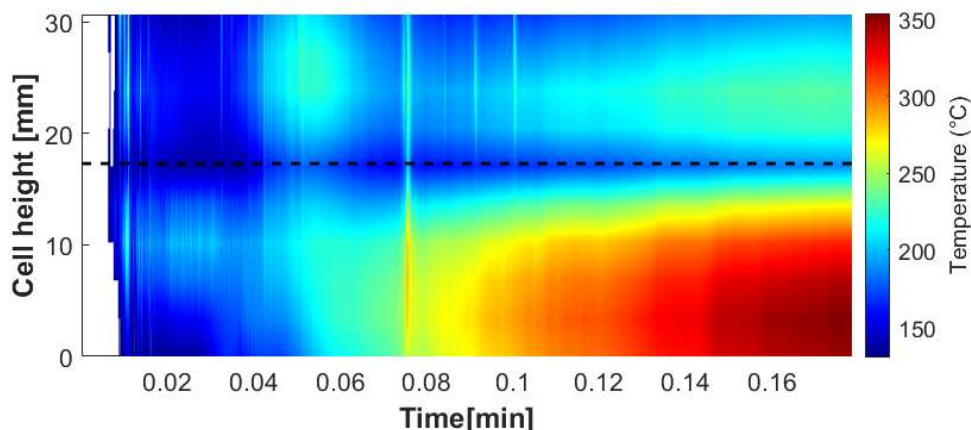


Figura 31. Distribución térmica - Ensayo 2

Como se puede observar durante los primeros instantes, se observa el mismo fenómeno comentado en la batería anterior, un calentamiento relativamente uniforme en el umbral inferior de la medición que son los 130°C. Tras este periodo de calentamiento inicial, se aprecia un calentamiento más pronunciado y en cierta medida simultáneo en el ánodo y el cátodo de la batería, este segundo calentamiento más acusado, alcanza una temperatura aproximada de unos 200°C, y, a partir de aquí, cada extremo de la batería adopta un comportamiento diferente, aunque si es posible apreciar un punto en el que la batería sufre una variación brusca de la temperatura en torno a $t=0.08\text{min}$.

Comenzando con la parte inferior de la batería, se puede apreciar que sufre un calentamiento progresivo y no tan violento como en el ensayo anterior. También se observa que la temperatura máxima se encuentra en los 526.9°C, en la parte inferior. Este calentamiento progresivo e inferior en términos numéricos, puede deberse a que, en este caso, la batería no ha sufrido una destrucción al nivel del ensayo uno, por lo que es posible que la distribución de temperaturas superficial de la batería sea ligeramente diferente a las temperaturas del interior de la batería.

Pasando ahora a la parte superior de la batería, observamos un comportamiento que difiere del observado anteriormente en el ensayo uno. Como se ha comentado en capítulos anteriores, la cámara termográfica, analiza la sección de la imagen de la batería, por lo que se están perdiendo los datos asociados al **venteo** del contenido de la batería. Este fenómeno, es uno de los encargados de liberar masa del interior de la batería y se produce a través de unos orificios situados en la parte superior de la batería, en el terminal positivo.

Esta rotura de la tapa de venteo, es lo que puede provocar esa disminución inicial de la temperatura, puesto que las proyecciones que se realizan, poseen gran cantidad de energía térmica. Una vez cesa el fenómeno de venteo, se puede observar que, de nuevo, sin fluidos que interactúen con la celda, vuela a calentarse.

Si a continuación se observa la gráfica obtenida por los termopares, se puede observar que existe en este caso una diferencia de comportamientos entre el termopar superior y el inferior que difiere con la del ensayo número uno. Esto, es debido a que, como se ha comentado anteriormente, esta batería no ha sufrido una destrucción tan severa como la del ensayo anteriormente mencionado.

Observando el termopar superior, observamos que la tasa de temperatura, cae de manera abrupta antes de lo previsto, lo cual, se relaciona a la distribución de la cámara termográfica y a

CAPÍTULO 4: Resultados

su vez, refuerza la hipótesis de que la rotura de la tapa de venteo y la liberación de masa a alta temperatura provoca este descenso inesperado.

En el termopar inferior, se puede observar una evolución más lineal de la temperatura, si bien sufre un ascenso muy pronunciado al principio, con tendencia prácticamente exponencial, observamos que existe un valor prácticamente asintótico, que mantiene estable la tasa de temperatura. Esto, se ve respaldado por la evolución de temperatura que se puede observar en la distribución temporal de la cámara termográfica, que como ya se ha comentado, tiene una evolución progresiva.

Finalmente, antes de la caída de la tasa de temperatura debido al cese de la reacción exotérmica, se observan unos valores anormalmente altos, para los que será necesario realizar más ensayos, de manera que se puede observar si este comportamiento se trata de un caso aislado o es recurrente y necesita ser investigado en profundidad.

Finalmente, se va a exponer el estado final de la batería tras el ensayo de penetración. Como se ha comentado en diferentes ocasiones, en este ensayo, la batería no ha sufrido una destrucción masiva como ocurrió en el primer ensayo. En la imagen, se puede apreciar como la tapade venteo se encuentra perforada y el lugar exacto donde se ha realizado la penetración.

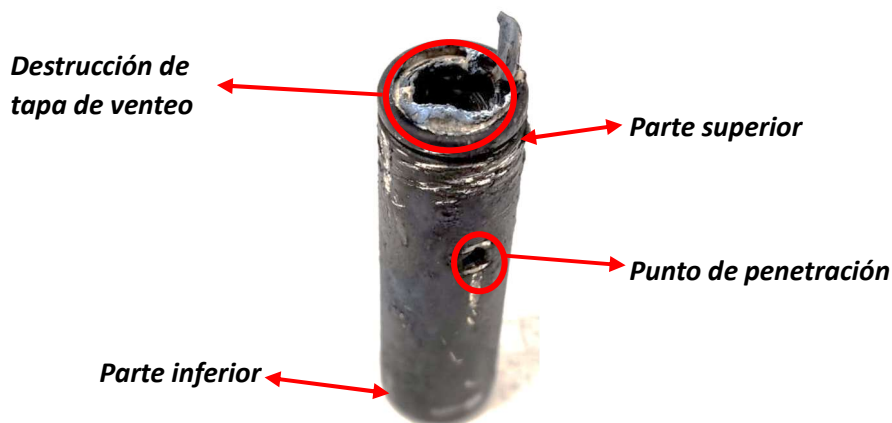


Figura 32. Resultado final celda - Ensayo 2

Finalmente, como se ha realizado en el ensayo anterior, se procede a mostrar una tabla resumen con los parámetros más importantes resultantes del ensayo. La tabla, al igual que la anterior, recoge, masas inicial y final, temperatura inicial, crítica y máxima, tasa de temperatura máxima y finalmente energía total liberada, según la temperatura superior del termopar.

Tabla 4. Resumen de resultados segundo ensayo.

| Ensayo | SOC (%) | M_init (g) | M_end (g) | T_onset (°C) | T_critical (°C) | T _{max} _{-sup} (°C) | T _{max} _{-inf} (°C) | dTdt_max (°C/min) | MHR (kJ) |
|--------|---------|------------|-----------|--------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|----------|
| 2 | 50 | 44.7 | 27.1 | 20 | 22.6 | 318.1 | 526.9 | 9939 | 12.7 |

4.3.3 Batería 3, SOC50, T20

Para el tercer ensayo, se ha empleado de nuevo una batería con un estado de carga a la mitad (50%) y una temperatura inicial de 20°C.

La masa inicial de esta batería, al igual que la batería número dos, comienza en los 44.7g y en este caso, al final del ensayo se puede observar una pérdida del 38.03%, llegando así a los 27.7g. Si realizamos una comparación entre los ensayos que se han realizado hasta el concreto, encontramos ciertas similitudes con en el ensayo número dos, pues ambos, han perdido una cantidad de masa similar. La diferencia con el ensayo número uno, puede deberse exactamente a los mismos motivos comentados en el ensayo anterior. No obstante, para poder asegurar el patrón en el comportamiento de la batería sería necesario la realización de más ensayos con las mismas características.

Una vez más, al igual que en el ensayo número dos, podemos observar una temperatura crítica muy cercana a la temperatura ambiente. Ésta, concretamente es de 23.6°C, lo que vuelve a indicar una gran velocidad en la evolución de la reacción exotérmica desde que se realiza la penetración.

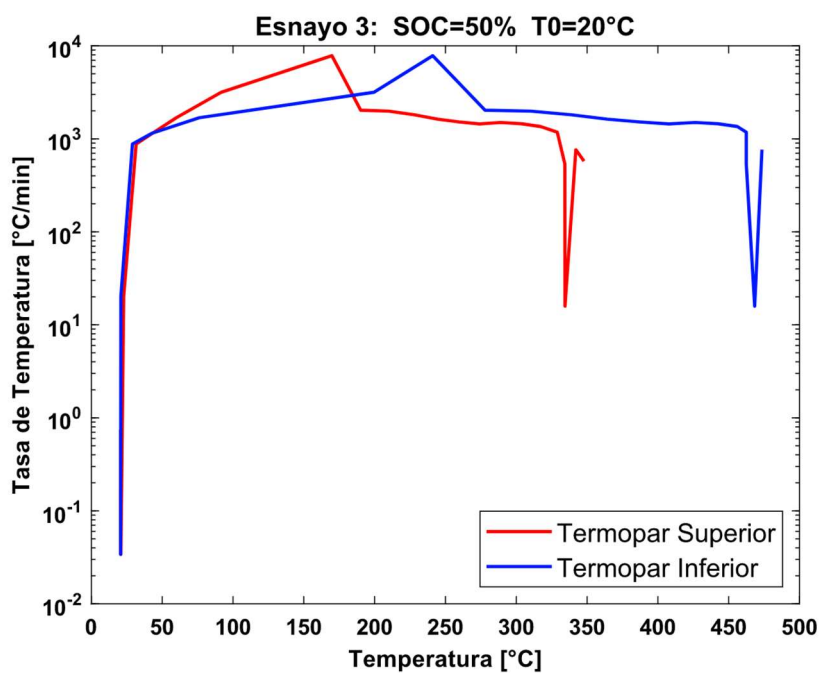


Figura 33. Tasa Temperatura vs Temperatura - Ensayo 3

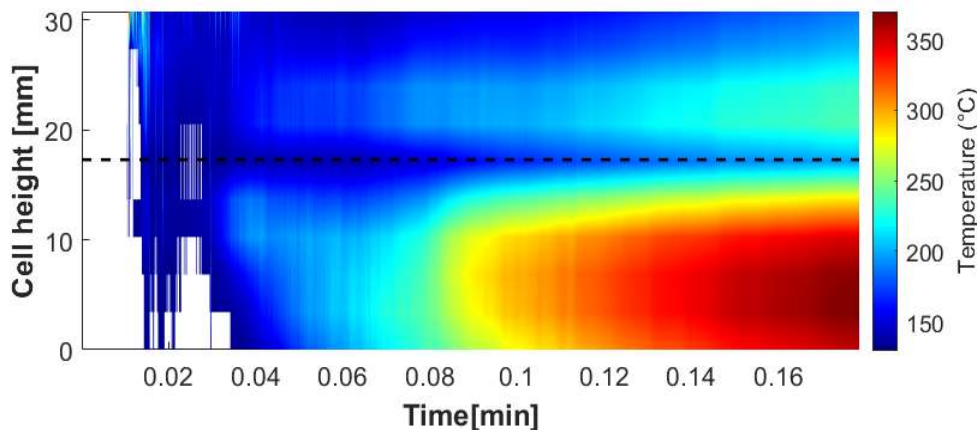


Figura 34. Distribución térmica - Ensayo 3

De nuevo en este ensayo, se puede observar, al igual que en los anteriores, el mismo fenómeno de calentamiento inicial en el umbral inferior de la cámara, ya comentado en apartados anteriores. En este caso, en torno a $t=0.03\text{min}$, se puede apreciar como comienza a producirse otro calentamiento ligeramente superior y progresivo desde la parte inferior de la batería. Si bien este calentamiento puede considerarse progresivo, se puede apreciar el rápido ascenso a una temperatura de unos 200°C . En este momento, se puede considerar que ha dado comienzo la parte más exotérmica de la reacción y a medida que los compuestos en el interior de la batería comienzan a reaccionar violentamente, la temperatura, como se puede observar va aumentando.

No obstante, se puede observar que este calentamiento parece solo afectar a la parte inferior de la batería, fenómeno que también aparecía en el ensayo anterior. Mientras que la parte inferior alberga la temperatura máxima del ensayo, de alrededor de los 473.5°C , en la superior parece solo apreciarse temperaturas por debajo de los 350°C .

Si relacionamos estos resultados con la gráfica de la tasa de temperatura, se puede apreciar un comportamiento similar al ensayo anterior, en el cual, el termopar superior tiene unas medidas diferentes al inferior, con lo que se puede confirmar la evidencia de comportamientos distintos en extremos opuestos de la batería. Sin embargo, a pesar de que la diferencia de comportamiento asociado a la temperatura máxima de cada zona, encontramos que, la tendencia de ambas gráficas es similar, una subida exponencial de la tasa de temperatura, un pequeño periodo de descenso y una zona de estabilización de la tasa de temperatura. Este comportamiento, puede describir cambios en la reacción de la batería como, un inicio violento de la reacción exotérmica donde aumenta de manera muy brusca la temperatura, una zona donde cae levemente, asociado a un final de la reacción tan violenta y luego un aumento de temperatura, lineal, asociado a una serie de reacciones menos violentas que finalizan el proceso de fuga térmica y que permiten alcanzar las máximas temperaturas.

Una vez más, se debe tener en cuenta el fenómeno de venteo, el cual, como se ha explicado anteriormente, libera materia con gran energía térmica y esto puede provocar un descenso de temperatura localizado en la carcasa exterior de la batería, donde se encuentra colocado el termopar.

CAPÍTULO 4: Resultados

En la parte inferior, como se ha comentado anteriormente, se encuentra la mayor temperatura y justo en la parte final de ambos gráficos, se aprecia un gran descenso de la tasa de temperatura, lo cual puede indicar el final de la reacción exotérmica y el comienzo de una fase de enfriamiento lento y progresivo de todos los elementos implicados en el experimento.

Las similitudes entre este ensayo y el ensayo anterior, ayudan a encontrar un patrón de comportamiento durante el proceso de fuga térmica, puesto que, el estado final de la batería del segundo ensayo, es similar al del tercero, lo que hace pensar que si en el primer ensayo, no se hubiera destruido la batería de tal manera, el comportamiento obtenido hubiera sido similar.

Finalmente, se muestra la imagen de la batería en la cual puede observarse el orificio de penetración y la tapa de venteo perforada. Como se ha comentado, se puede observar que el estado de esta batería es bastante similar al resultado de la batería del segundo ensayo.

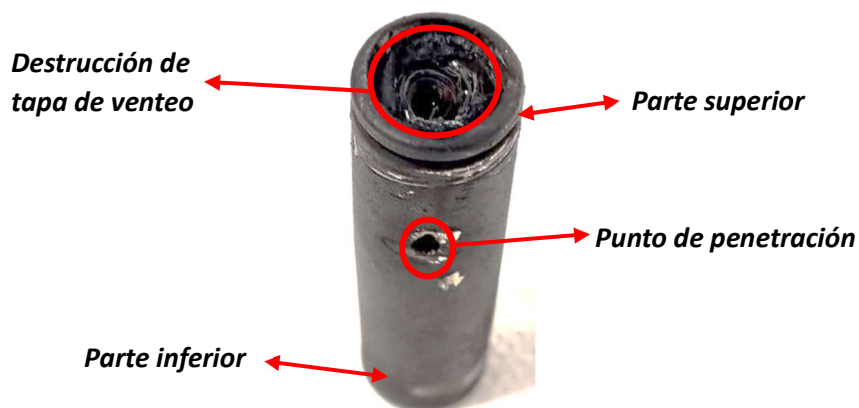


Figura 35. Resultado final celda - Ensayo 3

Para finalizar con el ensayo, como se ha realizado en capítulos anteriores, se va a proceder con la exposición de la tabla resumen con los resultados más importantes del ensayo. Una vez más, se expone el estado de carga de la batería, la masa inicial y final, la temperatura crítica y la máxima (superior e inferior), la tasa de temperatura máxima y la energía liberada calculada según los datos del termopar superior.

Tabla 5. Resumen de resultados tercer ensayo.

| Ensayo | SOC (%) | M_initial (g) | M_end (g) | T_onset (°C) | T_critical (°C) | T _{max} _{-sup} (°C) | T _{max} _{-inf} (°C) | dTdt _{max} (°C/min) | MHR (kJ) |
|--------|---------|---------------|-----------|--------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|----------|
| 3 | 50 | 44.7 | 27.7 | 20 | 23.6 | 347.8 | 473.5 | 7827 | 13.9 |

4.3.4 Batería 4, SOC50, T50

A continuación, para finalizar la matriz de ensayos con un estado de carga del 50%, se expondrán los resultados obtenidos en el ensayo realizado a una temperatura de la celda de 50°C. Como se ha explicado en capítulos anteriores, el ambiente atemperado, vendrá proporcionado por el calorímetro, que, mediante un protocolo de calentamiento lento, asegura que se alcanza la temperatura deseada en la propia batería. Estos valores, son recogidos por el equipo auxiliar de medición del calorímetro, quien emplea los datos de los termopares para gestionar la potencia.

CAPÍTULO 4: Resultados

La batería empleada en este ensayo, comienza con una masa de 44.6g y al finalizar el ensayo, se observa una pérdida del 29.37%, para llegar a un peso de 31.5g. Se puede observar que la pérdida de masa es menor que ensayos anteriores, a pesar de que se ha realizado a una mayor temperatura de la celda. Como se verá más adelante, la reacción es notablemente más violenta, por lo que surgen dos posibles hipótesis.

Ambas hipótesis parten del estado final de la batería que se observará al final del apartado. Tras el ensayo, ha aparecido un orificio junto al de penetración de la aguja, lo que puede llevar a pensar que, en lugar de proyectar masa a través de la tapa de venteo, al romperse la carcasa exterior de la celda, se alivió la presión de manera menos agresiva.

La primera hipótesis, comprende que, debido al orificio en la carcasa, la masa eyectada a una alta temperatura, fue directa a los instrumentos de medida. Esto, podría estar arrojando resultados a cerca de la masa liberada que antes no se estaba teniendo en cuenta.

La segunda hipótesis que se plantea, fundamentalmente se basa en que, al no haber liberado gran cantidad de masa a alta temperatura, ésta ha quedado en el interior de la batería y ha provocado una concentración de la energía térmica, en la celda, derivando así en la obtención de resultados que, en experimentos anteriores, no se tomaban.

Pasando a los resultados de temperatura obtenidos, se observa una temperatura crítica mayor a la esperada, si bien en los ensayos a 20°C, se encontraba ligeramente superior a esta temperatura, en este ensayo, la encontramos 15.4°C por encima de la temperatura de inicio del experimento, a 65.4°C. Como se ha explicado anteriormente, el criterio para determinar esta temperatura se basa en la tasa de temperatura, lo que, en consonancia con los resultados que se expondrán a continuación, llega a la explicación de que el incremento de temperatura, es tan violento que en el momento se alcanza el límite de la tasa de temperatura, la temperatura ya ha aumentado más de lo esperado.

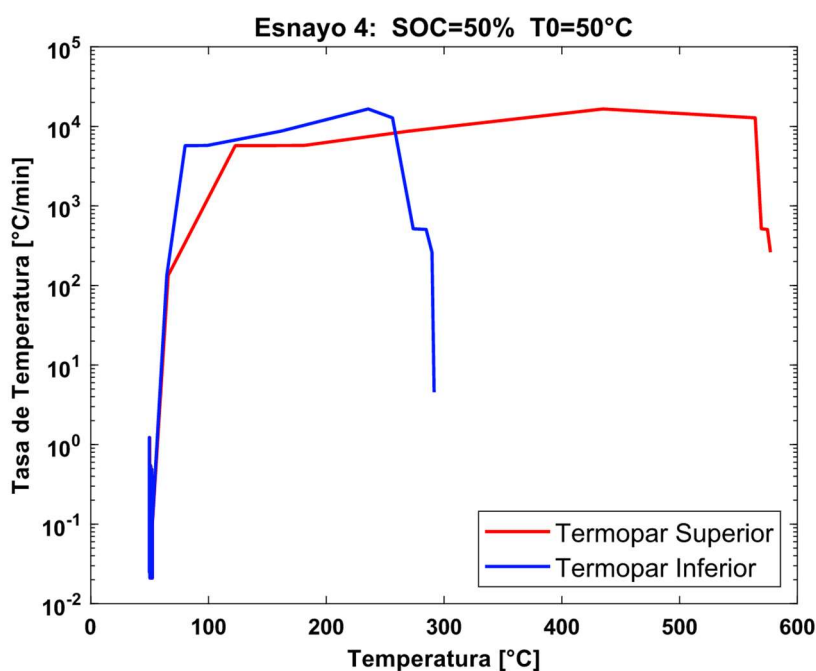


Figura 36. Tasa Temperatura vs Temperatura - Ensayo 4

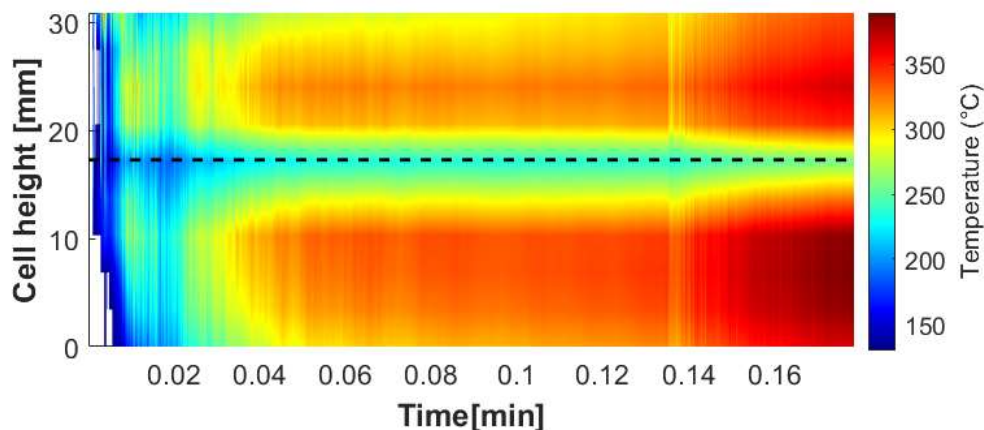


Figura 37. Distribución térmica - Ensayo 4

La realización de este ensayo, fue dividida en dos partes, una primera parte de calentamiento de la batería, la cual no se encuentra representada, y a continuación la parte asociada a la penetración de la celda. A diferencia de los otros ensayo, en éste, no se aprecia ese calentamiento inicial lento en el umbral inferior de la cámara termográfica.

En este caso, la parte más exotérmica de la reacción, comienza como podemos observar en $t=0.01\text{min}$, aproximadamente, que s bien se puede pensar que es un número menor a los ensayos anteriores, es simplemente debido a que el tiempo de grabación se ajusta más a la penetración con la aguja. A pesar de ello, se puede observar un aumento brusco de la temperatura desde los 50°C hasta los 250°C aproximadamente. Esta temperatura, como se puede ver en la distribución de temperaturas en el tiempo, se mantiene a lo largo de $t=0.01\text{min}$ hasta $t=0.03$ aproximadamente (1.2s). A continuación, lo que se observa es un calentamiento progresivo a lo largo del gráfico que alcanza su máximo, a diferencia de los ensayos anteriores en la parte superior de la batería, con una temperatura máxima de 577.2°C . Se puede observar que la temperatura es notablemente superior a los ensayos anteriores.

Cabe mencionar que, a diferencia de los ensayos anteriores, la parte superior de la batería, en este caso, ha sufrido una mayor temperatura, pero, la parte inferior de la batería, ha recibido mayores zonas de altas temperaturas, lo que indica que a pesar de que el máximo se encuentre en el parte superior, la mayor liberación de calor, tiene lugar en la parte inferior de la batería. Esto, refuerza la hipótesis que debido a la baja liberación de masa que ha habido, la batería, ha alcanzado mayores temperaturas de manera más homogénea.

Para poder comprobar que la temperatura máxima se encuentra en la parte superior, se debe revisar el gráfico de los termopares, pues, en el, se aprecia que el termopar superior, registra valores de temperatura mayores que el inferior.

Siguiendo con el análisis de la gráfica de los termopares, se puede observar un comportamiento similar al resto de ensayos, una evolución exponencial que en una temperatura determinada se estabiliza hasta que termina la reacción exotérmica. Esto, como se ha comentado anteriormente, provoca un violento incremento de la temperatura al inicio, un tramo de evolución lineal de la temperatura y finalmente un descenso de la velocidad de calentamiento que indica la proximidad del final de la reacción exotérmica. A pesar de la gran diferencia que se observa en las gráficas de los termopares, el hecho de que el termopar superior alcance mayor temperatura, como se ha comentado antes no significa que haya producido una mayor liberación de calor.

CAPÍTULO 4: Resultados

Esto podría deberse a la primera hipótesis planteada al comienzo del apartado. Lo que queda demostrado es que existe algún tipo de anomalía en la medición del termopar inferior.

A continuación, se va a exponer el estado final de la batería tras el ensayo. En la imagen, se podrá apreciar el orificio que ha aparecido junto al realizado en la penetración, el cual es la base de las hipótesis del comienzo del capítulo.

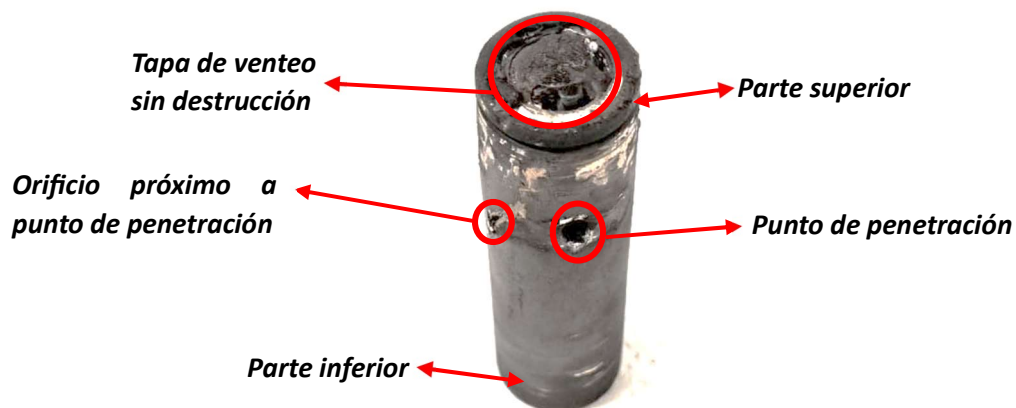


Figura 38. Resultado final celda - Ensayo 4

Finalmente, como en el resto de ensayos, se expone a continuación la tabla con el resumen de parámetros y resultados más importantes del ensayo, es decir, estado de carga, masas iniciales y finales, temperaturas de inicio y crítica, tasa de temperatura máxima y energía liberada calculada a partir de los datos del termopar superior.

Tabla 6. Resumen de resultados cuarto ensayo.

| Ensayo | SOC (%) | M_initial (g) | M_end (g) | T_onset (°C) | T_critical (°C) | T _{max} _{-sup} (°C) | T _{max} _{-inf} (°C) | dTdt _{max} (°C/min) | MHR (kJ) |
|--------|---------|---------------|-----------|--------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|----------|
| 4 | 50 | 44.6 | 31.5 | 50 | 65.4 | 577.2 | 291.5 | 16564 | 21.9 |

4.3.5 Batería 5, SOC100, T20

A continuación, se proceden a exponer los datos obtenidos del ensayo con la batería con un estado de carga del 100% y una temperatura de 20°C. Para los siguientes ensayos, se han extraído una serie de imágenes de la cámara termográfica, con el fin de explicar mejor los fenómenos de venteo que suceden durante la fuga térmica. Se ha realizado en estos ensayos, puesto que se considera que en las baterías al 100% del estado de carga, la reacción será más violenta.

La batería empleada en este ensayo, comienza inicialmente con una masa de 44.6g y tras el ensayo, se puede apreciar que ha perdido un 50.44% de ésta para pesar finalmente 22.1g. Esta gran liberación de masa, basándonos en los antecedentes de ensayos anteriores, lleva a pensar que la tapa de **venteo** pudo perforarse de manera adecuada y la materia pudo ser evacuada por esta, sin embargo, al analizar el estado final de la batería, el cual podrá observarse más adelante, se aprecia que la tapa de **venteo** no se encuentra perforada, si no que ha aparecido un agujero cercano al lugar de la penetración como sucedió en el ensayo anterior.

CAPÍTULO 4: Resultados

No obstante, a diferencia del ensayo anterior de SOC 50%, esta vez, si se ha evacuado gran cantidad de materia, lo que hace pensar que la liberación de toda esta materia en el lateral de la batería, ha contribuido con el incremento de la temperatura de la celda y por tanto con la liberación de calor de esta.

A pesar de que la tapa de venteo no se haya perforado en su totalidad, si se puede observar liberación de masa a través de ella, como se mostrará más adelante.

En términos de temperatura, se puede observar que, si bien este ensayo se realiza con la batería a 20°C, la temperatura crítica se encuentra unos 25°C por encima de ésta (45.2°C). Este fenómeno, se puede asimilar al ocurrido en el ensayo anterior, que, una vez se alcanza la tasa de temperatura límite, el incremento de temperatura es tan elevado que ésta ha alcanzado valores altos. Esto, indica la violencia de la reacción que se ha comentado en ocasiones anteriores.

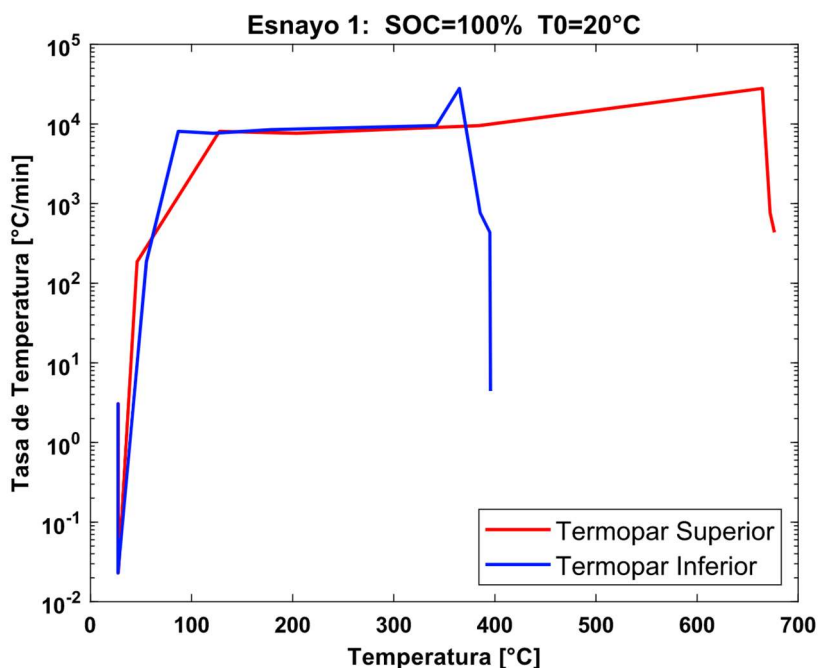


Figura 39. Tasa Temperatura vs Temperatura - Ensayo 5

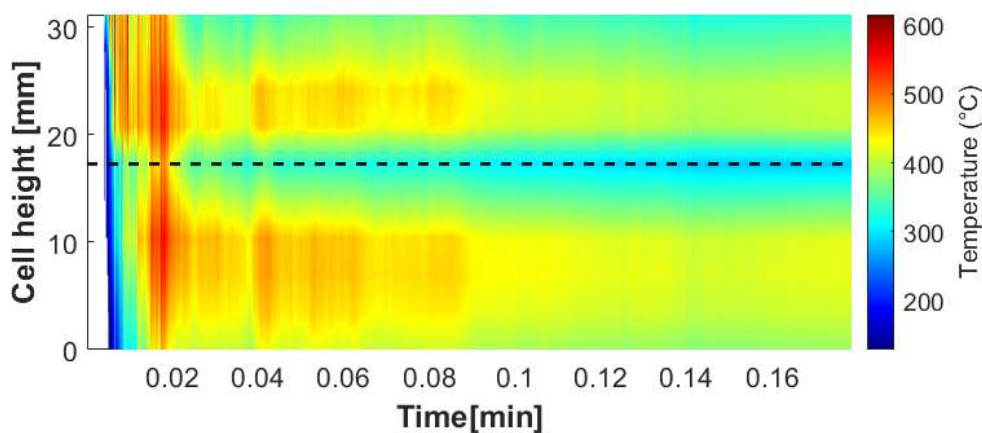


Figura 40. Distribución térmica - Ensayo 5

CAPÍTULO 4: Resultados

Analizando la evolución de la temperatura obtenida por la cámara termográfica, lo primero que se puede observar, es un cambio en los máximos de la gráfica en comparación a los otros ensayos. También se puede apreciar que una vez más, el primer calentamiento en el umbral inferior de medidas de la cámara termográfica, es mucho menor que en los de SOC=50%.

Respecto a las temperaturas, se aprecia un primer calentamiento inicial en la parte superior de la celda mayor que el sufrido en la parte inferior. Este primer aumento de temperaturas, se puede observar que llega a temperaturas superiores a los 500°C.

Otro resultado que se aprecia en el gráfico es que la reacción es altamente violenta, pues todo el periodo de máximas temperaturas, se encuentra comprendido entre $t=0.01\text{min}$ y $t=0.03\text{ min}$, es decir, 1.2s.

Si bien el máximo de temperatura ocurre de manera muy violenta, a medida que avanza el experimento la temperatura sufre pequeñas fluctuaciones en el rango de los 400°C a los 500°C, lo que indica que la batería libera energía de una manera más rápida que los ensayos con un SOC=50%.

La temperatura máxima es de 676.5°C y gracias a los termopares la encontramos en la parte superior de la celda. A pesar de esta máxima temperatura, el termopar inferior toma una lecturas notablemente inferiores a las del superior, lo cual, debido a que la distribución de calor de la imagen termográfica muestra temperaturas relativamente homogéneas, hace pensar en que está sufriendo algún error en la medida.

Respecto al comportamiento observado en los termopares, se puede afirmar que la tendencia es clara, la tasa de temperatura evoluciona frente a la temperatura de igual manera en los diferentes estados de carga. En la gráfica, al igual que en ensayos anteriores, se aprecian tres zonas de evolución de la temperatura, una aumento exponencial, una evolución lineal y finalmente un crecimiento más lento al final de la reacción de fuga térmica.

Como se ha comentado al inicio del apartado, en este ensayo, se han recuperado una serie de imágenes extraídas de la cámara termográfica durante el experimento. En ellas, se observa claramente el fenómeno de venteo, que a pesar de que, en este caso, la tapa de venteo, no se haya perforado en su totalidad, si ha cumplido su cometido y ha expulsado materia para liberar la presión. Las imágenes se encuentran dispuestas en orden de sucesos, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, comenzando por el instante inicial donde la aguja, penetra en la celda.

En este primer instante, en la imagen se aprecia claramente la proyección de masa hacia el exterior de la batería. En la segunda imagen, se aprecia un calentamiento más generalizado, puntualmente en la parte superior de la batería. También se puede observar que la materia que está siendo expulsada, tiene una temperatura ligeramente inferior a la celda, esto debido a que la cámara experimenta serias dificultades en la determinación de las temperaturas de materias gaseosas. En la tercera imagen, ya se aprecia un calentamiento generalizado en toda la celda, concentrándose aparentemente la mayor cantidad de temperatura en el inferior de la celda. Finalmente, en la cuarta imagen, puede apreciarse que la batería continua a una elevada temperatura, pero el fenómeno de venteo ha cesado.

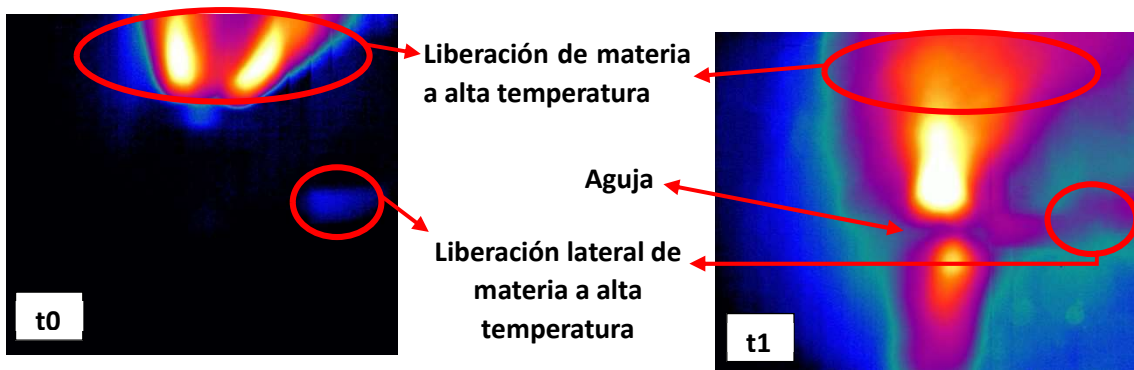


Figura 41. Imagen 0 - Ensayo 5

Figura 42. Imagen 1 - Ensayo 5

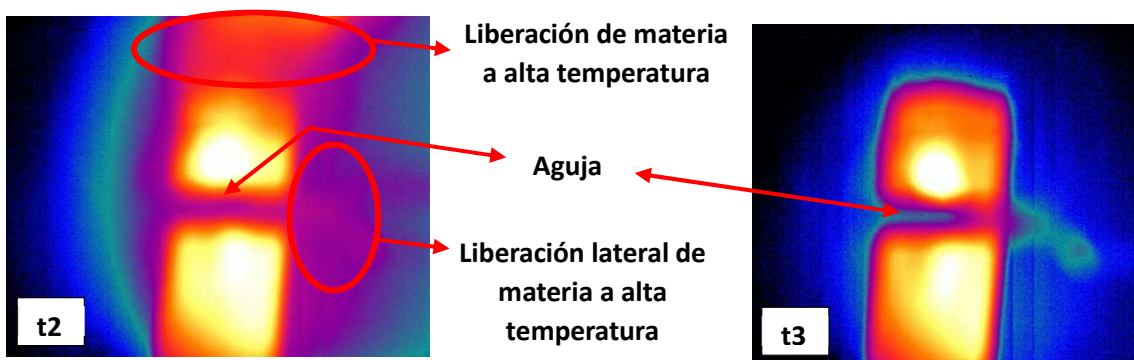


Figura 43. Imagen 2 - Ensayo 5

Figura 44. Imagen 3 - Ensayo 5

A continuación, se va a exponer una imagen de la celda tras el ensayo, en la que se puede observar el orificio lateral junto al realizado en la penetración. Otra característica de la celda que se puede apreciar es que la tapa de venteo, no se ha destruido como en ensayos anteriores si no que el material ha sido expulsado a través de los orificios de venteo.

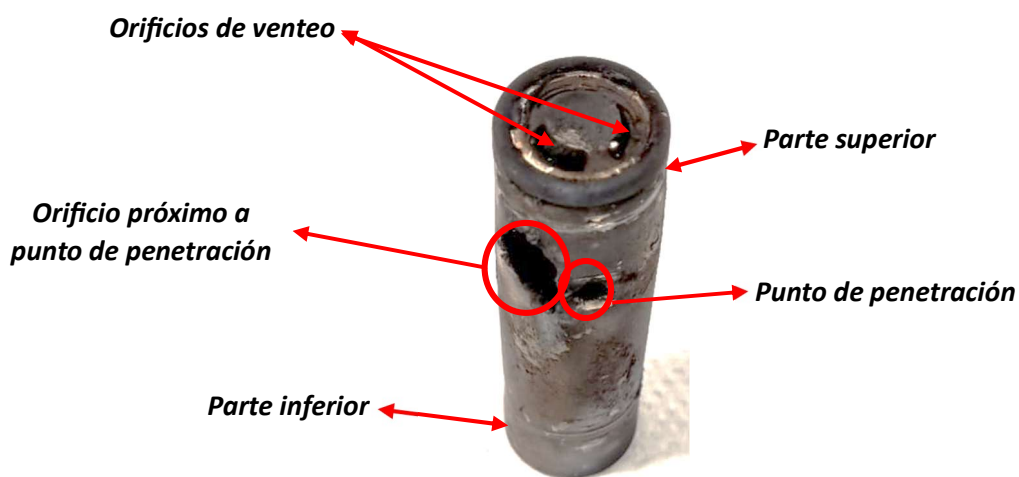


Figura 45. Resultado final celda - Ensayo 5

CAPÍTULO 4: Resultados

Finalmente, como en los ensayos anteriores, se expone una tabla resumen con los parámetros más importantes del ensayo. Estado de cargas, masas inicial y final, temperaturas de inicio y crítica, tasa de temperatura máxima y energía liberada según lo que indica solamente el termopar superior.

Tabla 7. Resumen de resultados quinto ensayo

| Ensayo | SOC (%) | M_init (g) | M_end (g) | T_onset (°C) | T_critical (°C) | T _{max} _{_sup} (°C) | T _{max} _{_inf} (°C) | dTdt_max (°C/min) | MHR (kJ) |
|--------|---------|------------|-----------|--------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|----------|
| 5 | 100 | 44.6 | 22.1 | 20 | 45.2 | 676.5 | 395.6 | 27953 | 27.2 |

4.3.6 Batería 6, SOC100, T20

A continuación, se pasa a exponer los resultados obtenidos de la última batería, con la que finaliza la matriz de ensayos. Ésta se realiza a una temperatura de 50°C y con un estado de carga del 100%. Como en el ensayo anterior, el calorímetro es el encargado de realizar el atemperamiento de la batería de una manera progresiva para que el calentamiento de ésta sea uniforme. Una vez más, en este ensayo, también se han extraído imágenes de la cámara termográfica donde se aprecia la evolución de la reacción.

En primer lugar, se hablará de la masa, la cual, al inicio del ensayo es de 44.7g. Durante el proceso de fuga térmica, en este caso, se puede apreciar que se pierde un 52.13% de la masa, para finalizar el ensayo con 21.4g. Los resultados obtenidos, son muy similares a los del ensayo anterior, pero al igual que pasó anteriormente, la tapa de venteo, no se ha perforado como ocurría en los primeros ensayos de esta matriz. Como más adelante se observará, ha vuelto a aparecer un orificio en el lateral de la batería junto a la entrada de la aguja. Parte de la masa liberada por la batería ha sido a través de este orificio lateral, como se demostrará más adelante en el capítulo, aunque a pesar de esto, la tapa de venteo, ha sido encargada de liberar una cantidad significativa de la materia.

Si bien es posible que la liberación de masa contribuyera al aumento de liberación de calor, medido en la batería, es evidente que el aumento del estado de carga provoca reacciones más exotérmicas, aunque eso se demostrará más adelante.

Si se analiza a continuación las temperaturas, se comienza este ensayo con la batería a 50°C, como ya se ha comentado anteriormente, el propio calorímetro es el encargado de realizar este calentamiento. Es importante a continuación, hablar de la temperatura crítica, la cual se encuentra 15.1°C grados por encima de la temperatura de inicio del ensayo. Una vez más, encontramos un salto de temperaturas considerable en el inicio de la reacción, lo cual, una vez más, indica una gran velocidad de la reacción en sus primeros pasos, como se ha comentado en ensayos anteriores.

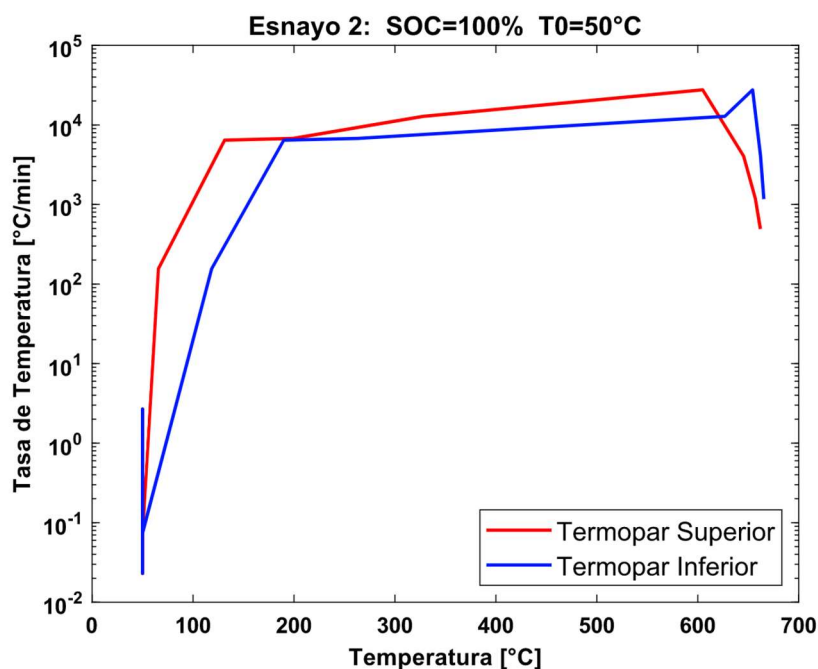


Figura 46. Tasa Temperatura vs Temperatura - Ensayo 6

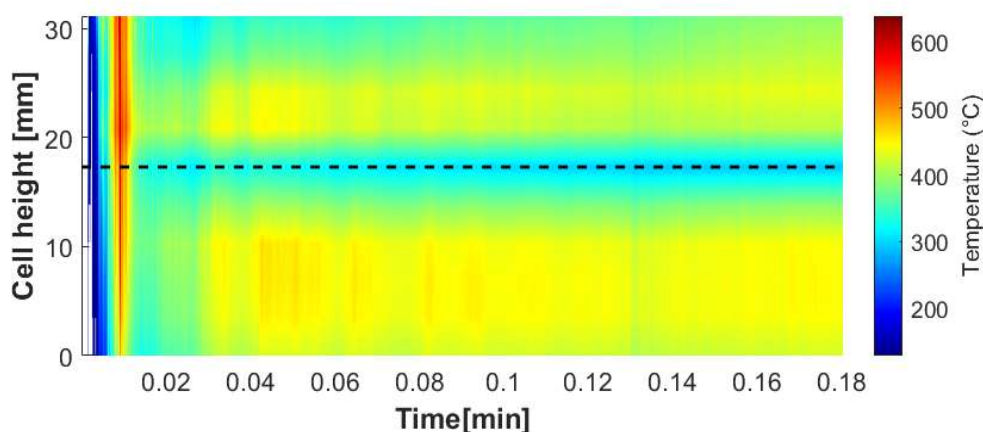


Figura 47. Distribución térmica - Ensayo 6

Una vez más, se puede apreciar un cambio muy brusco en la temperatura al comienzo del ensayo, obteniendo los máximos valores de temperatura en estos primeros instantes donde la aguja realiza la penetración en la batería. De nuevo, se aprecia una vez más, la gran violencia de la reacción exotérmica, la cual en menos de un segundo ($t=0.005\text{min} \rightarrow t=0.01\text{min}$) alcanza temperaturas máximas de 662°C. A medida que avanza el tiempo, se puede observar una tendencia similar a los ensayos anteriores realizados con un menor estado de carga, la batería, a pesar de haber alcanzado el máximo punto de liberación de calor, continúa con una alta temperatura hasta el final del ensayo. También se puede observar que si bien al inicio de la reacción, encontramos una mayor temperatura en la parte superior de la batería, al final del ensayo la celda registra mayores temperaturas en la parte inferior, siguiendo con la tendencia observada en ensayos anteriores.

CAPÍTULO 4: Resultados

Si se analiza a continuación las gráficas de termopares, volvemos a encontrar un comportamiento similar al resto de los ensayos que se han realizado sin inconvenientes. Se observa de nuevo una sección de aumento de la temperatura exponencial, a continuación, otra zona donde la tasa de temperatura se estabiliza en torno a un valor, lo cual indica una evolución lineal de la temperatura y finalmente un descenso de la tasa de temperatura lo que indica el final de la reacción, puesto que la temperatura sigue aumentando, pero cada vez de una forma mas lenta hasta alcanzar el final de la reacción exotérmica.

A continuación, de igual manera que se ha realizado anteriormente, se van a exponer una serie de imágenes tomadas durante el proceso de fuga térmica, a través de la cámara termográfica. Las imágenes, se encuentran ordenadas de igual manera que en el apartado anterior, por lo que, mientras se avanza en las imágenes, corresponden a un momento del ensayo diferente. En las imágenes, volverán a aparecer marcadores de tiempo desde el cero al cuatro, que indicarán el orden de estas.

Analizando las imágenes, encontramos que, en la primera, se aprecia como en el momento inicial de la penetración, la materia a una alta temperatura, es expulsada a través de la tapa de venteo. Si se analiza a continuación la segunda imagen, se aprecia como la temperatura aumenta de forma general en la batería y alrededores. También se puede observar como la materia sigue siendo expulsada a través de la tapa de venteo y como el orificio que encontraremos más adelante junto al de la penetración, comienza a formarse y a expulsar materia. En la tercera imagen, la liberación de calor es más generalizada y se aprecian claramente los dos puntos de liberación de masa, la tapa de venteo y el orificio lateral.

Finalmente, en la cuarta imagen, se aprecia como cesa la liberación de masa y la temperatura se mantiene en valores elevados dentro de la celda.



Figura 48. Imagen 0 - Ensayo 6

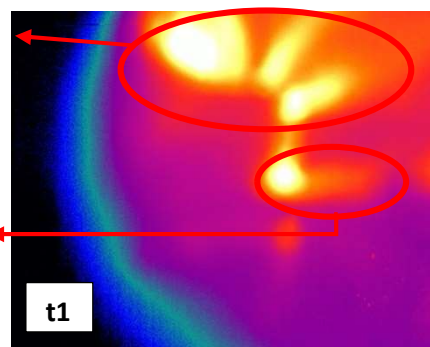


Figura 49. Imagen 1 - Ensayo 6



Figura 50. Imagen 2 - Ensayo 6

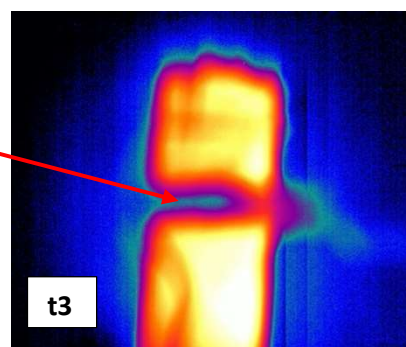


Figura 51. Imagen 3 - Ensayo 6

CAPÍTULO 4: Resultados

A continuación, para finalizar con el ensayo y de igual manera que en apartados anteriores, se procede a mostrar la imagen de la batería después de haberse realizado el ensayo. En ella se puede apreciar el estado final de la batería, con indicios claros de expulsión de materia por los orificios de venteo y también varios orificios laterales originados durante el ensayo.

Tabla 8. Resumen de resultados sexto ensayo

| Ensayo | SOC (%) | M_init (g) | M_end (g) | T_onset (°C) | T_critical (°C) | T _{max} _{-sup} (°C) | T _{max} _{-inf} (°C) | dTdt_max (°C/min) | MHR (kJ) |
|--------|---------|------------|-----------|--------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|----------|
| 6 | 100 | 44.7 | 21.4 | 50 | 65.1 | 662 | 665.4 | 27628 | 25.5 |



Figura 52. Resultado final celda - Ensayo 6

Finalmente, como en los apartados anteriores, se procede a exponer la tabla que resume los parámetros más importantes obtenidos del ensayo, como son, la masa inicial y final, las temperaturas, máximas, de inicio y crítica, la tasa máxima de temperatura y finalmente la energía liberada en base a las medidas del termopar superior.

4.4 Resumen de resultados

A continuación, se procede a realizar un resumen agrupando los diferentes ensayos, con el fin de realizar las comparaciones entre ensayos de una manera más rápida y sencilla. Los siguientes datos que se van a exponer, serán sobre los que se basarán las conclusiones del presente proyecto. Para realizar las comparaciones se realizarán diversas agrupaciones, de manera que todas las condiciones iniciales diferentes queden comparadas entre sí.

4.4.1 Temperatura frente a tiempo

En el siguiente apartado, se realizará la comparación entre las diferentes evoluciones de la temperatura frente al tiempo de la reacción. Es importante tener en cuenta que solo se tendrá en cuenta la fase exotérmica de la batería y para el cálculo de la batería se realizará una media entre la superior y la inferior para estimar la temperatura central de la batería.

$$T_{mid_max} = \frac{T_{sup} + T_{inf}}{2} \quad [11]$$

Tabla 9. Resumen temperatura media máxima y tiempo de máximo (Ensayo 1-4)

| SOC = 50% | $\Delta t(T_{max})$ [s] | T_{mid_max} [°C] |
|--------------------------------------|-------------------------|---------------------|
| Ensayo 1 ($T_{onset}=20^{\circ}C$) | 0.12 | 421.0 |
| Ensayo 2 ($T_{onset}=20^{\circ}C$) | 0.24 | 420.7 |
| Ensayo 3 ($T_{onset}=20^{\circ}C$) | 0.22 | 410.4 |
| Ensayo 4 ($T_{onset}=50^{\circ}C$) | 0.10 | 433.5 |

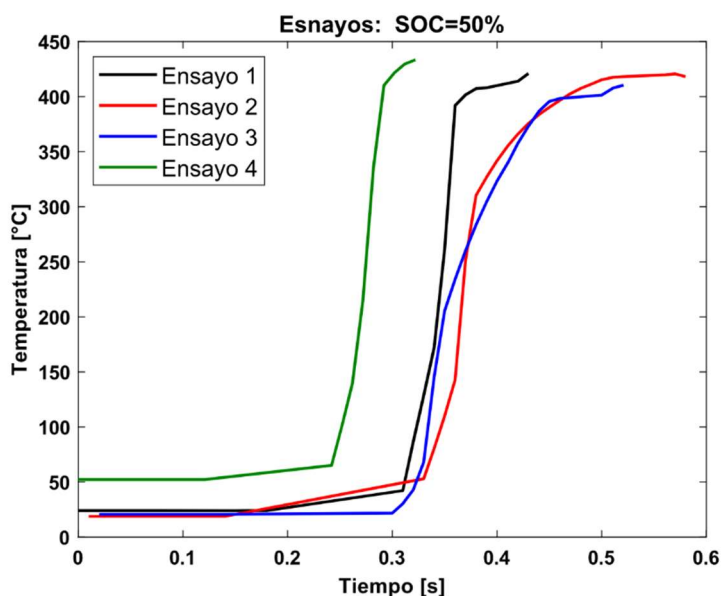


Figura 53. Temperaturas medias vs Tiempo (Ensayo 1-4)

Como se puede ver en la gráfica y en la tabla anterior, cuanto mayor la temperatura de inicio, menor es el tiempo en alcanzar el máximo. También se aprecia una ligera diferencia entre la temperatura media máxima de la celda cuando se ensaya a diferentes temperaturas, no obstante, al ser una diferencia poco significativa en este estado de carga, sería necesario comprobar realizando más ensayos si con este estado de carga, la temperatura es un factor importante a tener en cuenta.

Es importante mencionar, que en el termopar inferior de los ensayos dos y tres, se registran los máximos valores de temperatura. Esto tendrá importancia en el siguiente apartado donde se hablará de la energía liberada.

CAPÍTULO 4: Resultados

Tabla 10. Resumen temperatura media máxima y tiempo de máximo (Ensayo 5,6)

| SOC = 100% | $\Delta t(T_{\max})$ [s] | $T_{\text{mid_max}}$ [°C] |
|--|--------------------------|----------------------------|
| Ensayo 5 ($T_{\text{onset}}=20^{\circ}\text{C}$) | 0.071 | 535.8 |
| Ensayo 6 ($T_{\text{onset}}=50^{\circ}\text{C}$) | 0.070 | 662.6 |

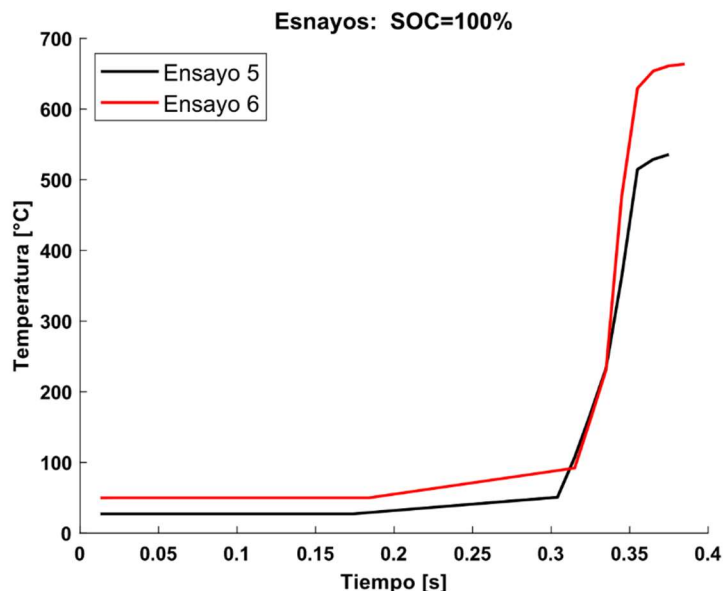


Figura 54. Temperaturas medias vs Tiempo (Ensayo 5,6)

Gracias al siguiente gráfico y a su correspondiente tabla de resultados, se puede apreciar como a medida que aumenta el estado de carga de la batería la temperatura media de ésta aumenta de manera más rápida. También, para este estado de carga, se puede apreciar una diferencia notable en la temperatura media máxima de la celda, por lo que podemos afirmar que al 100% de la carga de la batería, la temperatura de la celda influye notablemente en la temperatura media máxima.

Una vez expuestos todos los gráficos de temperaturas, es momento de recordar lo dicho en cada uno de los apartados de resultados individuales a cerca de la evolución de la tasa de temperatura. Se puede apreciar claramente ese aumento tan brusco de la temperatura que se asocia en los gráficos a la evolución exponencial de la tasa de temperatura. A continuación, se observa un pequeño instante en el que la temperatura evoluciona de manera lineal y finalmente un ascenso con una menor velocidad asociada a la caída final de la tasa de temperatura.

4.4.2 Energía liberada

En el siguiente apartado se expondrán los resultados obtenidos tras el cálculo de la energía liberada por cada batería en cada ensayo. En primer lugar, se mostrarán los cálculos realizados según las ecuaciones mostradas en apartados anteriores, es decir, se empleará la tasa de temperatura.

Al emplearse valores de la tasa de temperatura para el cálculo de la energía liberada, los resultados se encuentran condicionados a las mediciones de los termopares, concretamente, a las mediciones del termopar superior, puesto que, debido a la propia configuración del equipo del calorímetro, es de este termopar de donde se obtienen los valores de la tasa de temperatura.

CAPÍTULO 4: Resultados

En los gráficos mostrados a continuación, se aprecia como en los ensayos dos y tres, encontramos una energía anormalmente baja en comparación con el resto de los ensayos realizados al 50% del estado de carga. Si a esto se le suma que en los apartados de análisis de cada uno de los ensayos (dos y tres) se han encontrado anomalías en la medida del termopar superior, podemos afirmar que estos valores de energía liberada no son representativos de lo ocurrido durante el ensayo.

Si bien el fallo de estos ensayos fue descrito en los apartados individuales de cada uno, se hablará brevemente de ellos. Al haberse producido una destrucción de la tapa de venteo, los termopares pudieron sufrir un desprendimiento de la superficie de la batería, debido a esto, obtuvieron una temperatura anormalmente inferior (como se ha podido observar en el apartado anterior) y debido a este error en la medida de temperatura, se deriva en un fallo en la obtención de la tasa de temperatura. Puesto que esta tasa de temperatura ha sido la empleada en este cálculo, se puede asociar este resultado anormalmente bajo de energía liberada, directamente con el fallo de la medición de la temperatura.

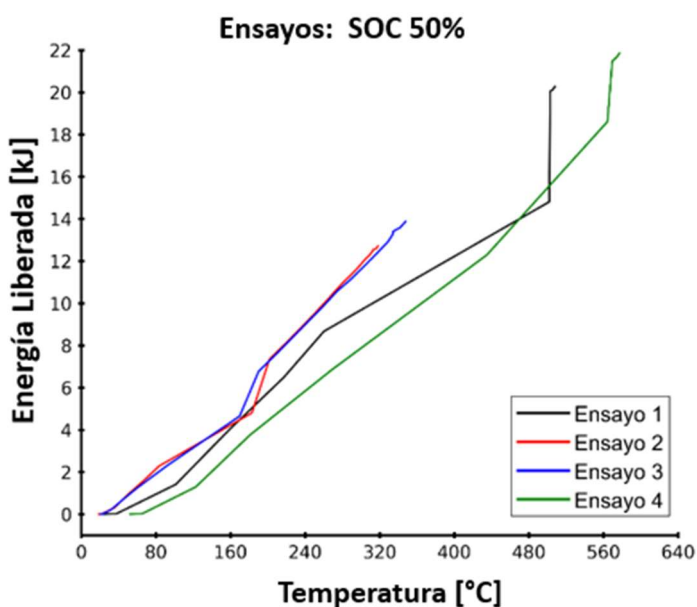


Tabla 11. Energía liberada acumulada - Ensayos (1-4)

| Energía Liberada | [kJ] |
|------------------|-------------|
| Ensayo 1 | 20.3 |
| Ensayo 2 | 12.7 |
| Ensayo 3 | 13.9 |
| Ensayo 4 | 21.9 |

Figura 55. Energía liberada acumulada - (Ensayos 1-4)

En este segundo gráfico, donde aparecen los dos ensayos con estado de carga del 100%, se observa que, en la segunda batería, cuya temperatura de inicio del ensayo es mayor, libera una menor cantidad de energía, cuando siguiendo la tendencia de los ensayos realizados con estado de carga del 50%, a mayor temperatura de la celda, mayor debería de ser la energía liberada.

Esto, puede ser indicador de que existe una nueva medida anómala en el termopar superior, que como se ha comentado anteriormente, es sobre el cual se basan los cálculos de estas gráficas.

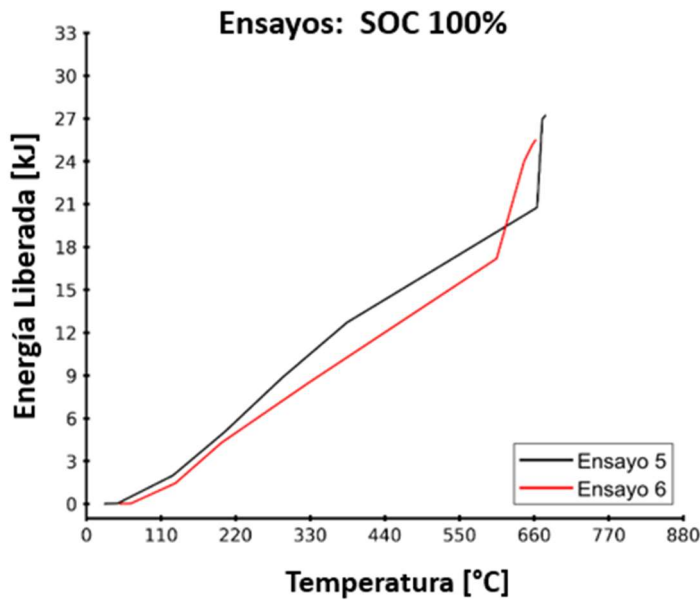


Tabla 12. Energía liberada acumulada - Ensayos (5,6)

| Energía Liberada | [kJ] |
|------------------|------|
| Ensayo 5 | 27.2 |
| Ensayo 6 | 25.5 |

Figura 56. Energía liberada acumulada - (Ensayos 5,6)

Para obtener un segundo resultado con el que poder contrastar, se va a emplear una aproximación del cálculo de la energía liberada, de manera que se pueda observar si los resultados obtenidos anteriormente difieren en gran medida y se puede confirmar que existe una anomalía en las mediciones.

Para esta aproximación se empleará la temperatura media de la celda, la cual se ha calculado en el apartado anterior. Ésta, proporcionará un valor medio entre la temperatura registrada por el termopar y el inferior, de manera que se podrá aproximar la temperatura en el centro de la celda. Si bien los cálculos anteriores tenían una continuidad durante el transcurso del ensayo, esta aproximación tendrá en cuenta únicamente el instante inicial y el final del ensayo, de manera que se asemejará la evolución de la energía liberada a una función lineal.

Si se observan los dos gráficos (SOC=100% y SOC=50%), se puede apreciar una clara tendencia de linealidad en la evolución de la energía liberada, por lo que la aproximación realizada no debería arrojar valores muy diferentes a los obtenidos en aquellos ensayos que no han sufrido medidas anómalas.

A continuación, se expondrá la fórmula que se empleará para el cálculo y posteriormente, una tabla con los resultados frente a los obtenidos a través de los primeros cálculos. Los datos de masa y calor específico son los mismos que los empleados en los cálculos anteriores.

$$\Delta T_i = T_{\text{mid_max}} - T_{\text{onset}} \quad [12]$$

$$\dot{Q}_{\text{med}} = m \times C_p \times \Delta T_{i_max} \quad [13]$$

CAPÍTULO 4: Resultados

Tabla 13. Energía liberada, acumulada vs media - SOC50%

| SOC = 50% | ΔT_{i_max} [$^{\circ}C$] | Energía liberada (acumulada) [kJ] | Energía liberada (media) [kJ] |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Ensayo 1 ($T_{onset}=20^{\circ}C$) | 401.0 | 20.3 | 17.96 |
| Ensayo 2 ($T_{onset}=20^{\circ}C$) | 400.7 | 12.7 | 17.91 |
| Ensayo 3 ($T_{onset}=20^{\circ}C$) | 390.4 | 13.9 | 17.45 |
| Ensayo 4 ($T_{onset}=50^{\circ}C$) | 383.5 | 21.9 | 17.10 |

Tabla 14. Energía liberada, acumulada vs media - SOC100%

| SOC = 100% | ΔT_{i_max} [$^{\circ}C$] | Energía liberada (acumulada) [kJ] | Energía liberada (media) [kJ] |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Ensayo 5 ($T_{onset}=20^{\circ}C$) | 515.8 | 27.2 | 23.00 |
| Ensayo 6 ($T_{onset}=50^{\circ}C$) | 612.6 | 25.5 | 27.38 |

Tras realizar los cálculos, se aprecia una diferencia considerable entre la energía calculada a través de la tasa de temperatura y la energía calculada a través de la temperatura media. Si se observan los gráficos obtenidos a través de la tasa de temperatura, se puede entender el porqué de esta diferencia notable.

Si bien durante gran parte de la evolución de la temperatura, se obtiene un comportamiento semejante a uno lineal constante, a partir de los $550^{\circ}C$, se aprecia un cambio de pendiente brusco y puesto que en las aproximaciones solo se tuvieron en cuenta los estados final e inicial, se pierde parte del calor liberado en estas aproximaciones.

A pesar de ello, se obtienen resultados importantes, si, bien el valor numérico puede considerarse impreciso, puede emplearse de un modo cualitativo, puesto que, para un estado de carga del 50%, todas las baterías liberan una cantidad de energía similar y de igual forma con un estado de carga del 100%.

Si bien el ensayo cuatro debería arrojar un valor superior de energía liberada (como pasa en el calculado con los datos del termopar superior), observamos un valor ligeramente inferior al obtenido en los ensayos de igual estado de carga y menor temperatura. Esto, si se analiza la temperatura máxima registrada por el termopar inferior en este ensayo, se puede observar que es extrañamente baja por lo que, al estar los cálculos basados en la temperatura media, afecta negativamente sobre la energía liberada a mayor temperatura.

4.4.3 Tasa de temperatura frente a temperatura

Para finalizar con el capítulo de resultados, se mostrarán las gráficas analizadas anteriormente de forma individual en cada uno de los apartados dedicados a los ensayos. El objetivo de las siguientes gráficas es analizar las tendencias y las relaciones que puede haber entre las baterías con estados de carga similares, de manera rápida y directa.

Estos gráficos entregan gran cantidad de información, puesto que se puede apreciar de manera rápida cual ha sido la evolución de la temperatura a medida que ésta aumentaba, a que temperatura se vuelve incontrolable la reacción y también cual ha sido la temperatura máxima del ensayo. Al representar los diferentes ensayos juntos, se puede realizar, como se ha comentado, la comparación de estos comportamientos para diferentes estados iniciales.

CAPÍTULO 4: Resultados

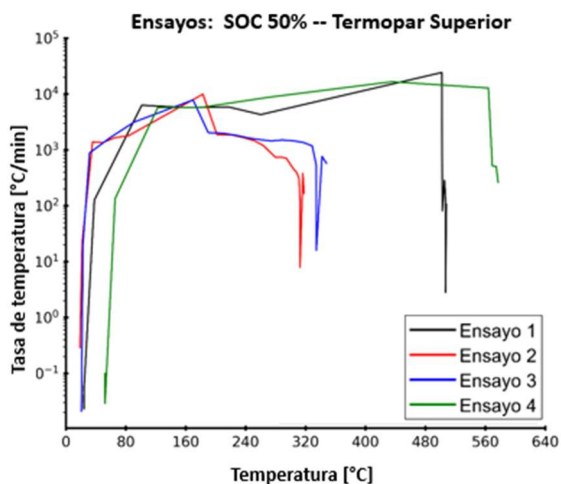


Figura 57. Resumen Tasa Temp. vs Temp. SOC50% - SUP

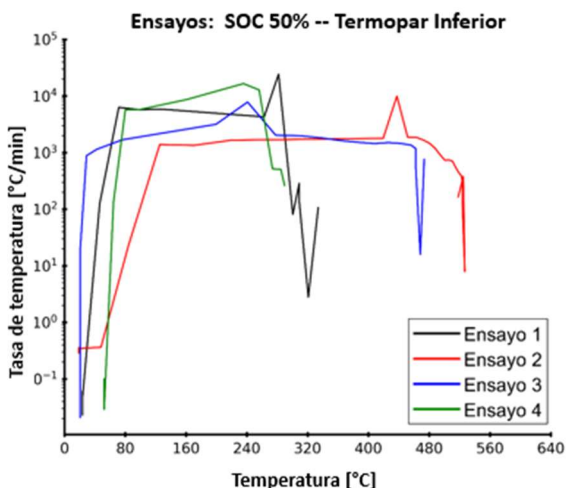


Figura 58. Resumen Tasa Temp. vs Temp. SOC50% - INF

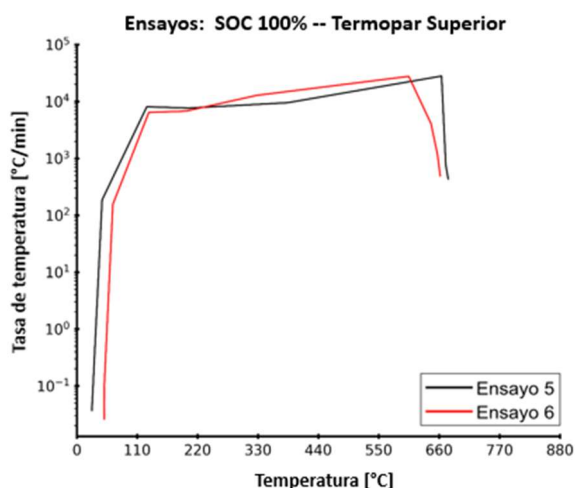


Figura 59. Resumen Tasa Temp. vs Temp. SOC100% - SUP

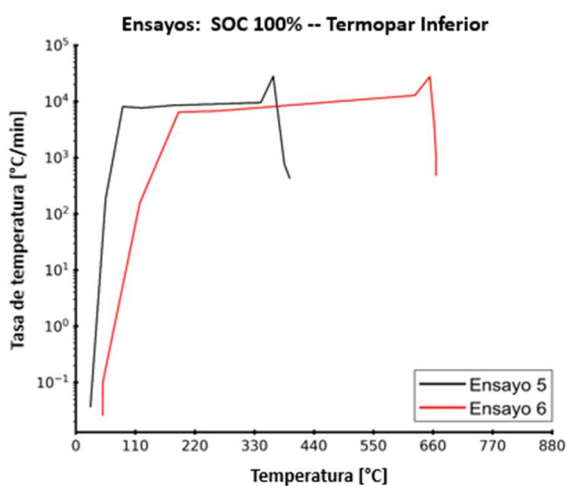


Figura 60. Resumen Tasa Temp. vs Temp. SOC100% - INF

Como se puede observar de manera general, el comportamiento de la tasa de temperatura sigue tendencias similares de manera independiente al estado de carga y a la temperatura de inicio. Estas tendencias han sido descritas a lo largo del presente proyecto en varias ocasiones, tres zonas diferenciadas, ascenso exponencial, evolución lineal y caída final.

Si bien es cierto que no todas las celdas siguen este comportamiento, esto se debe a errores ocurridos durante los ensayos como se ha demostrado en el análisis individual de cada uno de ellos y a continuación se procede a identificarlos en las gráficas anteriores.

En la primera gráfica (SOC=50%, Termopar Superior), se puede apreciar como el ensayo dos y tres sufren una caída de la tasa de temperatura, a una temperatura considerablemente inferior de lo que cabría esperar, esto, como se ha descrito con anterioridad, puede deberse a la rotura de la tapa de venteo de la celda y por tanto un fallo en la toma de medidas del termopar.

En la segunda gráfica se puede apreciar como los ensayos uno y cuatro sufren una caída de la tasa de temperatura, de igual manera, a una temperatura inferior a la debida, eso, se puede asociar nuevamente a un error en la toma de medidas del termopar y como se ha descrito en apartados previos, ha desencadenado en errores determinados cálculos que ya han sido comentados.

CAPÍTULO 4: Resultados

En la tercera gráfica se puede apreciar que o bien el termopar superior del ensayo cinco se encuentra recogiendo valores más altos de los que debería o que el termopar superior del ensayo seis se encuentra recogiendo datos de temperatura inferior a los debidos, puesto que al tratarse de ensayos a diferentes temperaturas, aquel con mayor temperatura de inicio (ensayo seis) debería ser el que alcanzase la mayor temperatura. De esta manera se asocia algún tipo de error al ensayo, que, deberá ser aclarado con la realización de ensayos en un futuro.

Finalmente es necesario comentar ciertos comportamientos esperados en las baterías, como por ejemplo en el primer gráfico (SOC=500%, Termopar Superior) las temperaturas del termopar superior del ensayo cuatro (realizado a una temperatura ambiente superior) es el que posee la mayor de las temperaturas.

De igual manera se observa en el cuatro gráfico (SOC=100%, Termopar Inferior), como la máxima temperatura, pertenece al ensayo número seis que es el que parte de una mayor temperatura inicial.

4.5 Conclusión

Para finalizar con el capítulo en el cual se han expuesto todos los resultados obtenidos de los diferentes ensayos, se procede a exponer una tabla general que recoja los parámetros mas importantes de los ensayos, que han sido expuestos individualmente en cada uno de ellos análisis de los ensayos.

Tabla 15. Resumen general de resultados

| Batería | LG 18650 MH1 | | | | | |
|--------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SOC [%] | 50 | 50 | 50 | 50 | 100 | 100 |
| M_init [g] | 44.8 | 44.7 | 44.7 | 44.6 | 44.6 | 44.7 |
| M_end [g] | 23.9 | 27.1 | 27.7 | 31.5 | 22.1 | 21.4 |
| T_onset [°C] | 20 | 20 | 20 | 50 | 20 | 50 |
| T_critical [°C] | 37.8 | 22.6 | 23.6 | 65.4 | 45.2 | 65.1 |
| T_mid_max [°C] | 421.0 | 420.7 | 410.4 | 433.5 | 535.8 | 662.6 |
| dTdt_max [°C/min] | 24275 | 9939 | 7827 | 16564 | 27953 | 27628 |
| AHR [kJ] | 20.3 | 12.7 | 13.9 | 21.9 | 27.2 | 25.5 |

CAPÍTULO 5: Conclusiones

5.1 Introducción

En el siguiente capítulo se realizará la exposición de las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos en los ensayos realizados para el presente proyecto. Este capítulo también comprenderá los trabajos futuros que podrían realizarse en base a los resultados previamente mencionados, los cuales contribuirían a la mejora de la seguridad en las baterías de litio como se describió al comienzo del presente documento.

Estos trabajos futuros que se describirán a continuación también ayudarán a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (*ODS*) propuestos por la ONU, en lo relacionado, tanto con la movilidad eléctrica como en el almacenamiento de energía en general.

5.2 El fenómeno de venteo

A lo largo del presente proyecto se ha mencionado en diversas ocasiones un fenómeno denominado venteo. A continuación, se procede a realizar una explicación a cerca de como es este fenómeno y porque se produce.

El fenómeno de venteo, se trata principalmente de la eyección de materia del interior de la batería a gran temperatura. Esta materia a alta temperatura, si bien actualmente se están desarrollando trabajos de investigación acerca de la composición de éstas, se conoce que esencialmente está compuesta por el electrolito de la batería y otras materias sólidas que se desprenden debido a las altas temperaturas.

En el caso de los ensayos llevados a cabo en el presente proyecto, el venteo asociado a la fuga térmica, está inducido por un abuso mecánico como es la penetración de aguja. Ésta, provoca un cortocircuito inmediato en el interior de la batería lo que provoca un aumento violento de la temperatura a valores muy elevados, como se ha demostrado en los resultados obtenidos de los ensayos.

A causa de estos valores tan elevados de temperatura, el electrolito comienza a evaporarse, lo que provoca un aumento de la presión en el interior de la batería. Debido al propio orificio originado por la penetración, parte de la materia es liberada por este, lo que puede provocar como se ha observado en los resultados de los ensayos anteriores una acumulación de alta temperatura en la zona próxima a la penetración y generar orificios que también evacúen materia.

Cuando la materia no es capaz de salir eyectada a través de este orificio, la presión interna continúa aumentando y se provoca la ruptura de la tapa de venteo. Si bien es cierto que este fenómeno cobra mucha más importancia en otros ensayos con diferentes abusos (térmicos y eléctricos), tiene una importancia notable en este tipo de ensayo.

A continuación, se procede a exponer dos imágenes de dos baterías diferentes seccionadas por la mitad. Una de ellas ha sido descargada completamente hasta alcanzar un estado de carga igual al 0%, mientras que la otra, sin embargo, posee un estado de carga del 100%. Ambas baterías no han sido sometidas a abuso mecánico, si no un abuso térmico, ya que, de esta manera, se puede apreciar claramente la diferencia cuando se produce venteo y cuando no. El ensayo de abuso térmico corresponde a un calentamiento progresivo de la batería hasta que la presión interna de la celda alcanza su límite y toda la masa es eyectada por la tapa de venteo.

CAPÍTULO 5: Conclusiones

En la primera, se puede apreciar una sustancia grisácea esparcida a lo largo de toda la sección de la batería, esto, se trata del electrolito que, debido a que la batería no ha sufrido una rotura de la tapa de venteo, ha quedado intacto en el interior de la batería. Esto, es debido al estado de carga nulo de la batería que, aunque se provoque un calentamiento, no conlleva una reacción violenta. En la segunda, sin embargo, no se puede apreciar esta sustancia de color grisácea, puesto que, debido al abuso sufrido, sí que se ha evacuado la materia a través de la tapa de venteo. Si bien al realizar el corte en la celda, se ha alterado la estructura interna de la celda, se pueden apreciar las láminas pertenecientes al ánodo y al cátodo en tonos cobrizos y negros.

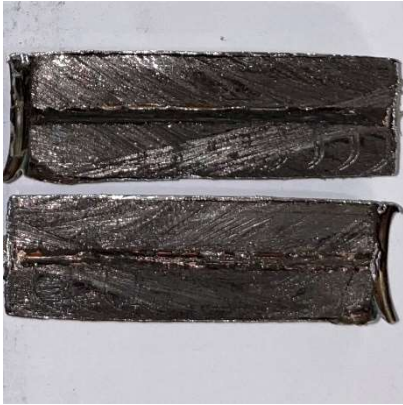


Figura 62. Batería sin venteo de masa



Figura 61. Batería con venteo de masa

5.3 La importancia de la evacuación de la materia

Es importante tener en cuenta que, con vistas a la movilidad eléctrica, lo importante es la temperatura de la celda, o más bien, la liberación de calor que se produce en el espacio ocupado por ésta. Esto quiere decir que, si bien la masa posee gran energía térmica, al salir eyectada de la batería, pueden desarrollarse sistemas que dirijan y distribuyan de manera uniforme esta materia a alta temperatura para que no suponga un peligro potencial para las celdas adyacentes.

Sin embargo, la celda, se encuentra fijada, junto a otras muchas, las cuales, si una de ellas sufre un abuso mecánico por cualquier motivo, a través de mecanismos de transmisión de calor (radiativos, convectivos y conductivos), pueden aumentar la temperatura de tal manera que se provoque una reacción en cadena incontrolable con muy altas temperaturas.

Como se ha podido comprobar en los resultados expuestos anteriormente, una correcta evacuación de la materia a alta temperatura, durante el proceso de fuga térmica, es fundamental para mantener lo más baja posible la temperatura de la celda.

Esto, se puede apreciar por ejemplo en lo ocurrido en el ensayo número uno, puesto que debido a la destrucción de la batería esta materia, no es capaz de dispersarse y se observa como la temperatura, aumenta considerablemente en comparación con el resto de los ensayos en los que si se obtiene una correcta liberación de materia.

De esta manera, se puede afirmar que si durante el proceso de fuga térmica, la tapa de venteo, no permite una correcta evacuación de la materia, la energía que la celda liberará en forma de calor, será mayor. Debido a ello, como se ha comentado anteriormente, es fundamental asegurar el correcto funcionamiento de este mecanismo para garantizar la seguridad durante el funcionamiento de las celdas, tanto trabajando de manera individual como cuando forma parte de un paquete compuestos por múltiples celdas.

Es importante analizar también lo que ocurre en los ensayos dos y tres, cuando la tapa de venteo, queda destruida, lo que puede significar una mayor liberación de materia a alta temperatura. Si bien podría parecer que, al evacuar más masa, la celda alcanzará menores temperaturas (como se ha comentado anteriormente), esto no siempre supone un beneficio, puesto que, si la tapa de venteo se destruye, se pierde cualquier capacidad de guiado de la materia durante la expulsión de esta, provocando que acabe depositada en lugares donde pueda suponer un peligro mayor al de alcanzar una temperatura superior en la propia celda.

En estos ensayos también se ha podido observar cómo en algunas ocasiones la masa es expulsada a través del orificio de la penetración lo que podría provocar una dispersión inadecuada para la materia a alta temperatura. Es por esto por lo que el diseño de la tapa de venteo, debe ser algo fundamental a la hora del diseño de una celda de litio para asegurar el buen funcionamiento de ésta.

5.4 El efecto del SOC en la liberación de calor

A lo largo de los ensayos realizados, uno de los parámetros iniciales que se ha visto alterado es el estado de carga. Como se ha explicado en ocasiones anteriores, el estado de carga es un porcentaje el cual indica la cantidad de energía almacenada en el interior de la batería. De manera intuitiva se puede llegar a deducir que mayor estado de carga, puesto que almacena mayor cantidad de energía, mayor será la liberación de calor. En el siguiente apartado, no se realizará esta deducción de manera intuitiva si no que, en base a los resultados expuestos en el capítulo anterior, se va a justificar esta deducción.

Puesto que en el presente apartado estamos realizando una comparación exclusivamente del estado de carga de las baterías, se van a tratar en primer lugar los ensayos realizados a veinte grados y posteriormente los realizados a cincuenta grados. Comenzando del menor estado al mayor estado de carga.

En primer lugar, es necesario observar los ensayos uno, dos y tres, donde, con un SOC del 50%. Puesto que como se ha comentado en apartados anteriores, las medidas de la parte superior y la inferior de la celda, difieren debido a diversos motivos, se va a realizar el análisis en función de las temperaturas medias obtenidas en el apartado anterior de resumen de resultados. Observando estas temperaturas medias a veinte grados centígrados, se observa un patrón similar de máximas en torno a los 420°C.

Si a continuación se analiza la temperatura media máxima del ensayo realizado de nuevo a veinte grados centígrados, pero con un estado de carga de 100%, observamos una clara diferencia, pues, se obtiene un valor de unos 535°C.

Como se puede observar la diferencia es considerable, aproximadamente 100°C de diferencia cuando la batería se encuentra cargada al máximo. Si bien es evidente que el a mayor estado de carga mayor temperatura, debido a que en el presente proyecto se han empleados dos estado de carga, no se puede establecer una relación de proporcionalidad clara entre el estado de carga y la temperatura máxima.

Esto podría realizarse ensayando baterías en diferentes estados de carga, como por ejemplo 65%, 75% y 85%. De esta manera se lograría apreciar el tipo de relación establecida entre el estado de carga y la temperatura máxima.

CAPÍTULO 5: Conclusiones

Si a continuación pasamos los ensayos restantes (los realizados a 50°C), se debería encontrar un comportamiento similar. Analizando los resultados obtenidos, se aprecia con un estado de carga del 50% la temperatura máxima es de aproximadamente 435°C mientras que con un estado de carga del 100%, encontramos una máxima de aproximada de 660°C. En este caso, el aumento de temperaturas, es de aproximadamente 225°C.

Tabla 16. Influencia del estado de carga

| T_onset [°C] | 20 | | 50 | |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| SOC [%] | 50 | 100 | 50 | 100 |
| T_mid_max [°C] | 420 | 535 | 435 | 660 |
| $\Delta T_{50\%-100\%}$ [°C] | 115 | | 225 | |

Como se puede apreciar, para cada temperatura de ensayo, existen grandes diferencias en las temperaturas máximas medias alcanzadas en el ensayo, por lo que, definitivamente queda confirmado que el estado de carga influye notablemente en la máxima temperatura de la reacción. No obstante, si se profundiza más en los resultados de la tabla anterior, puede verse como existe una gran diferencia entre realizar el ensayo a veinte y a cincuenta grados centígrados. Si se analiza lo que sucede con el incremento de temperaturas ($\Delta T_{50\%-100\%}$), se puede observar cómo existe una gran diferencia entre las dos temperaturas de los ensayos.

Esto, deja claro que la temperatura a la que se produzca el abuso mecánico influye también de manera importante en la liberación de calor, aunque esto se comentará más adelante.

Si bien, a lo largo del apartado de ha mencionado constantemente la temperatura máxima de los diferentes ensayos, como se ha expuesto en capítulos anteriores, la energía liberada es función de la temperatura de la reacción, por lo que, a mayor SOC de la batería, mayor será el calor liberado por la celda.

5.5 El efecto de la temperatura inicial en la liberación de calor

Durante los ensayos, ensayo, otro de los parámetros que han sido variados, es la temperatura de inicio de la penetración. Como se ha comentado en ocasiones anteriores, esta, viene regulada gracias al calorímetro que se encarga de otorgar una temperatura uniforme a toda la celda de manera que, en el momento de la penetración, se pueda asegurar una temperatura establecida previamente, concretamente veinte y cincuenta grados centígrados.

A continuación, se agruparán las diferentes baterías según su temperatura inicial de manera que se va a analizar si la temperatura inicial influye de manera notable en la liberación de calor.

CAPÍTULO 5: Conclusiones

En primer lugar, cuando se realiza el ensayo a veinte grados centígrados, se encuentran temperaturas medias máximas de 420°C, mientras que cuando se tiene una temperatura de cincuenta grados centígrados, la máxima es de tan solo 435°C. Aparentemente, un incremento de 15°C, no parece indicar que la temperatura de inicio de la reacción, sea determinante en la liberación de calor de la batería.

Si se analiza ahora lo ocurrido con la temperatura inicial de 50°C, se encuentra un comportamiento notablemente diferente, y es que, cuando se realiza la penetración a 20°C se alcanza una temperatura máxima de 535°C mientras que cuando se realiza a 50°C, la temperatura media máxima asciende hasta los 660°C. Esto indica una clara diferencia entre las dos temperaturas de inicio, comportamiento el cual no se aprecia en un estado de carga inferior.

Tabla 17. Influencia de la temperatura inicial

| SOC [%] | 50 | | 100 | |
|---|-----|-----|-----|-----|
| T_onset [°C] | 20 | 50 | 20 | 50 |
| T_mid_max [°C] | 420 | 435 | 535 | 660 |
| $\Delta T_{20^{\circ}\text{C}-50^{\circ}\text{C}}$ [°C] | 15 | | 125 | |

A la vista de los resultados, es evidente que la temperatura a la que se realice la penetración influye en cierta manera en la temperatura máxima que se alcanza en el ensayo, y por tanto en la energía liberada. No obstante, se puede apreciar una clara diferencia entre los diferentes estados de carga.

Debido a ello, se puede asegurar que si bien la temperatura de inicio, influye en la máxima temperatura del ensayo y, por tanto, en la liberación de calor, el estado de carga tiene una mayor relevancia en ello. De esta manera, la conclusión que se puede sacar de los siguientes resultados es que, si bien cuanto mayor sea la temperatura de inicio del abuso mecánico, se obtendrán mayores liberaciones de energía, cuanto mayor sea la energía almacenada por la batería (estado de carga), mayor será la influencia de la temperatura inicial en la liberación final de energía de la celda.

5.7 El efecto del fallo mecánico

Durante los ensayos, se ha podido observar cómo cada batería se veía sometida a una situación de fallo mecánico diferente. Si bien algunas de las celdas, han seguido en cierta medida el comportamiento de fallo esperado en el diseño, otras, han diferido en gran medida de éstos. Es por ello, que, a continuación, se procede con el análisis de lo sucedido en función del tipo de fallo mecánico que ha sufrido cada batería.

Si se analiza la primera batería, se observa cómo, fruto de la destrucción de la carcasa de esta, se ha obtenido una distribución de temperatura relativamente uniforme tras un periodo de calentamiento inicial cuando se realiza la punción y un violento aumento de temperatura en el que presumiblemente la batería sufre el fallo mecánico severo.

En los ensayos dos y tres, como se ha comentado anteriormente, se ha perforado en gran medida la tapa de venteo de la celda, lo que ha producido menores temperaturas en la zona.

Este fenómeno, puede ocurrir, fruto de la violenta expansión de los gases del interior de la batería, que provoca esa bajada de temperatura en la parte superior, provocando una distribución de temperatura no uniforme.

En los ensayos cuatro cinco y seis, si bien no comparten las condiciones iniciales ninguno de ellos, se pueden apreciar comportamientos similares, asociados a que, entre sí, han sufrido fallos mecánicos similares. Se puede observar una perforación de la tapa de venteo, según el diseño original, de manera que no se expulse materia en exceso. También se observan orificios laterales, a través de los cuales, el oxígeno, puede entrar al interior de la batería y acelerar el proceso de combustión de esta. Esto se justifica mediante el análisis del resto de ensayos, pues, con los orificios laterales, la reacción alcanza temperaturas superiores y de igual manera, tiempos de reacción más cortos, dejando una reacción más violenta.

A causa del buen funcionamiento de la tapa de venteo, lo que se puede apreciar es que existe una distribución de temperaturas más uniforme a lo largo de toda la batería.

5.6 Relación de potencia eléctrica/potencia térmica

A lo largo de todo el presente proyecto, se ha hablado de términos de liberación de calor y de qué manera la celda empleada se ha comportado en diferentes estados iniciales. Con el siguiente apartado, se pretende establecer una rápida relación entre las características eléctricas de una celda y las características térmicas de la misma cuando se somete a un abuso mecánico. De esta manera, se pretende poder establecer un criterio rápido de pre-dimensionado de sistemas de refrigeración para las baterías, por ejemplo, en el mercado de los vehículos eléctricos, el cual se trató al comienzo del presente proyecto.

En primer lugar, se va a calcular la energía eléctrica almacenada por una celda, en este primer análisis al 100% de su capacidad de carga (SOC=100%). La energía eléctrica que almacena una batería es función de voltaje y de su capacidad. En este caso, al estar al SOC=100%, el voltaje será igual al voltaje nominal, puesto que se trata del voltaje al cual la batería funcionará la mayoría del tiempo, y la capacidad, será la máxima de la batería, puesto que como se ha demostrado en capítulos anteriores, el protocolo de carga CCCV, se encarga de asegurar que la batería se encuentre al máximo de su capacidad.

$$E_{elec-100\%} = V_{max} \times C_{nom} \times SOC \quad [14]$$

$$E_{elec-100\%} = 3.6V \times 3.2Ah \times 100\%$$

$$E_{elec-100\%} = 11.52 Wh$$

$$E_{elec-100\%} = 11.52 Wh \times 3600$$

$$E_{elec-100\%} = 41.5 kJ$$

Si a continuación se recuperan los datos de la energía liberada en forma de calor por la batería analizada a 20°C y SOC 100%, se puede apreciar que libera entre 25 kJ y 30kJ, lo que indicaría que más de la mitad de la energía eléctrica de una batería, está siendo convertida en calor, lo

CAPÍTULO 5: Conclusiones

cual, puede servir como método de pre-dimensionado en sistemas de refrigeración, como se ha comentado anteriormente.

A continuación, se realizará el análisis con los datos obtenidos en el ensayo con la celda con un estado de carga del 50%. De manera intuitiva, cabe esperar que, si la batería posee la mitad de la energía almacenada, la energía liberada sea también notablemente inferior. Para ello, se van a emplear parte de los cálculos anteriores, expresados de forma más directa puesto que se trata del mismo procedimiento.

$$E_{elec- \%} = 3.6V \times 3.2Ah \times 50\% \times 3600 \quad [15]$$

$$E_{elec-5 \%} = 20.7 kJ$$

Si bien la energía eléctrica que almacena la batería es notablemente inferior, encontramos que la liberación de calor, no es exactamente la mitad de la que se encontraba en el estado de carga del 100%, tomando valores alrededor de los 20kJ.

Esto, denota que la relación entre el estado de carga de la batería y la energía liberada, no es exactamente una relación lineal, pero si que se encuentra relacionado, pues, como se ha comentado en ocasiones anteriores a mayor estado de carga, mayor energía liberada.

No obstante, lo realmente importante del presente apartado, es establecer una relación entre la energía que libera la batería en forma de calor y la energía que la batería puede almacenar en forma de energía eléctrica. De esta manera, como no se trata de una relación completamente lineal, se analizará el caso más desfavorable, que es, cuando la batería se encuentra en un estado de carga del 100%. Como se ha comentado anteriormente, se liberan entre uno 25kJ y 30kJ en forma de calor, mientras que la energía almacenada por la batería ronda los 41kJ de energía eléctrica.

De esta manera se podría estimar que aproximadamente el 70% de la energía eléctrica almacenada por la batería, se libera en forma de calor a través de la celda cuando esta sufre un abuso mecánico.

Esta relación, puede ser desarrollada aún más en el campo de los vehículos, si en lugar de considerar la potencia eléctrica de la batería, se habla de potencia eléctrica transmitidas a las ruedas. Para ello, se adoptarán diferentes coeficientes de eficiencia, basados en valores típicos de los diferentes elemento de la cadena de transmisión de potencia desde la batería a las ruedas.

Comenzando con la cadena de potencia, se tendrá en cuenta el grupo de baterías que conforman un módulo. Si bien el módulo de baterías puede asemejarse a un depósito de combustible de un vehículo de combustión interna convencional, es necesario aplicarle un cierto coeficiente de eficiencia, ya que, a encontrarse agrupadas, existen pequeñas resistencias internas que provocan ciertas pérdidas de energía antes de salir del propio módulo de baterías. También hay que tener en cuenta ciertas pérdidas asociadas al transporte de la energía hacia el motor y también la propia eficiencia del propio motor eléctrico. Puesto que se habló de potencia en las ruedas, es necesario incluir también la eficiencia de la transmisión de potencia mecánica a las ruedas.

Estos coeficientes de eficiencia, sin tener en cuenta la eficiencia en el proceso de carga ni la eficiencia de la producción de la energía ni el transporte de la red eléctrico, arroja valores habitualmente del 90%.

De esta manera, asumiendo un hipotético módulo de baterías con las características de la celda ensayada, se realizarán los siguientes cálculos para determinar cuanta energía térmica se estaría liberando en función de la energía eléctrica almacenada (Energía y Sociedad, 2023).

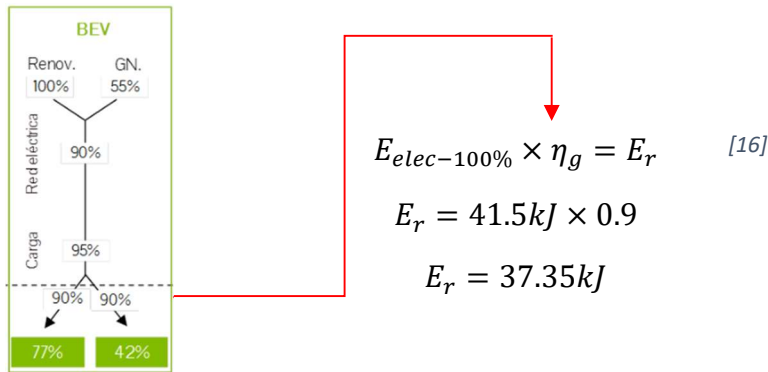


Figura 63. Rendimientos BEV

De esta manera, con una disminución del 10% de la energía disponible en el vehículo, que, presumiblemente puede ser menor debido a las temperaturas de trabajo de las celdas, se mantiene la potencia térmica liberada, por lo que se ha pasado a obtener que aproximadamente el 80% de la energía disponible en un vehículo eléctrico, puede ser liberada en forma de calor si no se hace una correcta gestión térmica de la batería.

Finalmente, de manera cualitativa, se van a establecer unos coeficientes que relacionen la capacidad de liberar energía con el peso de la celda con el fin de poder realizar comparaciones con otras fuentes de energía como pueden ser los combustibles fósiles tradicionales.

Conociendo la masa de la celda, que son aproximadamente 45g y la energía que es capaz de liberar, cuando se encuentra en un estado de carga del 100%, se puede realizar los siguientes cálculos:

$$H_{bat} = \frac{AHR}{m_{bat}} \quad [17]$$

$$H_{bat} = \frac{30kJ}{45g}$$

$$H_{bat} = 667 \text{ kJ/kg}$$

De esta manera se puede observar de manera cualitativa la capacidad de producción de calor que disponen las baterías por unidad de masa cuando se someten a un abuso mecánico severo, como ha sido el caso de los ensayos realizados en el presente proyecto, los cuales pueden producirse en el ámbito del vehículo eléctrico cuando se sufre un accidente que provoca deformaciones considerables en el propio vehículo y en las estructuras de protección de este.

5.7 El efecto de la ventana de zafiro

En el siguiente apartado, se procede con el análisis de las diferencias encontradas entre los dispositivos de medida, pues, al analizar las temperaturas máximas aportadas por la cámara termográfica y las aportadas por los termopares, se aprecia una gran diferencia entre estas.

Este fenómeno, puede asociarse principalmente al sistema de medida que emplea la cámara termográfica, puesto que está basado en la radiación emitida por la materia a alta temperatura. Como se ha comentado anteriormente, durante el proceso de penetración, puede aparecer también el fenómeno de venteo, el cual, como también se ha explicado en apartados anteriores, libera gran cantidad de materia a alta temperatura.

Esta materia liberada, contiene gran energía térmica, pero, debido a la propia naturaleza de la reacción, es posible que ésta pierda temperatura rápidamente puesto que el diferencial de temperaturas con el ambiente es considerablemente elevado y la superficie de contacto de las partículas también lo es. Estas partículas, cuando descienden de nuevo, pueden obstruir la propia ventana del calorímetro, de manera que obstaculizarían el campo de visión a la cámara tomográfica. También puede aparecer el fenómeno de que, al mantenerse las partículas en suspensión en el ambiente, éstas, ya a una temperatura menor, debido a su propia naturaleza, absorban parte de la radiación térmica emitida por los cuerpos a altas temperaturas.

Una vez expuesto esto, se puede afirmar que la cámara termográfica en este ensayo no puede ser utilizada como instrumento de análisis cuantitativo ya que como se ha comentado anteriormente, los valores que arroja, no son los que la celda realmente está alcanzando. De esta manera, se justifica el uso de las medidas obtenidas por los termopares en los cálculos realizados en capítulos anteriores, como, por ejemplo, la energía liberada. Si bien es cierto que los termopares, no siempre arrojan una medida fiable debido a las complicaciones que puedan ocurrir durante el ensayo, es un sistema de medida que se encuentra duplicado, por lo que, como se expuso en apartados anteriores, se justifica el uso de ellos como elemento de medida cuantitativo.

A pesar de la falta de exactitud de la cámara termográfica, sí que se ha empleado la precisión de esta para realizar, como se ha podido observar en el apartado de resultados, análisis de las distribuciones temporales y espaciales de las temperaturas durante los ensayos, es decir, a pesar de no aportar el valor de la temperatura máxima, si se puede localizar tanto el instante del ensayo como la posición en la celda.

Para futuros ensayos del mismo estilo, es importante destacar que, aplicando un factor de corrección en el procesado de la imagen termográfica, podrían obtenerse valores exactos de la temperatura de la celda. Para ello, sería necesario realizar nuevas calibraciones con la ventana de zafiro y teniendo en cuenta los valores de emisividad de las partículas para poder obtener valores exactos de temperatura. Esto podría realizarse mediante un ensayo en el cual se introdujese un elemento con una temperatura conocida y controlada en el interior del calorímetro y se variasen las condiciones de contorno mientras se realizan lecturas con la cámara para hallar diferentes valores y poder realizar una curva de calibración para la cámara termográfica.

5.8 La refrigeración de las celdas

Una de las conclusiones más claras que se obtienen tras el análisis de los resultados de los ensayos, es la importancia de una refrigeración adecuada a las baterías. Si en los ensayos de una sola celda, se han obtenido valores considerablemente altos de liberación de calor, cuando se habla de los grupos de baterías que se montan en vehículos eléctricos, encontramos un número de celdas muy considerables.

De esta manera, en caso de que una sola celda entrase en el proceso de fuga térmica debido a un abuso mecánico, podría inducir un abuso térmico en baterías colindantes y provocar una reacción en cadena que conllevaría un gran riesgo para los usuarios. Es por eso por lo que es necesario disponer de sistemas adecuados capaces de, en una situación de emergencia, evacuar todo el calor necesario para que la temperatura no alcance valores extremos que comprometan la integridad de todo el grupo de celdas que conforman las baterías.

A través de los resultados expuestos anteriormente, se pueden deducir una serie de criterios fundamentales para el diseño de los sistemas de refrigeración de las baterías, puesto que éstos, deben diseñarse para cualquier tipo de situación.

Una de las características que se pueden deducir de los resultados obtenidos, es la posición del foco frío, pues, como se ha podido ver en las distribuciones de temperatura, el mayor foco de calor, se encuentra en el polo negativo de la celda, lo que se ha considerado en el presente proyecto como la parte inferior de la celda. De esta manera, acercando el foco caliente al foco frío, se conseguirá mejorar en gran medida la transmisión de calor.

Otra de las deducciones que se puede hacer de los resultados, viene en concordancia con la anterior deducción, si bien se ha comentado que para la buena transmisión del calor, es necesario que foco caliente y foco frío se encuentren lo más cerca posible, también es necesario que el sistema de refrigeración se encuentre en la parte asociada al polo negativo de la celda (parte inferior en el proyecto), puesto que en el terminal positivo, es donde se encuentra la tapa de venteo, la cual no debe ser obstaculizada, puesto que, como se ha mencionado en ocasiones anteriores, la materia necesita ser expulsada para liberar presión en el interior de la batería.

5.9 Trabajos futuros

En el siguiente apartado, se procede a analizar los posibles trabajos futuros que podrían realizarse partiendo de la base establecida por el presente proyecto, ya que, se han analizado parámetros fundamentales del proceso de fuga térmica inducido por un abuso mecánico severo como es el punzonamiento. Si bien para el proyecto se ha empleado el punzonamiento como método de abuso mecánico severo, en la realidad, este abuso, puede venir dado por múltiples factores como por ejemplo una deformación extrema como la que podría producirse en un accidente de un vehículo eléctrico.

5.9.1 Análisis del comportamiento térmico

De los datos que se han obtenido durante los ensayos realizados, se han apreciado una serie de tendencias y comportamientos similares entre ensayos, los cuales han sido analizados anteriormente. En futuros trabajos, se podría partir de estos comportamientos repetitivos durante el transcurso de los ensayos para mejorar la seguridad sobre los grandes grupos de baterías.

Una vez más, estos trabajos, irían orientados en la mejora de la seguridad de las baterías que se montan en los vehículos eléctricos, de manera que, en función de la monitorización y análisis del comportamiento térmico de la batería en cada instante, podría determinarse el estado de esta y si este mismo estado se trata de una situación límite, la cual podría poner en riesgo la integridad de la propia batería y por tanto la integridad del usuario.

Una buena base de la que partir, podría ser el análisis de la tasa de temperatura, pues, como hemos indicado anteriormente, este parámetro ha sido uno de los elementos clave en la determinación de los estados de la reacción, en conjunto con la temperatura. De esta manera, con la monitorización de estos parámetros, sería posible establecer una serie de estrategias de refrigeración, de tal manera que, pudiera abordarse el principal problema de manera rápida y efectiva por ejemplo a través de la gestión de los medidos de refrigeración que dispone la batería.

5.9.2 Repetitividad en los ensayos

Con el fin de revalidar los resultados obtenidos en el presente proyecto, es importante tener en cuenta que en el futuro pueden realizarse más ensayos de penetración de aguja. De esta manera, deberían obtenerse valores similares a los del presente proyecto y también deberían arrojar conclusiones similares.

El objetivo principal de seguir analizando baterías mediante este tipo de ensayo es poder generar una base de datos lo suficientemente extensa como para que los comportamientos de las baterías bajo condiciones similares, no sigan comportamientos inesperados, de manera que, gracias a esto, se puedan realizar predicciones con una exactitud considerable durante los procesos que sufre la batería durante los abusos.

5.9.2.1 Análisis de diferentes estados de carga

Como se ha comentado en ocasiones anteriores, uno de los estudios con interés en el futuro, sería el análisis de más baterías en diferentes estados de carga. De esta manera, añadiendo más estados de carga a las baterías podría estudiarse las posibles relaciones existentes entre el SOC y la evolución de la temperatura.

De esta manera, podría realizarse de una manera más efectiva y precisa el monitorizado de los grandes grupos de baterías, pudiendo llegar a predecir comportamientos potencialmente peligrosos en éstas. También se podría estudiar nuevas estrategias de refrigeración en base a los diferentes estados de carga y a los comportamientos según el estado de carga.

De esta manera, estudiando la relación entre el estado de carga y la liberación de calor, también se podría realizar una revalidación de los resultados obtenidos en el presente proyecto, realizando modelos teóricos de comportamiento de las baterías que, variando los parámetros deseados otorguen el comportamiento que seguirá la batería.

5.9.2.2 Análisis del envejecimiento

A medida que una batería de litio, completa ciclos de carga y descarga, esta, sufre un pequeño deterioro que hace disminuir su capacidad. Es por esta razón que, en las celdas de litio, se habla de vida útil de la batería. A medida que se envejece la batería, la energía eléctrica almacenada disminuye, por lo que sería objeto de estudio el análisis de lo que sucede térmicamente durante un abuso mecánico severo.

Para realizar este tipo de ensayos, en primer lugar, sería conveniente establecer unos límites de envejecimiento, para lo que sería necesario realizar la caracterización de diferentes baterías para poder realizar una escala de envejecimiento.

CAPÍTULO 5: Conclusiones

Si bien podría aportar datos interesantes, estos procesos son largos de realizar, puesto que es necesario someter a la batería a tantos ciclos como sea necesarios para alcanzar el estado deseado. También existirían diversas variables dentro del envejecimiento como por ejemplo la corriente de descarga y la propia corriente de carga de la batería. Estos factores, podrían estresar la batería y provocar un envejecimiento diferente.

Tras realizar esta caracterización sería posible realizar ciclos de envejecimiento a determinadas baterías y proceder con los ensayos de abusos mecánicos y con el análisis de los resultados obtenidos, de manera que se pueda observar si existe un comportamiento diferente entre una batería en pleno estado de salud y una batería que haya sufrido un envejecimiento.

5.9.2.3 Análisis de conjuntos de baterías.

Finalmente, es importante mencionar la posibilidad de realizar este tipo de ensayos simultáneamente con varias celdas, de manera que se pueda estudiar lo que sucede con las celdas colindantes a una que se encuentra bajo un abuso mecánico severo. De esta manera se podría establecer un modelo de comportamiento para las celdas circundantes y poder expandir dicho modelo hacia toda la geometría de la batería con el fin de diseñar nuevos mecanismos de protección ante abusos severos que produciría un proceso de fuga térmica.

Este tipo de ensayos, podrían realizarse con un esquema similar al empleado en los ensayos del presente proyecto, realizando la penetración en una de las baterías y analizando el comportamiento que sufren el resto de las baterías. Para ello, sería necesario instrumentarlas adecuadamente y adaptar el montaje actual para poder implementar un grupo de celdas, así como introducir sistemas de control del voltaje que equilibrasen el voltaje de las baterías para simular de la forma más precisa, el comportamiento que se encontraría en una batería real de un vehículo eléctrico comercial.

CAPÍTULO 6: Referencias bibliográficas

Referencias

- Q. Walker, W., Cooper, K., Hughes, P., Doemling, I., Akhnouk, M., Taylor, S., . . . Darcy, E. (2022). The effect of cell geometry and trigger method on the risks associated with thermal runaway of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 1-15.
- ACEA. (2021, Febrero 4). ACEA - European Automobile Manufacturers' Association. Retrieved from <https://www.acea.auto/fuel-pc/fuel-types-of-new-cars-electric-10-5-hybrid-11-9-petrol-47-5-market-share-full-year-2020/>
- ACEA. (2022, Noviembre 3). ACEA - European Automobile Manufacturers' Association. Retrieved from <https://www.acea.auto/fuel-pc/fuel-types-of-new-cars-battery-electric-11-9-hybrid-22-6-and-petrol-37-8-market-share-in-q3-2022/>
- Castro, L. (2010, Septiembre). *ResearchGate*. Retrieved from https://www.researchgate.net/figure/Crystal-structures-of-LiFePO-4-and-FePO-4-PO-4-environments-of-phosphorus-have-been_fig4_231645930
- CO2 - Circle Lab. (2023, Mayo). Retrieved from <https://co2circlelab.eu/technologies/energy-storage>
- Energía y Sociedad. (2023). Retrieved from <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/4-2-la-eficiencia-energetica-del-vehiculo-electrico/>
- EV Database - Electric Vehicle Database. (2023, Mayo). Retrieved from EV Database: Compare electric vehicles: <https://ev-database.org>
- García, A., Monsalve-Serrano, J., Martínez-Boggio, S., & Soria Alcaide, R. (2023). Carbon footprint of battery electric vehicles considering average and marginal electricity mix. *Energy*, 1-18.
- García, A., Peng, Z., Monsalve-Serrano, J., Villalta, D., & Martínez-Boggio, S. (2022). Optical diagnostics of the venting spray and combustion behaviour during Li-ion battery thermal runaway induced by ramp heating. *Applied Thermal Engineering*, 1-17.
- Huang, Z., Li, H., Mei, W., Zhao, C., Sun, J., & Wang, Q. (2020). Thermal Runaway Behavior of Lithium Iron Phosphate Battery During Penetration. *Springer Science*, 1-22.
- Luoyang Tianhuan energy technology Co. (2022, Agosto 12). LYTH - Energy Technology. Retrieved from <https://www.lythbattery.com/lfp-battery-vs-nmc-battery-which-is-better/>
- Ma, T., Chen, L., Liu, S., Zhang, Z., Xiao, S., Fan, B., . . . Wang, F. (2019). Mechanics-morphologic coupling studies of commercialized lithium-ion batteries under nail penetration test. *Journal of Power Sources*, 1-7.
- Mao, B., Chen, H., Wu, T., & Wang, Q. (2018). Failure mechanism of the lithium ion battery during nail penetration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1-19.
- Mughees, N. (2023, Mayo 3). *Charged EVs Engineering News*. Retrieved from <https://chargedevs.com/newswire/umicore-begins-manufacturing-manganese-rich-ev-battery-materials/>

CAPÍTULO 6: Referencias bibliográficas

- Saritha, D. (25 Febrero 2022). In C. B. Department of Chemistry, *Smart Technologies for Energy, Environment and Sustainable Development, Vol 1* (pp. 521-529). Singapore: Springer.
- V. Shelke, A., E.H. Buston, J., Gill, J., Howard, D., C. Abbott, K., L. Goddard, S., . . . X. Wen, J. (2022). Characterizing and predicting 21700 NMC lithium-ion battery thermal runaway induced by nail penetration. *Applied Thermal Engineering*, 1-13.
- Ye, M., Hu, G., Guo, F., Huang, W., Wang, Z., Zhao, X., & Li, Y. (2020). A novel semi-analytical solution for calculating the temperature distribution of the lithium-ion batteries during nail penetration based on Green's function method. *Applied Thermal Engineering*, 1-13.
- Yokoshima, T., Mukoyama, D., Maeda, F., Osaka, T., Takazawa, K., Egusa, S., . . . Yamamoto, K. (2018). Direct observation of internal state of thermal runaway in lithium ion. *Journal of Power Sources*, 1-8.
- Zhao, W., Luo, G., & Wang, C.-Y. (2015). Modeling Nail Penetration Process in Large-Format Li-Ion Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 1-11.

CAPÍTULO 6: Referencias bibliográficas

DOCUMENTO 2: PLIEGO DE CONDICIONES

Tabla de contenido

| | |
|--|-----|
| DOCUMENTO 2: PLIEGO DE CONDICIONES..... | 93 |
| Capítulo 1: Introducción..... | 95 |
| 1.1 Introducción..... | 96 |
| 1.2 Estructura..... | 96 |
| 1.3 Condiciones legales..... | 96 |
| Capítulo 2: Condiciones para el desarrollo del proyecto..... | 97 |
| 2.1 Introducción..... | 98 |
| 2.2 Condiciones de los equipos de trabajo..... | 98 |
| 2.2.1 Ensayos..... | 98 |
| 2.2.1.1 Fuente Bidireccional..... | 98 |
| 2.2.1.2 Calorímetro..... | 98 |
| 2.2.1.3 Equipo de penetración..... | 99 |
| 2.2.1.4 Cámara termográfica..... | 99 |
| 2.2.2 Redacción..... | 99 |
| 2.3 Condiciones de los programas empleados..... | 99 |
| 2.3 Condiciones del puesto de trabajo..... | 100 |
| 2.3.1 Ergonomía..... | 101 |
| 2.3.2 Emergencias. Vías y salidas de evacuación..... | 103 |
| 2.3.3 Ruido..... | 103 |
| 2.3.4 Protección contra incendios..... | 103 |
| 2.3.5 Condiciones termo-higrométricas..... | 103 |
| 2.3.6 Iluminación..... | 104 |
| 2.3.7 Instalación Eléctrica..... | 104 |
| 2.4 Condiciones de la sala de ensayo..... | 104 |
| 2.4.1 Condiciones de realización de los ensayos..... | 105 |
| 2.4.2 Condiciones de la sala de ensayo..... | 105 |
| 2.4.2.1 Dimensiones y accesibilidad..... | 105 |
| 2.4.2.2 Ventilación y extracción de gases..... | 106 |
| 2.4.2.3 Aislamiento térmico y acústico..... | 107 |
| 2.4.2.4 Iluminación..... | 107 |
| 2.4.2.5 Protección eléctrica..... | 107 |
| 2.4.2.6 Almacenamiento de las celdas..... | 107 |
| 2.4.3 Tratado de instrumental..... | 107 |
| 2.4.3.1 Termopares..... | 108 |
| 2.4.3.2 Cámara termográfica..... | 108 |

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Introducción

En el siguiente documento, se procederá con al establecimiento de condiciones y requerimientos, los cuales deben de ser comprobados a lo largo de la realización del presente proyecto, tanto técnicos como legales. Puesto que el trabajo, no solamente contempla la parte de análisis de datos, se contemplarán tanto lo relacionado con la redacción del proyecto, tanto como los aspectos relacionados con la toma de los datos mostrados a lo largo del proyecto en el siguiente pliego de condiciones.

Puesto que el presente proyecto puede dividirse en dos secciones fundamentales, una de toma de medidas y otra de procesado de datos, se diferenciarán en el siguiente pliego de condiciones dos partes fundamentales en las que se tratarán los aspectos relativos a ambas partes.

1.2 Estructura

Como se ha comentado anteriormente este documento contiene el pliego de condiciones del proyecto. Este documento, se va a dividir en dos capítulos principales, si bien este primer capítulo se trata solamente de la introducción al pliego de condiciones, en el segundo capítulo encontraremos los diferentes requerimientos para la realización del trabajo. En primer lugar, se encontrarán las condiciones de los equipos de trabajo, a continuación, se hablará a cerca de los programas empleados durante el desarrollo del trabajo y finalmente se expondrán las condiciones de los puestos de trabajo en el cual se ha desarrollado el presente proyecto.

1.3 Condiciones legales

El presente proyecto se trata de un proyecto de carácter confidencial, es decir, el acceso al mismo no otorga derechos de alteración, modificación, explotación, reducción, distribución o comunicación pública de cualquier contenido presente.

CAPÍTULO 2: Condiciones para el desarrollo del proyecto

2.1 Introducción

Como se ha comentado anteriormente, este capítulo recogerá todas las condiciones a seguir durante el presente proyecto, bien de los equipos como de los programas y del espacio de trabajo.

2.2 Condiciones de los equipos de trabajo

En el siguiente apartado se procede con la exposición de los diferentes equipos empleados durante la realización del presente proyecto. Se diferencian dos apartados fundamentales, uno asociado a la parte experimenta y otro asociado a la parte de análisis.

2.2.1 Ensayos

A continuación, se procede con la descripción de los diferentes dispositivos empleados durante la realización de los ensayos.

2.2.1.1 Fuente Bidireccional

Empleada como se ha indicado a lo largo del proyecto, en el acondicionamiento de las celdas empleadas.

Tabla 18. Características de fuente bidireccional

| ARBIN Instruments | |
|-------------------------------|----------------------|
| Modelo | LBT21 Series |
| Descripción | Fuente bidireccional |
| Resolución | 24bits |
| Tipo de funcionamiento | AC/DC |
| | Carga/Descarga |

2.2.1.2 Calorímetro

Como se ha indicado a lo largo del proyecto, ha sido fundamental en la parte experimental del proyecto, ya que los ensayos se han realizado en su interior.

Tabla 19. Características de calorímetro

| THT (Thermal Hazard Technology) | |
|---------------------------------|---|
| Modelo | EV+Accelerating Rate Calorimeter (ARC) |
| Descripción | Calorímetro equipado cos equipos auxiliares para ensayos de penetración |
| Resolución | 0.02°C/min |
| Precisión | 0.02% |

CAPÍTULO 2: Condiciones para el desarrollo del proyecto

2.2.1.3 Equipo de penetración

A continuación, se procede a describir el sistema empleado para la penetración de las baterías.

Tabla 20. Características de equipo de penetración

| THT (Thermal Hazard Technology) | |
|---------------------------------|---|
| Modelo | NPCOcs |
| Descripción | Sistema de penetración regulable con seguimiento de la posición |
| Velocidad máxima | 100mm/s |
| Velocidad mínima | 1mm/s |

2.2.1.4 Cámara termográfica

En el siguiente apartado, se procede con la descripción de las especificaciones del equipo termográfico.

Tabla 21. Características de cámara termográfica

| TelOps | |
|--------------------------|--|
| Modelo | Fast IR |
| Descripción | Sistema de adquisición de imágenes termográficas |
| Velocidad máxima | 3100Hz |
| Resolución máxima | 0.018 °K |

2.2.2 Redacción

En lo relativo a los equipos empleados, durante la redacción, solamente ha sido preciso el uso de un ordenador portátil MSI GF62 8RE, cuyas especificaciones técnicas se describen en la siguiente tabla. Si bien se especifica el sistema operativo en la siguiente tabla, puesto que no es un artículo incluido con el propio dispositivo, se analizará aparte.

Tabla 22. Características de ordenador personal

| MSI GF62 8RE | |
|-----------------------------------|--|
| Procesador | Intel(R) Core (TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz 2.20 GHz |
| Tarjeta Gráfica | NVIDIA GeForce GTX 1060 6GB VRAM |
| Memoria RAM | 16 GB DDR4 2667 MHz |
| Unidades de Almacenamiento | HDD 1TB – ST1000M049-2GH172 SSD 256 GB – WDC PC SN520 SDAPNUW |
| Sistema Operativo | Windows 11 Home x64 bits |

2.3 Condiciones de los programas empleados

A continuación, se procede con la descripción de los programas empleados durante el desarrollo del siguiente proyecto. Se pueden apreciar tanto procesadores de texto, como procesadores de datos, editores de imágenes y programas de CAD 3D. Todos ellos, han sido usados de cierta manera en la realización del presente proyecto

- **Windows 11 Home:** Dado que el sistema operativo, se suministra al margen del dispositivo, es importante seleccionar una opción que proporcione una correcta compatibilidad con los programas. Para el caso, la decisión escogida fue una licencia personal de Windows 11 Home.
- **Pack Office 365:** Se trata de una agrupación de aplicaciones de la compañía Microsoft en las que se incluyen, procesadores de texto como Microsoft Word, diseñadores de presentaciones como Microsoft PowerPoint o procesadores de datos como Microsoft Excel. Estas tres aplicaciones han sido las fundamentalmente utilizadas a lo largo del presente proyecto. La licencia de este paquete de aplicaciones ha sido obtenida a través de la Universidad Politécnica de Valencia.
- **MATLAB R2022b:** Se trata de una herramienta de software matemático que permite el desarrollo de códigos para el procesamiento de datos, a través de un lenguaje de programación propio denominado “lenguaje M”, que ha sido empleado para el procesamiento y el graficado de diferentes datos a lo largo del proyecto. La licencia del programa, fue obtenida a través de la Universidad Politécnica de Valencia.
- **SolidWorks 2022:** Se trata de un software de diseño asistido por ordenador, del inglés (CAD) empleado para la generación de modelos 3D de diferentes elementos del proyecto, con el fin de realizar esquemas y figuras aclarativas de diferentes partes del proyecto. La licencia fue obtenida a través de la Universidad Politécnica de Valencia.
- **GIMP 2.10.12:** Se trata de una aplicación de edición de imágenes la cual permite crear y editar imágenes con el fin de crear imágenes explicativas en diferentes partes del proyecto. También se realiza edición de imágenes de manera que se logre mostrar información de manera más clara y específica. Este programa se trata de una aplicación de software libre por lo que no requiere de licencia.

2.3 Condiciones del puesto de trabajo

En el siguiente apartado, se procede con la exposición de las diferentes condiciones del lugar de trabajo. Estas condiciones del puesto de trabajo, influyen directamente sobre el rendimiento y sobre la salud del trabajador, por lo que un ambiente de trabajo en condiciones adecuadas es algo fundamental para la prevención de riesgos laborales y la fatiga durante el desarrollo del presente proyecto.

El marco legal al que se ampara el presente proyecto queda recogido en el Real Decreto 488/1997, del 14 de abril, en el cual quedan recogidos los aspectos relativos a la seguridad y la salud que se relacionan directamente con el presente proyecto. Estas actividades que precisan condiciones mínimas, son por ejemplo el trabajo con equipos que dispongan de pantallas, más concretamente, en la propia normativa el espacio de trabajo queda definido explícitamente

CAPÍTULO 2: Condiciones para el desarrollo del proyecto

como un conjunto de pantalla, dispositivo de adquisición de datos (teclado), un programa de software, diferentes accesorios de ofimática y un conjunto de mesa u asiento de trabajo.

A continuación, se procede a exponer de forma literal el fragmento mencionado de la propia normativa:

“un equipo con pantalla de visualización provisto, en su caso, de un teclado, o dispositivo de adquisición de datos, de un programa para la interconexión persona-máquina, de accesorios ofimáticos y de un asiento y mesa o superficie de trabajo, así como el entorno laboral inmediato”

En base a la propia normativa, se presentan los siguientes factores sensibles para anticipar los posibles riesgos laborales derivados del proyecto:

- Velocidad de la información
- Tiempo de exposición ante una pantalla
- Tiempo de concentración que requieren las acciones
- Complejidad de la tarea a realizar
- Posición de trabajo

A continuación, se van a exponer los posibles riesgos a los que se podrían sufrir durante la realización del presente proyecto. Para ello, se han dividido tres grandes bloques de los cuales se expondrán algunos ejemplos:

- Seguridad: caída de objetos, contactos eléctricos...
- Higiene industrial: temperaturas inadecuadas, mala iluminación, ruido excesivo...
- Ergonomía: fatigas diversas (mental, visual o física).

2.3.1 Ergonomía

Es fundamental para el buen desarrollo del trabajo el disponer de un espacio de trabajo apto y con unas características adecuadas. Si bien es cierto que existen gran cantidad de tipologías de cuerpos, en la industria del mobiliario, se han establecido unos estándares de fabricación que se ajustan a la gran mayoría de cualidades anatómicas y fisiológicas de las personas. Es importante mencionar las características térmicas del propio mobiliario, pues este, debe actuar de aislante térmico, es decir, debe tener una baja conductividad térmica. Finalmente, también es importante mencionar que es necesario disponer de superficies mate que eviten los reflejos y también se deben evitar las aristas y esquinas puntiagudas, añadiendo chaflanes y redondeos a éstas.

- **Espacio de trabajo:** EL puesto de trabajo debe disponer de unas medidas y condiciones suficientes que permitan la correcta realización de la tarea conveniente. Éste debe proporcionar al usuario un espacio suficiente para que, en caso de ser necesario, puedan realizarse cambios de postura además de los movimientos varios que requieran las tareas que se van a realizar.

CAPÍTULO 2: Condiciones para el desarrollo del proyecto

- **Mesa** (superficie de trabajo): Las condiciones de la mesa, deben permitir la correcta colocación de los diferentes elementos de ofimática y de los diferentes dispositivos, para ello, deberá tener una superficie lo suficientemente amplia y una superficie mate que evite reflejos. De esta manera se asegura una posición de trabajo cómoda.
- **Asiento:** El asiento debe ajustarse a los estándares mencionados anteriormente. De esta manera, los parámetros como la altura, la profundidad del asiento o la inclinación, entre otros, deben ser regulables con facilidad. En lo relativo al respaldo es importante encontrar una ligera prominencia que actúe como soporte lumbar. Si bien es recomendable el uso de sillas con ruedas, éstas deben de tener una resistencia al inicio del movimiento suficiente de manera que no se realicen movimientos involuntarios en suelo planos. Finalmente, en caso de que las regulaciones del asiento no sean suficiente para proporcionar al usuario un apoyo al suelo con los pies, será necesario el uso de reposapiés que solvante el problema.
- **Pantalla:** La pantalla deberá ser orientable e inclinable según las necesidades del usuario. También deberá tener una superficie que evite reflejos. La definición de ésta debe ser suficiente para que, en conjunto con una tamaño de fuente adecuado, los caracteres deben ser fácilmente legibles. Ésta, debe evitar fenómenos extraños de destellos u otras inestabilidades y debe permitir el ajuste de la imagen con facilidad (brillo, color, contraste...)
- **Posición de la pantalla:** la posición de la pantalla debe encontrarse a una distancia al menos de 40cm, ya que, el punto óptimo de en base al confort visual se encuentra entre los 45 y los 75 cm. La colocación del apantalla debe permitir la visión en ángulos de trabajo que correspondan con la línea de visión del usuario, así como el plano horizontal de la misma debe encontrarse entre los 120° del campo de visión del usuario, o, más recomendablemente dentro de un ángulo de 70°.
- **Teclado:** Respecto a éste, debe ser inclinable e independiente de la pantalla, de manera que permita el posicionamiento correcto y cómodo al usuario sin comprometer la correcta colocación de la pantalla. Este debe de estar colocado de manera que perita la correcta colocación sobre la mesa de brazos y manos. La fila central no deberá superar los 30mm respecto de la base de apoyo del teclado y deberá tener una inclinación entre los 0° y los 25° respecto de la horizontal. En caso de que éste incluya soporte para la colocación de las manos, éste debe ser de al menos 10cm. Finalmente el teclado deberá tener una superficie mate y presentar una simbología legible desde una correcta posición de trabajo.
- **Postura del Usuario:** Respecto a la postura que se debe adoptar, el usuario deberá colocarse con los muslos paralelos al suelo y las piernas en perpendicular. Los brazos deberán colocarse en vertical y los antebrazos horizontales, con ángulo recto en el codo. Con el fin de evitar el síndrome del túnel carpiano, se deben colocar las manos relajadas y sin extensión ni desviaciones laterales. Para ello también es recomendable implementar reposa manos para descansar las muñecas sobre él. La columna vertebral debe colocarse recta en vertical y la planta de pie paralela al suelo, de manera que forme un ángulo recto con la pierna. La línea de los hombros debe ser paralela al plano frontal

CAPÍTULO 2: Condiciones para el desarrollo del proyecto

sin girar el tronco. Finalmente, el ángulo de la línea de visión debe ser menor a 60° bajo la horizontal.

- **E.P.I.:** Respecto a los equipos de protección individual, se recomienda el uso de protectores de pantalla conformados por una estructura que sostiene un cristal superpuesto a la propia pantalla. De esta manera, se supone que se está protegiendo la vista del usuario y también añade ciertas características a la pantalla como claridad, contrastes o luminosidad en función del tipo de filtro que se le aplique al protector. En su defecto, se han desarrollado gafas especializadas en realizar este tipo de trabajos, de manera que no es necesaria la implementación de voluminosos sistemas en el entorno de trabajo del usuario.

2.3.2 Emergencias. Vías y salidas de evacuación

En caso de emergencia, las medidas deben ser las necesarias para permitir la correcta evacuación del personal, lo cual se puede conseguir a través de señalizaciones. Estas medidas, deben ser conocidas por todos los empleados. Para el presente proyecto, se asume que éstas fueron cumplidas durante la proyección y construcción del edificio.

2.3.3 Ruido

El marco legal al que se acoge el presente proyecto en materia de ruido, es el Real Decreto 1316/1989 de octubre. En él se establecen los límites a los cuales los trabajadores no deben estar expuestos. Para evitarlo, será necesario aplicar las medidas pertinentes bien al emisor o al receptor. Éstas carecen de obligatoriedad cuando los equivalentes diarios y los picos se mantengan por debajo de los 80db y los 140db respectivamente.

Si bien el espacio de trabajo en el cual se ha desarrollado el presente proyecto, carece de altos niveles de ruido, dado que necesita gran nivel de concentración, el nivel de ruido debe ser el menor posible.

2.3.4 Protección contra incendios

Las medidas contra incendios pertinentes, se suponen seguidas durante la proyección y construcción del propio edificio. Asimismo, se presupone que éstas se encuentran en condiciones óptimas gracias a las diferentes labores de mantenimiento que se siguen en el propio edificio.

2.3.5 Condiciones termo-higrométricas

Dependiendo de la persona, la situación de bienestar o confort térmico puede variar. Por lo general depende de los siguientes factores:

- Temperatura, humedad y velocidad del aire.
- Temperaturas de paredes, suelos y objetos.
- Actividad a desarrollar.
- Vestimenta.

CAPÍTULO 2: Condiciones para el desarrollo del proyecto

El presente apartado se ampara en el marco legal del Real Decreto 488/1997 sobre puestos de trabajo y establece determinados límites para los puestos de trabajo.

- Respecto a la temperatura de confort, la cual varía entre verano (23°C a 26°C), e invierno (20°C a 24°C). En cualquier caso, no debe exceder los 26°C.
- En cuanto a las posibles afecciones de sequedad en ojos y mucosas, se pueden prevenir manteniendo una humedad relativa del 45% al 60% a cualquier temperatura.

2.3.6 Iluminación

Para la iluminación del lugar de trabajo, puede emplearse tanto medios naturales como artificiales siendo recomendable siempre que sea posible la iluminación natural. No obstante, debido a la variación de ésta a lo largo de la jornada laboral, debe complementarse con fuentes de luz artificiales.

Si bien no existe una normativa específica de iluminación, el presente apartado se ampara en el Real Decreto 486/1997, del 14 de abril, donde se establecen las mínimas condiciones de salud y seguridad en lugares de trabajo. En ella se especifica que no deben usarse fuentes de luz que provoquen deslumbramientos ni excesivos contrastes en aquellas zonas poco iluminadas. En caso de usar una fuente de luz auxiliar, ésta no deberá colocarse en las proximidades inmediatas de la pantalla, ya que podría causar deslumbramientos.

El nivel de iluminación debe ser suficiente para desarrollar la tarea necesaria pero no excesiva para provocar contrastes como se ha mencionado anteriormente. Principalmente, se pretende evitar el contraste excesivo entre el brillo de la pantalla y el resto del entorno, para lo cual, será necesario regular la intensidad lumínica.

Finalmente, en la norma aparecen una serie de recomendaciones a cerca del posicionamiento de los elementos de trabajo, como por ejemplo la pantalla que debe colocarse de manera paralela a las ventanas, ni de frente ni de espaldas a ellas puesto que podrían generarse reflejos o deslumbramientos. También las superficies del mobiliario, preferentemente serán mates, ya con el fin de evitar reflejos.

2.3.7 Instalación Eléctrica

La instalación eléctrica, según la normativa, debe encontrarse proyectada, colocada y mantenida por una empresa debidamente autorizada por el Ministerio correspondiente o un similar de la Comunidad Autónoma donde se realice el trabajo. La propia instalación debe prevenir de riesgos como contactos con personal, incendios o explosiones, de manera que debe seguir las normativas establecida en los Reglamentos de Baja y Alta Tensión. Para los puestos de trabajo se establece lo siguiente:

- Cumplimiento de los requisitos a cerca de emisiones electromagnéticas que se exigen. Estos niveles deben ser insignificantes desde el punto de vista de la seguridad y salud del personal.
- Mantenimiento adecuado de cables y conexiones.
- Separación de cables eléctricos y telefónicos.
- Facilitación de registros que permitan el acceso a los cables.
- Longitudes suficientes de cales de manera que permitan futuras expansiones.

2.4 Condiciones de la sala de ensayo

Los ensayos experimentales conforman la base sobre la cual se ha logrado desarrollar y analizar el objeto del presente proyecto. No obstante, la realización de la parte experimental conlleva ciertos riesgos, tanto para los técnicos allí presentes como para el resto de las personas. Debido a esto, es fundamental que estas instalaciones sigan una serie de especificaciones las cuales se van a describir a continuación.

Si bien las especificaciones tienen como base la seguridad del personal presente, es importante destacar que también se busca la correcta realización de los experimentos para la obtención de unos resultados fiables y precisos.

Los aspectos más relevantes en ese sentido son:

1. Condiciones particulares de la sala de ensayos: establecimiento de condiciones específicas de esta sala, que garantizan la correcta ejecución de estos, sin comprometer la salud de las personas que necesitan encontrarse cerca de los equipos de medición y del propio calorímetro.
2. Tratamiento de los instrumentos de medida: Descripción concisa de los métodos a emplear en el manejo adecuado de los instrumentos de medida, de manera que se asegure la validez de los resultados obtenidos.

En resumidas cuentas, como se ha comentado, se abordarán los aspectos relacionados con las condiciones de la sala de ensayos y los instrumentos de medida para garantizar la seguridad de las personas y la fiabilidad de los resultados.

2.4.1 Condiciones de realización de los ensayos

Al tratarse de ensayos relativos a las baterías de litio, puesto que se trata de una tecnología relativamente novedosa, no existe gran cantidad de normativas a las que atenerse. No obstante, al tratarse de una mercancía peligrosa existen determinadas normativas a las que atenerse en cuanto a transporte y almacenamiento de estas.

Es por ello por lo que se debe hacer referencia a la normativa EN62281, a cerca del transporte de baterías de litio.

También es importante referirse a las normativas IEC 60086-4 a cerca de las normas de seguridad con pilas eléctricas de litio.

Siguiendo con las normativas a consultar, se encuentra la IEC 61960, la cual habla a cerca de los acumuladores de litio para elementos portátiles.

Finalmente se puede encontrar en el BOE, por parte del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, el pasado 2021, un Real Decreto (27/2021 del 19 de enero), el cual modifica anteriores del 2008 y del 2015 a cerca del tratamiento de los residuos de este tipo de baterías.

2.4.2 Condiciones de la sala de ensayo

La sala de ensayo es el espacio que alberga los diferentes dispositivos para poder realizar las diferentes pruebas que conforman la parte experimental del presente proyecto. Ésta debe de tener la capacidad de albergar todo estos dispositivos y a su vez permitir el acceso al personal necesario.

2.4.2.1 Dimensiones y accesibilidad

Se requiere que las dimensiones de la sala de ensayos sean adecuadas para facilitar la realización de todas las operaciones necesarias relacionadas con la realización de los experimentos, así como el montaje de los ensayos y la manipulación de los dispositivos. Para ello, es fundamental garantizar que la accesibilidad sea cómoda para el personal alrededor de los instrumentos de medida de la sala de ensayos.

Las zonas asignadas a mantenimiento y uso de la instalación deben tener una altura libre al suelo al menos de dos metros y un espacio libre de al menos 50 centímetros. La sala de ensayos debe tener las dimensiones necesarias para permitir las labores de montaje y comprobación de los ensayos sin suponer ningún riesgo para las personas.

El acceso a la sala se realizará a través de una puerta doble de al menos un metro por hoja de manera que si fuera necesario, se pudieran introducir equipos de grandes dimensiones. El laboratorio, debe contar con una salida clara y visible hacia el exterior de este, la cual, debe encontrarse siempre despejada. Además, dichas puertas, con apertura hacia el exterior, además de ignifugas deben tener un espesor suficiente que garantice el aislamiento térmico y acústico de la sala. Este requerimiento de la sala, viene impuesto por la climatización de la sala, la cual es capaz de atemperar toda la sala a una temperatura específica para la realización de determinados ensayos.

El acceso a esta sala de ensayo está restringido al personal autorizado. La salida de emergencia, mencionada anteriormente, además de tener una apertura hacia el exterior, debe ser posible su apertura a través del accionamiento de una barra interior, como habitualmente están conformadas este tipo de puertas de emergencia.

Finalmente, la disposición de los diferentes equipos de medida debe permitir una supervisión continua durante el proceso del ensayo.

2.4.2.2 Ventilación y extracción de gases

Durante el transcurso de los diferentes ensayos, será necesario disponer de un equipo de extracción de gases lo más próximo posible a donde tiene lugar el propio ensayo. En el caso del presente proyecto, se ha procedido a emplear el sistema de extracción incorporado como accesorio en el propio calorímetro, cuyas características pueden ser consultadas a través del fabricante.

También es necesario un aporte de aire limpio desde el exterior, para lo que se emplearán los equipos de climatización instalados en el edificio dónde se encuentra la sala de ensayos, que son capaces de aportar un caudal constante de aire a una temperatura establecida, de manera que la sala de ensayos reciba aire limpio y atemperado. Nuevamente, las características de este dispositivo, se encuentran referidas en el proyecto de construcción de todo el edificio.

El personal presente durante el ensayo deberá de disponer de un E.P.I. compuesto al menos por una mascarilla de tipo FFP2 mínimo, por si en el momento de la penetración, algunas de las partículas fueran liberadas al ambiente.

Los conductos del aporte de aire, deben ser estancos y aislados térmicamente, mientras que los conductos asignados a los gases de extracción deben cumplir solamente la condición de ser estancos.

Finalmente, los gases de extracción, son tratados de manera que se emitan la menos cantidad posible de partículas al ambiente. Ya que el edificio en el que se encuentra la sala de ensayos, está localizado en el interior de la universidad y en las cercanías de un edificio en el cual se imparte la docencia, la extracción de estos y otros gases del edificio, se realizan por la parte superior del mismo a una altura determinada sobre el suelo. Estas especificaciones, nuevamente corresponden al proyecto de la construcción del propio edificio.

2.4.2.3 Aislamiento térmico y acústico

Respecto al aislamiento térmico, gracias al propio calorímetro, no es necesario realizar ningún aislamiento extra, puesto que el ensayo se desarrolla en su totalidad en el interior de éste. No obstante, a pesar de que el ensayo se realice en su totalidad en el interior del calorímetro, se dispondrá un sarcófago metálico que cubrir las posibles proyecciones de materia que puedan escapar del calorímetro debido a la temperatura. Este sarcófago delimitará una zona de seguridad la cual deberá mantenerse completamente limpia y sin personal para evitar cualquier tipo de riesgo, debido a que las partículas que puede salir, se encuentran a alta temperatura.

Respecto al aislamiento acústico, no será necesario mayor actuación, pues no se trata de un ensayo extremadamente ruidoso y no se superan los 80dB durante la parte más crítica del ensayo.

2.4.2.4 Iluminación

Este apartado se acoge al marco de la norma DIN 5035, la cual especifica la iluminación concreta que debe disponer la sala. Concretamente se habla de un nivel de iluminancia 7 (750 lux), asociado a “tareas visuales normales y detalles de tamaño medio con contrastes reducidos”. Para alcanzar estos niveles se dispondrán seis luminarias equipadas con iluminación LED.

Si bien debe mantenerse este nivel de iluminación durante la preparación del ensayo, al a hora de realizar la penetración, se deberán apagar todas las luminarias de la sala. De esta manera se conseguirá una mejor definición en la cámara termográfica.

2.4.2.5 Protección eléctrica

Con el fin de prevenir posibles accidentes, debe situarse un interruptor de energía general en el exterior de la sala de ensayo, en un punto en el cual sea posible desconectar la corriente de cada uno de los equipos de la sala de ensayos.

También será necesario que cada dispositivo esté equipado con interruptor de emergencia visible y fácilmente accionable, de manera que pueda cortarse e suministro de alguno de los equipos si entrase en fallo.

2.4.2.6 Almacenamiento de las celdas

Como se ha mencionado al comienzo del capítulo, para el almacenamiento de las baterías, se seguirá la misma normativa que para su transporte, ya que las celdas no permanecerán almacenadas por un gran periodo de tiempo.

Para ello, se debe seguir la normativa EN62281.

2.4.3 Tratado de instrumental

Respecto al tratado del instrumental se debe hacer referencia principalmente a los termopares y al equipo termográfico. Los cuales requieren una calibración previa al ensayo que procede a describirse a continuación.

2.4.3.1 Termopares

Los termopares de tipo N son los utilizados para los diferentes ensayos. Para la correcta utilización de éstos, deben calibrarse previamente con la unidad de medición a la que se van a conectar. Para ello, es necesario conectarlos y realizar una serie de pruebas especificadas por el fabricante. Concretamente el equipo empleado para la toma de datos de los termopares será uno de los módulos del propio equipo de control del calorímetro.

Los detalles del proceso de calibración de los termopares, deben consultarse en el manual del fabricante.

Una vez se ha realizado la calibración, es necesario colocar los termopares en su correspondiente lugar en la batería previamente preparada según se ha explicado en el primer documento del presente proyecto. Los termopares deben ser colocados directamente en la superficie de la batería y fijados mediante un alambre de forma que no se obstruya el campo de visión de la cámara en exceso.

2.4.3.2 Cámara termográfica

La preparación de la cámara termográfica es fundamental puesto que trata de una de las principales fuentes de medida del presente proyecto.

Para la preparación de ésta, será necesario la colocación en una superficie nivelada respecto del suelo. Con el objetivo de la cámara se debe realizar un encuadre aproximado a la ventana del calorímetro. Posteriormente a esto, se debe realizar un ajuste más preciso. Para ello, se introducirá una réplica de la batería realizada a base de un redondo de aluminio (de idénticas dimensiones), el cual se calentará empleando una llama de soplete cualquiera, de manera que se caliente la propia batería. Para la realización de este proceso, es necesaria la intervención de al menos dos personas. Mientras se realiza el calentamiento con la llama de la réplica de la batería, se debe ir centrando la imagen y ajustando la resolución de la cámara para obtener los resultados deseados.

DOCUMENTO 3: PRESUPUESTO

DOCUMENTO 3: PRESUPUESTO

ÍNDICE

| | |
|--|-----|
| DOCUMENTO 3: PRESUPUESTO | 109 |
| Capítulo 1: Introducción..... | 111 |
| 1.1 Introducción | 112 |
| 1.2 Estructura | 112 |
| Capítulo 2: Cuadro de precios | 113 |
| 2.1 Mano de obra | 114 |
| 2.2 Materiales..... | 114 |
| Capítulo 3: Obtención de Costes | 115 |
| 3.1 Metodología | 116 |
| Capítulo 4: Unidades de obra | 118 |
| 4.1 Introducción | 119 |
| 4.2 Cuadro de precios descompuestos | 119 |
| 4.2.1 Tratamiento y post-procesado de los resultados | 119 |
| 4.2.2 Sincronización y graficado de resultados | 120 |
| 4.2.3 Redacción de documentos | 121 |
| Capítulo 5: Presupuestos finales | 122 |
| 5.1 Presupuesto parcial..... | 123 |
| 5.2 Presupuesto total | 123 |

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Introducción

En el capítulo mostrado a continuación, se procede con la exposición de los costes asociados a la realización del proyecto. En el presente capítulo, no se tendrán en cuenta gastos asociados a instalaciones del departamento como podrían ser climatización, seguridad, iluminación... Ya que éstos no se consideran directamente relacionados con el presente proyecto. Si se tendrán en cuenta los costes asociados a la realización de los ensayos como por ejemplo los equipos empleados durante los ensayos experimentales, ya que, el presente proyecto se divide en dos partes fundamentales, el proceso experimental y el procesado y análisis de los resultados obtenidos en los ensayos. Es por ello, que el siguiente capítulo, se mostrarán los gastos asociados directamente con el proceso experimental, el procesado de datos y el posterior análisis de los datos y la redacción, es decir, equipos y programas informáticos empleados con el fin exclusivo e la realización del presente proyecto.

1.2 Estructura

La estructura a seguir durante el siguiente capítulo, se va a describir a continuación. Para el presente proyecto, se ha empleado el método de precios descompuestos para desarrollar el presupuesto, como se ha comentado anteriormente, de los gastos asociados exclusivamente al proyecto.

En primer lugar, se van a mostrar los diferentes cuadros de precios, tanto la mano de ora, como los materiales. En segundo lugar, se explicarán los criterios seguidos para la obtención de los costes. En tercer lugar, se procederá con la descripción de las diferentes unidades de obra, en las cuales, este proyecto ha sido dividido. A continuación, se procederá con el cálculo de los diferentes presupuestos parciales, que resultan del producto del coste de las mediciones por su correspondiente unidad de obra. Finalmente se expondrá un resume final donde se especificará el presupuesto general del proyecto.

CAPÍTULO 2: Cuadro de precios

CAPÍTULO 2: Cuadro de precios

2.1 Mano de obra

A continuación, se procede con la exposición de la tabla que muestra la mano de obra asociada al desarrollo exclusivo del presente proyecto.

Tabla 23. Cuadro de precios de mano de obra

| Referencia | Unidad | Concepto | Precio |
|------------|-----------|--------------------------------------|---------|
| MO1 | Horas [h] | Ingeniero Técnico Superior | 21,56 € |
| MO2 | Horas [h] | Ingeniero Técnico Superior | 21,56 € |
| MO3 | Horas [h] | Ingeniero Superior (Grado de Doctor) | 35,00 € |
| MO4 | Horas [h] | Ingeniero Superior (Grado de Doctor) | 35,00 € |

2.2 Materiales

En el siguiente apartado se procede con la exposición de los materiales empleados para la realización del proyecto. Como se ha mencionado anteriormente, esto comprenderá tanto aplicaciones de software empleado en el post-procesado de los datos obtenido y en la redacción del propio proyecto como en los procesos experimentales. Asimismo, también se incluye el programa de modelado empleado para la creación de figuras y esquemas ilustrativos. El software empleado en la creación de imágenes aparecerá únicamente en la tabla de a continuación, ya que se ha empleado una aplicación de software libre sin coste alguno. Para los equipos específicos de obtención de datos durante el ensayo, no se contará el software que estos necesitan ya que vienen incluidos con el propio equipo.

Tabla 24. Cuadro de precios de materiales

| Referencia | Unidad | Concepto | Precio |
|------------|--------------|--|-----------------|
| MAT1 | Unidad [Ud.] | Ordenador Portátil [MSI-GF62-8RE] | 1.200,00 € |
| MAT2 | Unidad [Ud.] | ARBIN LBT21 | 32.500,00 € |
| MAT3 | Unidad [Ud.] | THT EV+ARC+NPCOCs | 150.000,00 € |
| MAT 4 | Unidad [Ud.] | TelOps FastIR | 125.000,00 € |
| MAT5 | Unidad [Ud.] | Sistema Operativo [WINDOWS-11] | 220,00 € |
| MAT6 | Unidad [Ud.] | Pack Office 365 - 2023 | 99,00 € |
| MAT7 | Unidad [Ud.] | MatLab R2022b Standart | 860,00 € |
| MAT8 | Unidad [Ud.] | SolidWorks 2022 | 4.999,00 € |
| MAT9 | Unidad [Ud.] | GIMP 2.10.12 | GRATUITO |

CAPÍTULO 3: Obtención de Costes

3.1 Metodología

Para realizar el presupuesto, es necesario establecer una serie de criterios y realizar unas aclaraciones a cerca de la obtención de los costes del proyecto.

En lo relativo a las licencias de los programas informáticos, se han tomado los precios actuales de las licencias anuales, a excepción del programa de edición de imágenes que como se ha comentado anteriormente se trata de un software gratuito.

Los salarios de las diferentes personas implicadas han sido obtenidos directamente del manual de procedimiento de contratación de personal del departamento y se hace una diferenciación entre los profesores que tutelan y los alumnos que participan realizando diferentes Trabajos de Final de Grado.

Los equipos y programas (hardware y software) empleados, no se ha considerado el coste de adquisición, sino que se va a emplear la amortización de los productos realizados durante el propio proyecto. La amortización ha sido calculada mediante la siguiente fórmula:

$$A = C \times t_{amort} \times \frac{a}{T_{\acute{u}til}} \quad [18]$$

Donde **A** es la amortización del software o hardware en concreto, **C** se trata del coste de adquisición, **t** se trata del tiempo de amortización, **a** se trata del porcentaje de amortización y **T_{útil}** es la vida útil de software o hardware. Para realizar la amortización, se han considerado jornadas de 8 horas y 238 días laborables al año y en la siguiente tabla se muestra la amortización de los diferentes equipos y programas.

Tabla 25. Amortización de materiales

| Producto | Coste de Adquisición [€] | Vida útil [años] | Coste [€/h] | Tiempo amortización [h] | Porcentaje utilización [%] | Amortización [€] |
|-----------------------------------|--------------------------|------------------|-------------|-------------------------|----------------------------|------------------|
| Ordenador Portátil [MSI-GF62-8RE] | 1.200,00 € | 5 | 0,1261 € | 265 | 100% | 33,40 € |
| ARBIN LBT21 | 32.500,00 € | 5 | 3,4139 € | 20 | 8% | 5,15 € |
| THT EV+ARC+ NPCOcs | 150.000,00 € | 5 | 15,7563 € | 50 | 19% | 148,64 € |
| TelOps FastIR | 125.000,00 € | 5 | 13,1303 € | 50 | 19% | 123,87 € |

CAPÍTULO 3: Obtención de Costes

| Producto | Coste de Adquisición [€] | Vida útil [años] | Coste [€/h] | Tiempo amortización [h] | Porcentaje utilización [%] | Amortización [€] |
|--------------------------------|--------------------------|------------------|-------------|-------------------------|----------------------------|------------------|
| Sistema Operativo [WINDOWS-11] | 220,00 € | 5 | 0,0231 € | 265 | 100% | 6,12 € |
| Pack Office 365 - 2023 | 99,00 € | 1 | 0,0520 € | 200 | 75% | 7,85 € |
| MatLab R2022b Standard | 860,00 € | 1 | 0,4517 € | 50 | 19% | 4,26 € |
| SolidWorks 2022 | 4.999,00 € | 1 | 2,6255 € | 15 | 6% | 2,23 € |

CAPÍTULO 4: Unidades de obra

CAPÍTULO 4: Unidades de obra

4.1 Introducción

El presente proyecto, puede dividirse esencialmente en tres actividades fundamentales, o, unidades de obra:

- Proceso experimental
- Procesado de datos y análisis de resultados.
- Redacción de documentos.

4.2 Cuadro de precios descompuestos

A continuación, se procede con la exposición de las tablas asociadas a los cuadros de precios descompuestos de cada una de las actividades descritas anteriormente.

4.2.1 Proceso experimental

El siguiente apartado, comprende el proceso experimental del presente proyecto, en él se agrupa tanto la preparación de los ensayos como el empleo de los equipos para la obtención de los resultados pertinentes.

Tabla 26. Cuadro de precios descompuestos de proceso experimental

| Costes directos | | | | | |
|------------------------|---------------|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Referencia | Unidad | Concepto | Rendimiento | Precio [€/h] | Importe [€] |
| MO1 | Horas [h] | Ingeniero Técnico Superior | 1 | 21,56 € | 21,56 € |
| MO2 | Horas [h] | Ingeniero Técnico Superior | 0,5 | 21,56 € | 10,78 € |
| MO3 | Horas [h] | Ingeniero Superior (Grado de Doctor) | 1 | 35,00 € | 35,00 € |
| MO4 | Horas [h] | Ingeniero Superior (Grado de Doctor) | 0,5 | 35,00 € | 17,50 € |
| MAT1 | Unidad [Ud.] | Ordenador Portátil [MSI-GF62-8RE] | 1 | 0,13 € | 0,13 € |
| MAT2 | Unidad [Ud.] | ARBIN LBT21 | 1 | 3,41 € | 3,41 € |
| MAT3 | Unidad [Ud.] | THT EV+ ARC+ NPCOcs | 1 | 15,76 € | 15,76 € |
| MAT4 | Unidad [Ud.] | TelOps FastIR | 1 | 13,13 € | 13,13 € |
| MAT5 | Unidad [Ud.] | Sistema Operativo [WINDOWS-11] | 1 | 0,0231 € | 0,02 € |
| MAT6 | Unidad [Ud.] | Pack Office 365 - 2023 | 1 | 0,0520 € | 0,05 € |
| MAT7 | Unidad [Ud.] | MatLab R2022b Standart | 1 | 0,4517 € | 0,45 € |
| SUBTOTAL | | | | | 117,79 € |

CAPÍTULO 4: Unidades de obra

| Costes directos complementarios | |
|--|-----------------|
| 2% de los costes directos | 2,36 € |
| Costes indirectos | |
| 8% de los costes directos | 9,42 € |
| Coste total | |
| TOTAL | 129,57 € |

4.2.2 Procesado de datos y análisis de resultados.

Durante el desarrollo de esta actividad, se comprende el procesado de los datos, el graficado de los resultados, así como la detección de ciertas anomalías durante el proceso de realizar las gráficas que más tarde serían analizadas. También se incluyen los cálculos realizados a través de las herramientas de software especificadas para la obtención de resultados, tanto en los apartados de análisis como los apartados de conclusiones. Finalmente se incluyen también las tareas de análisis de resultados.

Tabla 27. Cuadro de precios descompuestos de análisis de resultados

| Costes directos | | | | | |
|--|--------------|--------------------------------------|-------------|--------------|----------------|
| Referencia | Unidad | Concepto | Rendimiento | Precio [€/h] | Importe [€] |
| MO1 | Horas [h] | Ingeniero Técnico Superior | 1 | 21,56 € | 21,56 € |
| MO3 | Horas [h] | Ingeniero Superior (Grado de Doctor) | 0,1 | 35,00 € | 3,50 € |
| MAT1 | Unidad [Ud.] | Ordenador Portátil [MSI-GF62-8RE] | 1 | 0,13 € | 0,13 € |
| MAT2 | Unidad [Ud.] | Sistema Operativo [WINDOWS-11 Home] | 1 | 0,0231 € | 0,02 € |
| MAT3 | Unidad [Ud.] | Pack Office 365 - 2023 | 1 | 0,0520 € | 0,05 € |
| MAT4 | Unidad [Ud.] | MATLAB R2022b Standart | 1 | 0,4517 € | 0,45 € |
| SUBTOTAL | | | | | 25,71 € |
| Costes directos complementarios | | | | | |
| 2% de los costes directos | | | | | 0,51 € |
| Costes indirectos | | | | | |
| 8% de los costes directos | | | | | 2,06 € |
| Coste total | | | | | |
| TOTAL | | | | | 28,28 € |

CAPÍTULO 4: Unidades de obra

4.2.3 Redacción de documentos

Durante esta unidad de obra, se comprende todo el desarrollo escrito del presente proyecto, desde los diferentes análisis de mercado del comienzo del primer documento, hasta el análisis de resultados, análisis de anomalías y redacción de conclusiones.

Tabla 28. Cuadro de precios descompuestos de redacción de documentos

| Costes directos | | | | | |
|---------------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------|--------------|----------------|
| Referencia | Unidad | Concepto | Rendimiento | Precio [€/h] | Importe [€] |
| MO1 | Horas [h] | Ingeniero Técnico Superior | 1 | 21,56 € | 21,56 € |
| MO3 | Horas [h] | Ingeniero Superior (Grado de Doctor) | 0,1 | 35,00 € | 3,50 € |
| MO4 | Horas [h] | Ingeniero Superior (Grado de Doctor) | 0,3 | 35,00 € | 10,50 € |
| MAT1 | Unidad [Ud.] | Ordenador Portátil [MSI-GF62-8RE] | 1 | 0,13 € | 0,13 € |
| MAT2 | Unidad [Ud.] | Sistema Operativo [WINDOWS-11 Home] | 1 | 0,0231 € | 0,02 € |
| MAT3 | Unidad [Ud.] | Pack Office 365 - 2023 | 1 | 0,0520 € | 0,05 € |
| MAT4 | Unidad [Ud.] | SolidWorks 2022 | 1 | 2,6255 € | 2,63 € |
| SUBTOTAL | | | | | 38,39 € |
| Costes directos complementarios | | | | | |
| 2% de los costes directos | | | | | 0,77 € |
| Costes indirectos | | | | | |
| 8% de los costes directos | | | | | 3,07 € |
| Coste total | | | | | |
| TOTAL | | | | | 42,23 € |

CAPÍTULO 5: Presupuestos finales

CAPÍTULO 5: Presupuestos finales

5.1 Presupuesto parcial

A continuación, se expone una tabla que recoge todos los valores calculados durante el desarrollo de este capítulo de presupuesto para realizar el presupuesto parcial, el cual no incluye ni tasas impositivas, ni beneficios ni gastos generales.

Tabla 29. Presupuesto parcial

| Presupuesto parcial | | | | |
|--|-----------|--------------|--------------|--------------------|
| Unidades de obra | Unidad | Medición [h] | Precio [€/h] | Importe [€] |
| Proceso Experimental | Horas [h] | 60 | 129,57 € | 7.774,35 € |
| Tratamiento y post-procesado de los resultados | Horas [h] | 90 | 28,28 € | 2.545,57 € |
| Redacción de documentos | Horas [h] | 115 | 42,23 € | 4.855,92 € |
| TOTAL | | | | 15.175,84 € |

5.2 Presupuesto total

Finalmente, se procede a exponer la tabla con el presupuesto total del proyecto, en el que se incluye:

- Presupuesto de ejecución material: se trata de la suma de la suma de los diferentes presupuestos parciales del proyecto, que, en el caso del presente proyecto, se trata de un proyecto de investigación con un solo presupuesto parcial.
- Presupuesto de ejecución por contrata: En él se incluyen los gastos generales y el beneficio industrial, que deben aplicarse sobre el presupuesto de ejecución material.
- IVA: Aplicado directamente al presupuesto de ejecución material.

Tabla 30. Gastos asociados

| | [%] | Importe [€] |
|----------------------|-----|-------------|
| Gastos generales | 12% | 1.821,10 € |
| Beneficio Industrial | 6% | 910,55 € |

CAPÍTULO 5: Presupuestos finales

Tabla 31. Presupuesto final

| | |
|---------------------------------------|--------------------|
| Presupuesto de ejecución material | 15.175,84 € |
| Presupuesto de ejecución por contrata | 17.907,49 € |
| IVA (21%) | 3.186,93 € |
| Presupuesto total | 21.094,42 € |

Finalmente, el presupuesto total es calculado mediante la suma del presupuesto por contrata más el impuesto del valor añadido (IVA).

Tras realizar los cálculos expuesto este último apartado del proyecto, el coste total de proyecto asciende a los **VEINTEÚN MIL NOVENTA Y CUATRO CON CUARENTA Y DOS.**