

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Culiacán



TITULACION INTEGRAL

OPCION:

TESIS PROFESIONAL

NOMBRE DEL PROYECTO

Evaluación del desempeño operativo de baterías de ion-litio en función de la variabilidad de temperatura.

ALUMNO:

Fidel Quintero Rojo

CARRERA:

Ingeniería Mecatrónica

NUMERO DE CONTROL:

20170509

Culiacán, Sinaloa (2026)



Instituto Tecnológico de Culiacán

DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ASUNTO: **Autorización de Impresión**

Culiacán, Sinaloa, 13/04/2026 12:30

C. FIDEL QUINTERO ROJO
PASANTE(S) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
P R E S E N T E.

De acuerdo con fallo emitido por la Comisión Revisora Integrada por:

Cédula Profesional

Presidente:	Doctor en Ingeniería de Materiales Ismael Díaz Peña	9798300
Secretario:	Ingeniero Industrial en Mecánica Angel Velazco	1434602
Vocal:	Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos Jennifer Vianey Félix Medina	12558860

Y considerando que reúne los requisitos establecidos en la Opción: **TITULACIÓN INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL "EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO OPERATIVO DE BATERÍAS DE ION-LITIO EN FUNCIÓN DE LA VARIABILIDAD DE TEMPERATURA"**, damos a usted nuestra autorización para que proceda a imprimir su trabajo profesional.

Sin otro particular, quedo de usted.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®

CONCEPCIÓN MENDOZA ROSALES
LIC. CONCEPCIÓN MENDOZA ROSALES
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

 **Educación** | TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Secretaría de Educación Pública
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN
DEPARTAMENTO DE
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



2026
año de
Margarita
Maza



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento a mi familia por haberme dado la fuerza, la salud y la tenacidad necesarias para concluir esta significativa fase de mi educación profesional. Quiero manifestar mi más profundo reconocimiento a mi familia, quienes han sido la base esencial en mi crecimiento tanto personal como académico, proporcionándome apoyo incondicional, motivación continua y fe en cada uno de mis propósitos.

Mi agradecimiento se extiende de forma especial a mi director de tesis, por su guía, disposición y acompañamiento a lo largo del desarrollo de esta labor, así como por sus observaciones y contribuciones técnicas que enriquecieron esta investigación. Del mismo modo, agradezco a los profesores de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica, quienes, durante mi formación, compartieron sus conocimientos, experiencia y dedicación a la educación, aportando de manera significativa a mi preparación profesional. Por último, expreso mi gratitud al maestra Ismael Díaz Peña, Angel Velazco, Jose Angel Alcaraz Vega y a los profesores que me dieron a lo largo de la carrera además de la institución y al laboratorio en el que se llevaron a cabo las pruebas experimentales, por proporcionar los recursos, herramientas y el espacio requerido para el desarrollo del proyecto titulado:

“Evaluación del desempeño operativo de baterías de ion-litio en función de la variabilidad de temperatura”.

INDICE GENERAL

I. RESUMEN	8
II. INTRODUCCION.....	8
Antecedentes	9
Planteamiento del problema.....	10
Justificación	10
Objetivo general.....	11
Objetivos específicos.....	11
Planteamiento de hipótesis.....	11
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	11
A. Fundamentos electroquímicos de las baterías de ion-litio	11
1. Baterías de litio.....	11
2. ¿Cómo se fabrica una batería de litio?	12
3. Materiales anódicos.....	12
4. Materiales basados en intercalación	13
5. Materiales basados en reacciones de conversión.....	13
6. Materiales basados en reacción de aleación	14
7. Cloruro de Tionilo (SOCl_2)	14
9. Propiedades químicas y reactividad.....	15
10. Estructura molecular.....	16
B. Influencia de la temperatura en el desempeño electroquímico	17
1. Efectos de la temperatura en las baterías de litio.....	17
2. El funcionamiento de la batería a temperaturas elevadas afecta negativamente su vida útil	19
3. Cinética de las Reacciones Exotérmicas en Celdas de Litio	19
4. Dinámica de la Activación Térmica	19
4. Etapas de la Reacción Exotérmica	20
C. Transferencia de calor en sistemas electroquímicos.....	21
1. Movilidad.....	21
2. Modelo eléctrico	21
3. Modelo Térmico.....	22
4. Capacidad en temperaturas.....	23
D. Degradación térmica y fuga térmica	24
1. Mecanismos de Degradación Eléctrica: Dendritas y Arcos	24
2. Fases del crecimiento dendrítico	25
3. Efectos	25
4. Sobrecalentamiento.....	26

5. Rangos de temperatura seguros.....	26
6. Estabilidad térmica	27
7. Normativa Internacional de Seguridad (UN 38.3 o IEC 62133)	29
8. Factores de riesgo.....	29
9. Desbordamiento térmico e incendio.....	30
10. Emisión de gases y compuestos tóxico	30
11. Explosión mecánica y liberación de energía cinética	31
12. Inestabilidad eléctrica y formación de dendritas.....	31
13. Toxicidad y Cinética de los Gases de Combustión	32
E. Sistemas de control térmico en baterías	34
1. Métodos principales.....	34
2. Métodos pasivos y activos.....	35
3. Métodos de equilibrado	36
4. Métodos de equilibrado	36
5. Aplicaciones Industriales	36
1. Estándares globales	38
2. Normativas de UL (Underwriters Laboratories)	38
3. Normativas de IEC (Comisión Electrotécnica Internacional).....	39
5. Normativas de SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices).....	39
6. Regulaciones de la ONU y el Departamento de Transporte	39
1. An Experimental Study of a Lithium Ion Cell Operation at Low Temperature Conditions	39
2. A study on time-dependent low temperature power performance of a lithium-ion battery	40
3. Performance Analysis of Li-ion Battery Under Various Thermal and Load Conditions	42
4. A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries.....	43
5. Review of Low-Temperature Performance, Modeling and Heating for Lithium-Ion Batteries.....	44
IV. METODOLOGIA.....	47
4.1 Tipo de Investigación	47
4.2 Materiales y Equipos Utilizados.....	48
4.2.1 Equipos de Medición y Control (Hardware)	48
4.3 Diseño Experimental.....	50
4.3.2 Variable Independiente:	50
4.3.3 Variables Dependientes:.....	50
4.3.6 Repetibilidad.....	51
4.4 Procedimiento Experimental	52
4.5 Obtención y Procesamiento de Datos	53
4.4.2 Procesamiento y Herramientas de Análisis.....	53

4.4.3 Criterios de Evaluación y Estabilidad	54
V. RESULTADOS	54
1.1 Condiciones de prueba.....	54
1.2 Instrumentos utilizados	55
1.3 Comportamiento térmico registrado	55
1.4 Fundamentación técnica	56
En baterías Li-ion, el comportamiento térmico está dominado por:	56
5.4 Variación de parámetros eléctricos.....	56
5.5 Cálculos del ANOVA.....	57
1.4.1 Grados de libertad	57
1.4.2 Datos Experimentales.....	58
1.4.3 Datos Finales	58
1.5 Comportamiento en diferentes rangos térmicos	61
1.6 Observaciones experimentales.....	64
VI. ANALISIS Y DISCUSION	67
6.1 Comparación con la teoría	67
6.2 Comparación con artículos científicos.....	67
6.3 Explicación de variaciones observadas.....	68
6.4 implicaciones industriales	69
6.5 Limitaciones del estudio.....	69
VII. CONCLUSION.....	70
VIII. BIBLIOGRAFIA	72
XII. ANEXOS.....	75
12.1 Programación	75
12.2 Código Arduino	80
12.3 Fotografías de pruebas.....	84

INDICE FIGURAS

<i>Figura 1. Componentes conformados por una batería de litio.</i>	12
<i>Figura 2. Representación esquemática de materiales electroactivos para ánodos en baterías de ion litio</i>	14
<i>Figura 3. Las imágenes de una gráfica de la pérdida de capacidad de las baterías.</i>	18
<i>Figura 4. Imagen de una a) muestra el estado inicial del electrodo negativo. Después del ciclo a 85 °C (b), la superficie del electrodo negativo queda cubierta por sustancias recién formadas, lo que da lugar a la aparición de pequeñas partículas esféricas distintas.</i>	2
<i>Figura 5. Transferencia electro líquida.</i>	23
<i>Figura 6. Durante una descarga de 150 amperios sin enfriamiento activo, la temperatura alcanza aproximadamente 60 °C.</i>	28
<i>Figura 7. Con una descarga de 150 amperios y enfriamiento activo, la temperatura llega a alrededor de 50 °C.</i>	28
<i>Figura 8. En una descarga de 50 amperios con enfriamiento activo, la temperatura alcanza aproximadamente 33 °C.</i>	28
<i>Figura 9. Lista de causas de fracaso y consecuencias.</i>	33
<i>Figura 10. Celdas dedos baterías con carga regular e irregular</i>	34
<i>Figura 11. Comparación entre el equilibrado activo y pasivo</i>	35
<i>Figura 12. Esquemas de equilibrado pasivo: (a) resistencia fija, (b) resistencia conmutada y (c) diodo Zener</i>	36
<i>Figura 13. Las curvas de descarga de las baterías bajo diferentes condiciones de temperatura</i>	41
<i>Figura 14. El aumento de temperatura de la batería durante la prueba.</i>	42
<i>Figura 15. Classification of low-temperature heating for LIBs.</i>	47
<i>Figura 16. Grafica de las pruebas de temperatura de las baterías de litio.</i>	59
<i>Figura 17. Imagen de una gráfica de tiempo-temperatura del sensor de temperatura 1.</i>	62
<i>Figura 18. Imagen de una gráfica de tiempo-temperatura del sensor de temperatura</i>	63
<i>Figura 19. Imagen de una gráfica de tiempo-temperatura del sensor de temperatura 2.</i>	63
<i>Figura 20. Imagen de una gráfica de tiempo-temperatura del sensor de temperatura 3.</i>	64
<i>Figura 21. Grafica de carga de 2 AMP a 30°</i>	65
<i>Figura 22. Grafica de carga de 2 AMP a 40°</i>	66
<i>Figura 23. Grafica de prueba de 2 AMP a 40° de carga y descarga.</i>	66

INDICE TABLAS

<i>Tabla 1. Función estratégica de modelización</i>	22
<i>Tabla 2. Niveles de capacidad típicos y los efectos por temperatura</i>	24
<i>Tabla 3. Tabla del rango térmico de las baterías de litio.</i>	26
<i>Tabla 4. Niveles de efectos.</i>	29
<i>Tabla 5. Ejemplos de gases típicos de interés en pruebas de fuga térmica directa.</i>	33
<i>Tabla 6. Charging and discharging steps of NCR18650PF LIBs</i>	40
<i>Tabla 7. Summary of FreedomCAR energy storage goals.</i>	44
<i>Tabla 8. Características de los instrumentos utilizados en el estudio.</i>	49
<i>Tabla 9. Fases de resistencia que pasa la batería de litio.</i>	52
<i>Tabla 10. Rangos de medición termino.</i>	55
<i>Tabla 11. Estado y observación de temperatura.</i>	55
<i>Tabla 12. Tabla Taguchi L8.</i>	59

I. RESUMEN

“Evaluación del desempeño operativo de baterías de ion-litio en función de la variabilidad de temperatura”

Las baterías de iones de litio se han instaurado como una de las tecnologías más relevantes en el almacenamiento de energía, gracias a su notable densidad energética y su eficiencia en el funcionamiento. No obstante, su rendimiento y seguridad son afectados de manera directa por las alteraciones de temperatura que se producen durante su uso. La exposición a temperaturas inadecuadas puede dar lugar a la reducción de su capacidad, acortar su vida útil y aumentar los riesgos de sobrecalentamiento.

Este estudio tuvo como propósito analizar el rendimiento operativo de las baterías de iones de litio en relación con las fluctuaciones de temperatura a través de un experimento controlado.

Se desarrolló un sistema de pruebas que permitió someter las baterías a diversos rangos de temperatura, vigilando variables como voltaje, estabilidad térmica y comportamiento eléctrico bajo circunstancias controladas. Se utilizaron sensores de temperatura, sistemas para la adquisición de datos y controladores para asegurar la exactitud de las mediciones. Los hallazgos obtenidos muestran una conexión directa entre el aumento de la temperatura y las variaciones en el rendimiento operativo, detectándose caídas en la estabilidad eléctrica al superar ciertos umbrales de temperatura.

De igual forma, se determinaron los rangos óptimos de funcionamiento que posibilitan el mantenimiento de condiciones seguras y efectivas. Se llega a la conclusión de que las variaciones de temperatura impactan de manera significativa en el rendimiento de las baterías de iones de litio, por lo tanto, el control térmico se presenta como un elemento crucial para su uso en sistemas electrónicos, industriales y de almacenamiento de energía.

II. INTRODUCCION

La temperatura es conocida como uno de los factores más influyentes en el desempeño operativo de las baterías de ion-litio (Li-ion). A medida que un sistema Li-ion se carga o descarga bajo ciertas condiciones ambientales, la actividad electroquímica de las reacciones y procesos de transporte que tienen lugar en sus electrodos se ven afectadas.

A pesar de que la mayoría de los ensayos de evaluación de su desempeño se realizan a temperatura ambiente, en la práctica estas baterías son utilizadas en una amplia gama de temperaturas. Por esta razón, el nivel de riesgo de que su desempeño se vea afectado por variaciones de la temperatura sigue causando preocupación. En consecuencia, la respuesta operativa de sistemas Li-ion sometidos a variaciones térmicas todavía no se ha abordado de manera exhaustiva.

Dichas preocupaciones podrían ser atendidas mediante la implementación de estrategias de gestión térmica. Este tipo de ajuste se basa principalmente en la recomendación de operaciones restringidas de las baterías en condiciones donde el riesgo de un desempeño deficiente es mayor. Los resultados de diferentes estudios sobre la operación de celdas Li-ion pueden, en algunos casos, ser directamente utilizados para modificar los límites de operación de grupos de celdas Li-ion conectadas en serie o paralelo. Sin embargo, la relación de la temperatura con todos los factores que afectan el desempeño no se ha abordado de manera exhaustiva, lo que limita la propuesta de ajustes de gestión térmica.

Antecedentes

Las baterías de iones de litio se han posicionado como una de las soluciones más prevalentes para el almacenamiento de energía en sectores electrónicos, automovilísticos e industriales, gracias a su notable densidad de energía, mínimo efecto de memoria y alta eficacia en los procesos de carga y descarga. Sin embargo, su rendimiento y durabilidad están significativamente determinados por las condiciones térmicas bajo las cuales operan. Numerosas investigaciones han evidenciado que la temperatura incide directamente en aspectos como la resistencia interna, la capacidad útil, la estabilidad electroquímica y la seguridad de la celda.

En condiciones de alta temperatura, se intensifican los procesos de degradación química, la generación de dendritas y el riesgo de reacciones exotérmicas no controladas. Por el contrario, temperaturas bajas limitan la movilidad iónica, resultando en una reducción de la capacidad disponible.

En el entorno industrial, la gestión térmica se erige como un elemento esencial en los sistemas de almacenamiento de energía, especialmente en vehículos eléctricos y sistemas de respaldo energético, donde son imprescindibles la seguridad y la fiabilidad.

Sin embargo, persiste la necesidad de realizar evaluaciones experimentales del comportamiento térmico en condiciones operativas reales para entender de manera más profunda los mecanismos de degradación y rendimiento.

Planteamiento del problema

Las baterías de iones de litio funcionan en un amplio espectro de condiciones térmicas que pueden impactar de manera considerable su desempeño eléctrico, eficacia y seguridad. La exposición a temperaturas elevadas durante las fases de carga y descarga puede resultar en un incremento de la resistencia interna, disminución de la capacidad y, en situaciones más severas, en fallos mecánicos o térmicos.

A pesar del uso generalizado de estas baterías, frecuentemente carecemos de evaluaciones experimentales minuciosas que permitan establecer una relación entre el comportamiento térmico y el rendimiento operativo en entornos controlados.

Por consiguiente, es imperativo realizar un análisis experimental para entender cómo la fluctuación de temperatura afecta el funcionamiento de las baterías de iones de litio, identificando posibles mecanismos de deterioro y determinando rangos térmicos seguros para su operación.

Justificación

El análisis del comportamiento térmico en baterías de litio resulta crucial para optimizar su rendimiento, extender su durabilidad y mitigar los riesgos inherentes a fallos térmicos. Desde una perspectiva técnica, esta investigación facilita:

- Entender la conexión entre temperatura y rendimiento eléctrico.
- Detectar eventuales puntos críticos de deterioro.
- Analizar la estabilidad a lo largo de los ciclos de carga y descarga.

En el ámbito industrial, los hallazgos pueden ser decisivos para el desarrollo de sistemas de gestión térmica más eficaces en aplicaciones tales como:

- Automóviles eléctricos.
- Sistemas de almacenamiento de energía.
- Equipos electrónicos de alta exigencia.

Asimismo, este análisis refuerza la educación en el campo de la mecatrónica aplicada a sistemas electroquímicos, combinando el estudio térmico, eléctrico y experimental.

Objetivo general

Valorar el rendimiento funcional de las baterías de iones de litio considerando la fluctuación de temperatura a lo largo de las fases de carga y descarga, a través de la investigación experimental y el análisis estadístico de la información adquirida.

Objetivos específicos

- Examinar el comportamiento térmico de las celdas energéticas a lo largo de los ciclos de carga.
- Analizar cómo varía la temperatura durante las fases de descarga.
- Establecer el impacto de la temperatura en la capacidad y en la estabilidad eléctrica.
- Detectar mecanismos de degradación potenciales que se relacionan con aumentos en la temperatura.
- Definir límites térmicos de operación seguros fundamentados en los hallazgos obtenidos en experimentos.
- Utilizar métodos estadísticos para realizar un análisis comparativo de los datos obtenidos experimentalmente.

Planteamiento de hipótesis

La fluctuación térmica en los procedimientos de carga y descarga impacta de manera considerable en el rendimiento funcional y la estabilidad de las baterías de litio.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

A. Fundamentos electroquímicos de las baterías de ion-litio

1. Baterías de litio

Las baterías de polímero de litio, conocidas como baterías LiPo, son un tipo de batería que se caracteriza por utilizar un electrolito en forma de polímero, como celulares y laptops. También se emplean en sistemas de almacenamiento energético, autos eléctricos y, por supuesto, en el ámbito de la electrónica y la robótica.

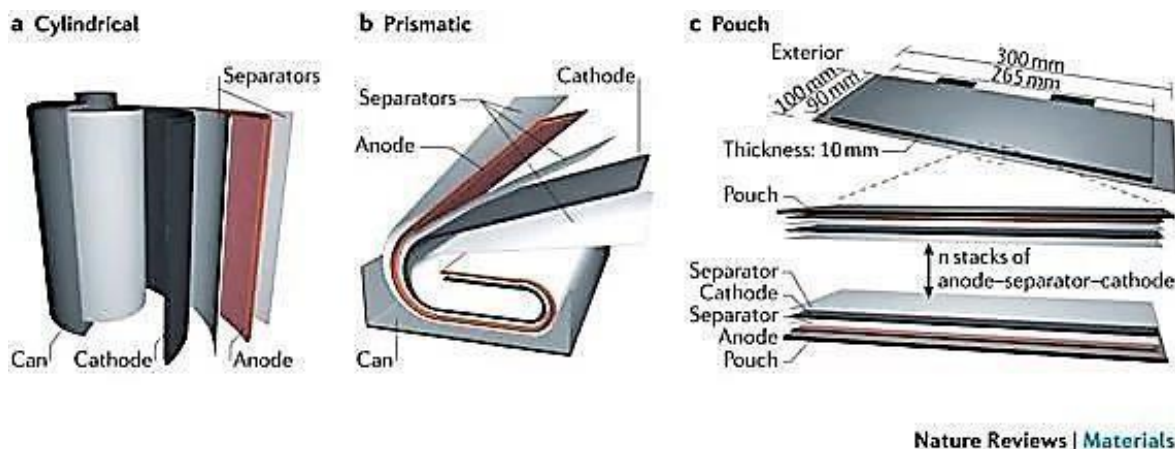
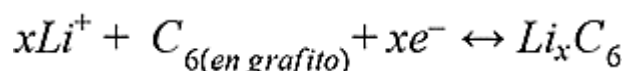


Figura 1. Componentes conformados por una batería de litio.

En este artículo, podrás descubrir toda la información necesaria para entender mejor las baterías recargables de litio, cómo optimizar su uso, la manera adecuada de cargarlas y los cuidados que requieren.

2. ¿Cómo se fabrica una batería de litio?

La batería de polímero de litio está constituida por múltiples capas delgadas de un polímero que contiene el electrolito. Estas capas se intercalan con separadores, que consisten en finas láminas de material aislante que evitan el contacto directo entre los electrodos. Uno de estas fotocélulas sirve como electrodo negativo, mientras que el otro actúa como electrodo positivo.



Desde el electrodo negativo hacia el positivo a través del circuito externo. Este proceso provoca el desplazamiento de iones de litio desde el electrodo positivo hacia el negativo a través del electrolito.

Durante la etapa de descarga de la batería, los electrones se desplazan en sentido contrario, es decir, desde el electrodo positivo hacia el negativo a través del circuito externo. Como consecuencia, los iones de litio también se mueven en dirección opuesta: desde el electrodo negativo hacia el electrodo positivo a través del electrolito.

3. Materiales anódicos

Los ánodos utilizados en las baterías de ion-litio pueden fabricarse con materiales que se clasifican en tres grupos principales, cada uno con un mecanismo distinto de almacenamiento de litio: los basados en procesos de intercalación, los basados en reacciones de conversión y los basados en reacciones de aleación.

4. Materiales basados en intercalación

En estos compuestos los iones de litio se intercalan electroquímicamente de manera reversible entre las láminas de su estructura tridimensional. El grafito es el material más representativo de esta familia de compuestos, tanto en su forma sintética como natural, y se utiliza ampliamente en baterías de ion-litio para dispositivos móviles.

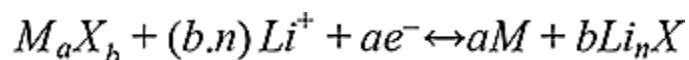
En el caso del grafito, el proceso reversible de intercalación de litio ocurre a potenciales inferiores a 0,25 V vs Li/Li⁺, con capacidades prácticas que se encuentran entre 360 y 372 mAh g⁻¹, y eficiencias de carga/descargas cercanas al 100 %.

(Augusto Rodríguez, 2025) (Peichao Liana, 2010)

5. Materiales basados en reacciones de conversión

La segunda familia de materiales anódicos está formada por aquellas sustancias que experimentan reacciones farádicas de conversión. En estas reacciones, M representa un metal de transición —como Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Mo, W o Ru—, X corresponde a un anión (O, N, F, S o P) y n indica la carga negativa del anión utilizado.

Las capacidades teóricas de descarga de estos materiales varían considerablemente. Algunos presentan capacidades relativamente bajas, similares a la del grafito (aproximadamente 370 mAh g⁻¹), como es el caso del Cu₂S.



En contraste, otros materiales como MnP₄ y Fe₂O₃ pueden alcanzar capacidades mucho mayores, alrededor de 1800 mAh g⁻¹ y 1009 mAh g⁻¹, respectivamente.

No obstante, antes de que estos compuestos puedan emplearse en baterías comerciales de ion-litio, es necesario resolver diversas limitaciones. En primer lugar, estas reacciones presentan reversibilidad limitada, lo que reduce significativamente la vida útil de los ánodos tras varios ciclos de carga y descarga.

Además, durante el proceso se producen cambios de volumen considerables, los cuales deterioran gradualmente la integridad estructural de la batería. Por último, estas reacciones ocurren a potenciales ligeramente superiores a los requeridos para la inserción y extracción de litio en el grafito, lo que se traduce en potenciales de celda más bajos.

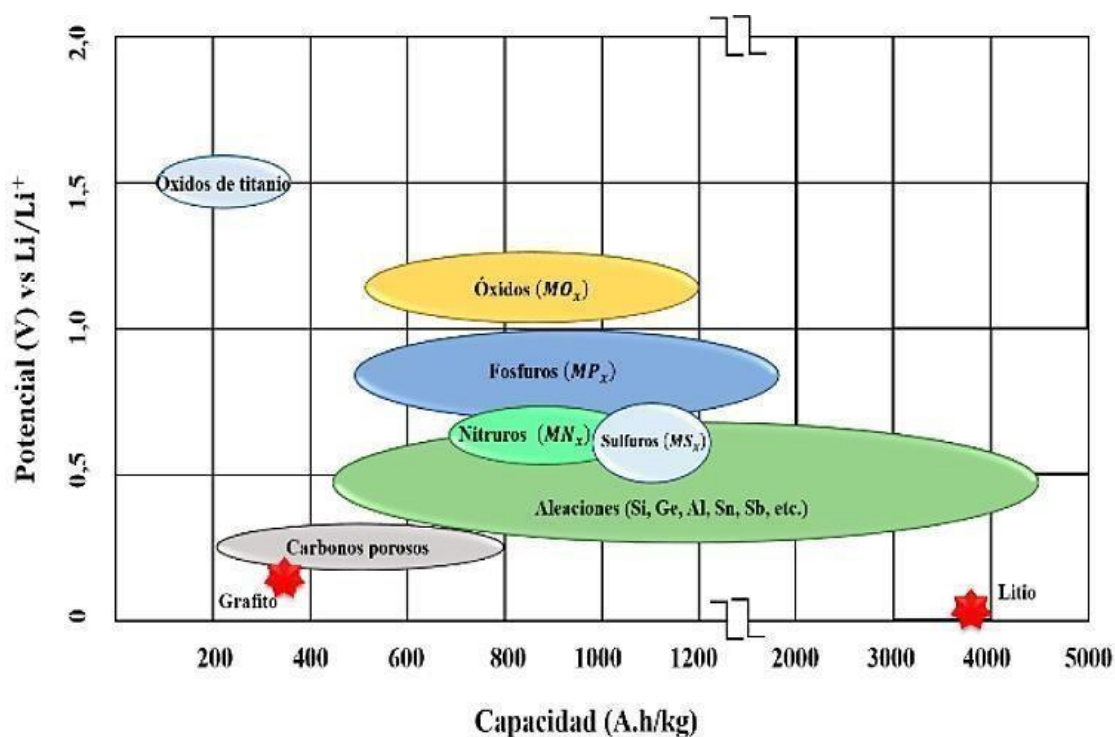


Figura 2. Representación esquemática de materiales electroactivos para ánodos en baterías de ion litio (Jingjing Zhang, 2013)

6. Materiales basados en reacción de aleación

La tercera familia de materiales anódicos está compuesta por sustancias y compuestos capaces de formar aleaciones con el litio (Li), entre los que destacan el silicio (Si), germanio (Ge), estaño (Sn) y las aleaciones desarrolladas a partir de estos tres elementos.

Los ánodos fabricados con estos materiales presentan capacidades teóricas muy elevadas. En particular, las aleaciones basadas en silicio pueden alcanzar valores hasta diez veces mayores que la capacidad teórica del grafito.

Un ejemplo es el compuesto $\text{Li}_{21}\text{Si}_5$, sintetizado por Iwamura y colaboradores mediante una reacción en estado sólido, cuya capacidad práctica de extracción de litio se situó alrededor de 1000 mAh g^{-1} .

(gonzalez, 2025) (Augusto Rodríguez, 2025)

7. Cloruro de Tionilo (SOCl_2)

El cloruro de tionilo (SOCl_2) es un compuesto inorgánico que se utiliza de manera extendida en la industria química como un agente clorante y un reactivo deshidratante. A temperaturas y presiones normales, este se presenta como un líquido que puede ser incoloro o tener un ligero tinte amarillento, con un olor fuerte e irritante, además de ser altamente volátil y reaccionar de manera intensa con la humedad.

Desde un enfoque químico, el azufre en el SOCl_2 se encuentra en un estado de oxidación de +4 (S IV), lo cual influye en su comportamiento reactivo típico. Debido a su naturaleza extremadamente reactiva, este compuesto no se encuentra de manera natural en el medio ambiente, ya que interactúa de forma rápida con el agua.

8. Propiedades físicas

Las propiedades físicas más significativas del cloruro de tionilo son:

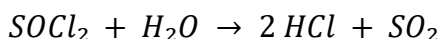
- Fórmula molecular: SOCl_2
- Masa molar: 118. 97 g/mol
- Número CAS: 7719-09-7
- Estado físico: líquido incoloro a amarillento
- Densidad: 1. 64 g/cm³
- Punto de ebullición: 74. 6 °C
- Presión de vapor (25 °C): 16 kPa
- Densidad del vapor (aire = 1): 4. 1
- Solubilidad en agua: reacciona de forma violenta
- Viscosidad: aproximadamente 0. 6 cP (a temperatura ambiente)

El vapor de este compuesto es considerablemente más denso que el aire, lo que sugiere que puede acumularse en áreas bajas en caso de una fuga.

En términos de seguridad laboral, la ACGIH recomienda un límite de exposición de 1 ppm como una exposición a corto plazo (STEL).

9. Propiedades químicas y reactividad

El cloruro de tionilo es extremadamente reactivo al contacto con agua. Su reacción de hidrólisis genera cloruro de hidrógeno (HCl) y dióxido de azufre (SO_2), ambos considerados gases tóxicos:



Esta reacción es exotérmica, lo que justifica la necesidad de manejar el compuesto en condiciones secas y bajo sistemas de control adecuados. Es crucial no confundir el SOCl_2 con el dicloruro de sulfurilo (SO_2Cl_2), dado que:

- En SOCl_2 , el azufre se encuentra en un estado de oxidación de +4 (S IV).
- En SO_2Cl_2 , el azufre se encuentra en un estado de +6 (S VI).
- Las diferencias en sus propiedades químicas y estabilidad térmica son notables.

10. Estructura molecular

La estructura del SOCl_2 tiene una geometría piramidal trigonal, consecuencia de la existencia de un par de electrones no enlazantes en el átomo central de azufre. Esta disposición tridimensional resulta en un momento dipolar notable, lo que contribuye a su reactividad. A diferencia de compuestos como el COCl_2 (fosgeno), que presenta una geometría trigonal plana, el SOCl_2 exhibe una distribución electrónica asimétrica que favorece su función como agente clorante.

Relevancia en baterías (si se aplica en un contexto electroquímico)

En las baterías de litio-cloruro de tionilo (Li-SOCl_2), el SOCl_2 actúa como:

- Electrolito
- Agente oxidante
- Medio reactivo

En este sistema, el litio metálico se oxida mientras que el SOCl_2 se reduce, generando cloruro de litio (LiCl), dióxido de azufre y otros compuestos intermedios. Estas baterías se caracterizan por:

- Alta densidad energética
- Bajo autodescarga
- Amplio rango de temperaturas operativas

No obstante, su alta reactividad también conlleva riesgos en situaciones de sobrecalentamiento o daño mecánico.

(Anonimo, ECURED, 2026)

B. Influencia de la temperatura en el desempeño electroquímico

1. Efectos de la temperatura en las baterías de litio

La temperatura de la batería de litio se eleva considerablemente, superando los **45 °C**. En la actualidad, las baterías de iones de litio se utilizan cada vez más tanto en procesos de fabricación como en la vida diaria, por lo que la temperatura del entorno se convierte en un factor de gran importancia. Bajo estas condiciones, este tipo de baterías puede presentar una mayor tendencia a generar riesgos de seguridad.

Por esta razón, en ambientes de alta temperatura resulta necesario analizar el desempeño de las baterías de litio en estas condiciones extremas y compararlo con su comportamiento cuando operan a temperaturas normales.

El uso indebido o el abuso de las baterías de iones de litio, ya sea por exposición a altas temperaturas o por fallos en la regulación del cargador, pueden desencadenar reacciones químicas peligrosas en el interior de la batería, generando una cantidad considerable de calor. Si esta energía térmica no se disipa adecuadamente y se acumula rápidamente en el interior de la batería, pueden surgir fugas, liberación de gases, emisión de humo y otros efectos, además de graves quemaduras y potenciales explosiones.

Las reacciones químicas que ocurren en las baterías a altas temperaturas incluyen principalmente:

1. Descomposición de la película SEI: la película protectora es metaestable y comienza a descomponerse, liberando calor, en un rango aproximado de 90 a 120 °C.
2. Reacción entre el litio intercalado y el electrolito: por encima de 120 °C, el separador ya no puede impedir el contacto entre el electrodo negativo y el electrolito. Como resultado, el litio intercalado en el electrodo negativo reacciona con el electrolito, generando una reacción exotérmica.
3. Descomposición del electrolito: ocurre a temperaturas superiores a 200 °C, liberando calor.
4. Descomposición del material activo del electrodo positivo: en estado de oxidación, el material del electrodo positivo se descompone de forma exotérmica y libera oxígeno, lo que puede provocar una reacción exotérmica con el electrolito, o bien reaccionar directamente con él.

Reacción exotérmica entre el litio intercalado y el aglutinante de fluoruro: Se analizó el efecto de las altas temperaturas en el rendimiento de una batería cilíndrica de 2 Ah (con material de electrodo positivo NCM y aglutinante PVdF, y material de electrodo negativo de carbono con aglutinante CMC/SBR). Asimismo, se compararon las condiciones de dos baterías sometidas a diferentes niveles de temperatura elevada:

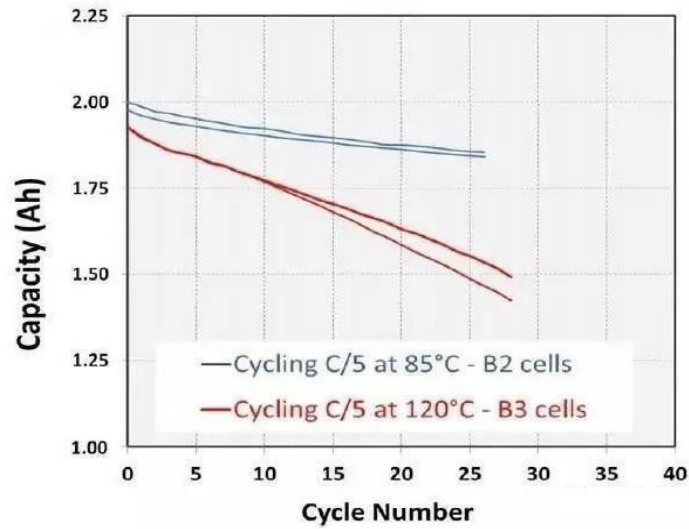


Figura 3. Las imágenes de una gráfica de la pérdida de capacidad de las baterías.

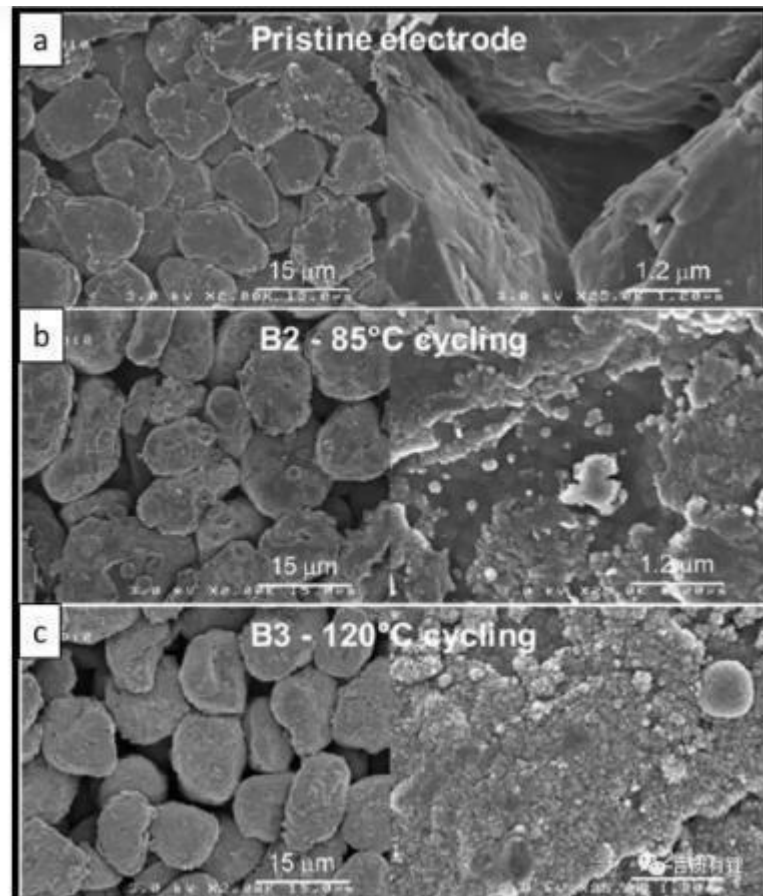


Figura 4. Imagen de una a) muestra el estado inicial del electrodo negativo. Después del ciclo a 85 °C (b), la superficie del electrodo negativo queda cubierta por sustancias recién formadas, lo que da lugar a la aparición de pequeñas partículas esféricas distintas. El efecto de las altas temperaturas en la duración de la batería

2. El funcionamiento de la batería a temperaturas elevadas afecta negativamente su vida útil.

Por un lado, cuando el electrolito se reduce en el ánodo a bajo potencial durante periodos prolongados, se produce una pérdida de iones de litio en estado activo, lo que disminuye el rendimiento electroquímico. Por otro lado, las altas temperaturas favorecen el aumento de reacciones secundarias del electrolito en el ánodo. Como consecuencia, los productos inorgánicos generados en estas reacciones se depositan sobre la superficie del ánodo, dificultando la intercalación de los iones de litio y acelerando el envejecimiento de la batería.

Además, bajo condiciones de alta temperatura, las reacciones secundarias dentro de la batería se intensifican, incluyendo la descomposición, ruptura o disolución de la película **SEI** presente en la superficie del electrodo negativo. Esto provoca un consumo continuo de iones de litio durante los ciclos de operación a altas temperaturas y, en consecuencia, una disminución rápida de la capacidad de la batería.

Las investigaciones han demostrado que, cuando la temperatura de operación de la batería supera los 40 °C, su vida útil se reduce aproximadamente a la mitad por cada incremento adicional de 10 °C. Un uso indebido o abusivo de la batería de iones de litio, ya sea mediante su utilización a elevadas temperaturas o fallas en el control del cargador, puede originar reacciones químicas violentas en el interior de la batería, generando una cantidad significativa de calor. Si este calor no se disipa a tiempo y se acumula rápidamente dentro de la batería, se pueden producir fugas, ventilación, humo y otros fenómenos, así como quemaduras severas y explosiones.

(Anonimo, EverExceed, 2024)

3. Cinética de las Reacciones Exotérmicas en Celdas de Litio

A partir de la fusión de los principios teóricos expuestos en el artículo de Sánchez Granados y los hallazgos experimentales recopilados en tu investigación, la evaluación de la Cinética de Reacciones Exotérmicas se puede organizar de la siguiente manera:

4. Dinámica de la Activación Térmica

La cinética en las baterías de litio no sigue un patrón lineal; esta se ve influenciada por una conexión donde la temperatura actúa como el principal impulsor de las reacciones internas. Según los principios electroquímicos, la transferencia de electrones se produce cuando hay una disminución de la energía libre del sistema. Bajo situaciones de estrés, esta transferencia se acelera considerablemente:

Aceleración Cinética (40°C - 60°C): Primeramente, el incremento de temperatura favorece la movilidad de los iones y disminuye la resistencia interna, lo que puede aumentar la capacidad hasta en un 105%.

Comienzo de la Degradación: Sin embargo, esta misma energía cinética promueve un envejecimiento acelerado y procesos indeseables que afectan negativamente el electrolito y la capa SEI (Interfase de Electrolito Sólido).

4. Etapas de la Reacción Exotérmica

Tu estudio señala una secuencia esencial de acciones químicas que se activan en función del rango de temperatura logrado:

Fase I: Descomposición del Electrolito y de la SEI (80°C – 130°C): Se inicia la oxidación de disolventes orgánicos debido a la presencia de sales como el perclorato de litio, generando calor interno inicial.

Fase II: Reacción en el Cátodo (150°C – 250°C): El colapso de la estructura del cátodo libera oxígeno, lo que provoca una combustión interna violenta que resulta difícil de controlar.

Análisis de las Velocidades de Autocalentamiento: La "cinética" se evalúa aquí por la rapidez con la que la batería incrementa su propia temperatura sin intervención externa (autocalentamiento):

- **Umbral de Estabilidad Crítica (148°C):** Hasta este nivel, la tasa de autocalentamiento se mantiene alrededor de 5°C/min.
- **Punto de No Retorno (172°C):** Al sobrepasar este nivel, la cinética de la reacción se duplica, alcanzando los 11°C/min. En este estado, la generación de calor excede notablemente la capacidad de disipación de la celda, resultando en un desbordamiento térmico irreversible.

Implicaciones del Proceso Cinético Intenso: La velocidad de estas reacciones exotérmicas no solo compromete la integridad eléctrica, sino que también transforma la energía química almacenada en riesgos físicos inmediatos:

Producción de Gases: Se emiten sustancias altamente tóxicas y corrosivas como el fluoruro de hidrógeno (HF) y monóxido de carbono (CO).

Fallas Mecánicas: La acumulación de presión interna y el incremento de la energía cinética pueden dar lugar a explosiones mecánicas y a la proyección de materiales a altas velocidades.

Colapso Eléctrico: La formación de dendritas bajo condiciones de estrés térmico prolongado y el colapso del separador ocasionan cortocircuitos internos y arcos eléctricos.

(Granados, 2026)

C. Transferencia de calor en sistemas electroquímicos

1. Movilidad

Uno de los elementos que restringen el avance de los automóviles eléctricos es el significativo efecto que tiene la temperatura sobre el rendimiento de las baterías. Un rango de temperatura operativa inadecuado puede ocasionar el desgaste prematuro, Una disminución de la capacidad e incluso implicar consecuencias severas si se produce una fuga térmica. Con el fin de prevenir el deterioro acelerado de las baterías, la finalidad del Sistema de Gestión Térmica de Baterías (BTMS) es asegurar que las celdas trabajen dentro de las condiciones de temperatura óptimas, las baterías de iones de litio (LIB) suelen operar en un rango de temperatura que generalmente se encuentra entre 15 y 35 °C.

Sin embargo, las condiciones normales de conducción exponen a las baterías a un entorno energético altamente variable, lo que dificulta el control adecuado de la temperatura.

En este contexto, resulta fundamental implementar estrategias de modelización térmica. Las baterías de iones de litio experimentan procesos electroquímicos complejos que generan calor, lo cual provoca cambios en la temperatura interna a lo largo del tiempo y permite realizar ajustes en el sistema de gestión térmica de baterías (BTMS).

No obstante, el campo eléctrico y los campos térmicos se encuentran interrelacionados mediante distintos fenómenos que influyen entre sí. Por esta razón, la distribución de temperatura generada debe retroalimentar de forma continua el modelo eléctrico dentro de un sistema de ciclo cerrado. Ignorar estas interacciones puede conducir al diseño de un BTMS excesivamente sobredimensionado.

2. Modelo eléctrico

El modelo eléctrico se enfoca en analizar la distribución y el comportamiento del potencial eléctrico dentro de la batería. Esta representación resulta clave para comprender las reacciones electroquímicas que se desarrollan en su interior, las cuales influyen directamente en su rendimiento y en su temperatura. Factores como el flujo de corriente, la resistencia interna y las reacciones electroquímicas contribuyen a la generación de calor dentro de la batería.

Según la estrategia de modelado empleada, estos modelos pueden clasificarse en tres categorías: modelos electroquímicos basados en principios físicos (también conocidos como modelos de caja blanca), modelos de caja gris y modelos basados en datos, o de caja negra.

Modelo Electrónico	Caja Blanca	Caja Gris	Caja Negra
Teoría	Basado en ecuaciones derivadas de las leyes del primer principio.	Basado en conocimientos físicos del sistema, mientras que los parámetros del modelo se estiman a partir de datos experimentales.	Basado en teorías de estimación estadística y análisis de datos.
Características	Los parámetros se obtienen mediante experimentos y propiedades físicas del sistema. Requiere un alto costo computacional debido al nivel de detalle del modelo.	El costo computacional es menor en comparación con los modelos electroquímicos. Resulta más eficiente para aplicaciones de gestión térmica en tiempo real.	Permite una predicción precisa de la temperatura siempre que se disponga de suficientes datos para entrenar el modelo. Sin embargo, se pierde la interpretación física de los parámetros.
Ejemplos	Modelos electroquímicos en 1D, 2D y 3D.	Modelos de orden reducido (ROM), métodos basados en frecuencia y modelado mediante circuitos equivalentes agrupados (LECM).	Redes neuronales artificiales.

Tabla 1. Función estratégica de modelización.

3. Modelo Térmico

El modelo térmico se enfoca en analizar cómo se distribuye y se disipa el calor dentro de la batería. Para ello, es fundamental contar con suposiciones confiables sobre la forma en que el calor se transfiere a través de los diferentes componentes de la celda (mediante modelos concentrados, distribuidos o heterogéneos). Comprender este proceso es clave para controlar la temperatura de la batería, lo cual influye directamente en su rendimiento, seguridad y vida útil.

Entre las distintas técnicas para estimar la temperatura, los modelos más simples se basan en redes de resistencias y capacitancias térmicas, utilizando la analogía entre los sistemas eléctricos y los sistemas térmicos. Estos modelos, conocidos también como modelos de parámetros globales, permiten estimar únicamente temperaturas promedio, sin considerar que la temperatura dentro de la batería puede variar espacialmente.

Para superar esta limitación, se utilizan modelos térmicos tridimensionales basados en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), los cuales permiten analizar sistemas con geometrías más complejas y obtener una representación más detallada de la distribución de temperatura.

(Torrano, 2026)

4. Capacidad en temperaturas

La temperatura influye significativamente en la efectividad de una batería de litio. Las bajas temperaturas reducen el rendimiento de la batería (la capacidad se ve afectada a medida que los iones disminuyen su velocidad y se forma un recubrimiento), mientras que el calor puede aumentar ligeramente la capacidad al inicio, pero realmente fomenta un envejecimiento acelerado. De manera práctica, a aproximadamente 25 °C (temperatura ambiente), se puede alcanzar cerca del 100 % de la capacidad nominal, mientras que a -20 °C es probable que solo se obtenga alrededor del 50-60 %.

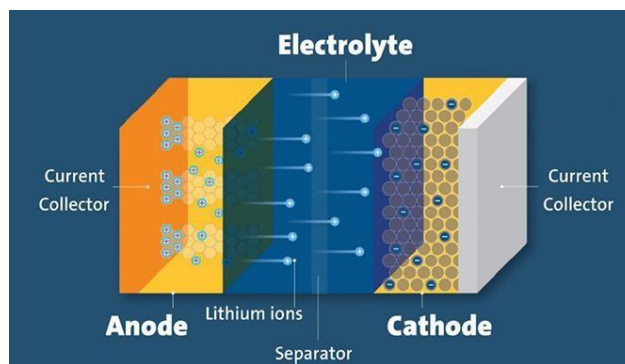


Figura 5. Transferencia electro líquida.

En cambio, a una temperatura de aproximadamente 45 °C, se puede experimentar una capacidad de alrededor del 105 % en el corto plazo. Es fundamental gestionar estos efectos con atención.

A continuación, se presenta un resumen de lo que sucede en diferentes intervalos de temperatura, seguido de explicaciones más detalladas y sugerencias.

- **Temperaturas frías (–20 °C a +10 °C):** La capacidad se reduce de manera abrupta y casi exponencial. Por ejemplo, una evaluación indica que una celda LFP presenta una capacidad de aproximadamente el 55 % y una celda NMC alrededor del 48 % a –20 °C. Las temperaturas bajas incrementan la viscosidad del electrolito (puede ser hasta cuatro veces mayor a –10 °C) y aumentan la resistencia a los picos, lo que provoca que el movimiento de los iones de litio sea considerablemente lento.
- **Temperaturas ambientes/moderadas (~23 °C a 27 °C):** Este rango de temperaturas representa el punto óptimo. La capacidad se aproxima al 100 % de la nominal y se mantiene en un estado muy estable. Las variaciones son mínimas y la duración de la batería es ideal. Las baterías están diseñadas para operar de manera eficaz a condiciones de temperatura ambiental.
- **Temperaturas cálidas/calientes (40 °C a 60 °C):** A corto plazo, las temperaturas elevadas aceleran la cinética celular: los iones se desplazan con mayor facilidad y la resistencia disminuye, lo que puede resultar en capacidades de hasta el 105 % de la nominal entre 40 y 45 °C. Sin embargo, este "aumento" conlleva consecuencias: el calor prolongado (50 °C) ocasiona reacciones indeseadas, perjudicando tanto el SEI como el electrolito. Los datos indican que la vida útil se acorta considerablemente (por ejemplo, un 60 % menos a 55 °C) y la capacidad a largo plazo

<i>Temperatura (° C)</i>	<i>Capacidad aproximada (% de 25 °C)</i>	<i>Efectos clave</i>
–20 ° C	LFP ~55%; NMC ~48%	Extremadamente bajo: lentitud iónica severa, Rct alto, riesgo de formación de placas.
0 ° C	~85% (LFP), ~78% (NMC)	Aún reducido; más polarización y crecimiento del SEI.
25°C (<i>temperatura ambiente</i>)	~ 100%	Línea base: rendimiento ideal con estrés mínimo.
45 ° C	~97–105 %	Impulso a corto plazo (cinética rápida), pero también envejecimiento más rápido.
60 ° C (<i>uso a largo plazo</i>)	(A menudo <100%)	Estrés térmico: el electrolito se descompone y la capacidad disminuye

Tabla 2. Niveles de capacidad típicos y los efectos por temperatura.

(Bonnen B. , 2025)

D. Degradación térmica y fuga térmica

1. Mecanismos de Degradación Eléctrica: Dendritas y Arcos

Las dendritas constituyen formaciones ramificadas de litio metálico que se extienden desde el ánodo hacia el separador y, eventualmente, hacia el cátodo. El término "dendrita" tiene su origen en la palabra griega dendron, que significa árbol, debido a su aspecto ramificado.

Proceso de formación En las baterías de Li-ion convencionales: Durante el proceso de carga, los iones de litio (Li^+) se desplazan hacia el ánodo. Lo ideal es que el litio se intercale de manera uniforme en el grafito. No obstante, en determinadas condiciones, el litio se deposita en forma de metal sólido en vez de intercalarse.

- Esto sucede principalmente cuando:
- Se realiza una carga rápida (alta tasa C).
- Las temperaturas son bajas.
- Se alcanza un elevado sobrepotencial.
- Se presenta degradación en la capa de la SEI.

Cuando el depósito no se distribuye uniformemente, se generan núcleos metálicos que aumentan progresivamente.

2. Fases del crecimiento dendrítico

- Nucleación inicial.
- Desarrollo de pequeños depósitos metálicos.
- Crecimiento filamentosos.
- Las estructuras se extienden a través del electrolito.
- Penetración del separador.
- Si logran atravesar el separador, pueden entrar en contacto con el cátodo.
- Cortocircuito interno.

Se forma un camino directo de baja resistencia.

3. Efectos

- Incremento de la resistencia interna.
- Disminución de la capacidad.
- Aumento de la autodescarga.
- Generación de áreas calientes localizadas.
- Riesgo potencial de fuga térmica.

(Xuning Feng a b M. O., 2018) (C. Brissot a, 1999)

4. Sobrecalentamiento

Cargar baterías de litio a temperaturas elevadas provoca reacciones químicas aceleradas que ponen en riesgo tanto la seguridad como la efectividad. Este escenario incrementa la probabilidad de hinchazón, liberación de gases e incluso incendios, como se ilustra a continuación. Mantener un control de temperatura es vital para cada paquete de baterías de iones de litio.

Descripción estática	Rango de valores
Rango de temperatura de descontrol térmico	60 °C a 100 °C
Incendios anuales de baterías de iones de litio (EE.UU.)	Aproximadamente 2,000 casos
Tasa de incendio en baterías de iones de litio en vehículos eléctricos	Aproximadamente 0.03 % por vehículo al año

Tabla 3. Tabla del rango térmico de las baterías de litio.

Los avanzados sistemas de **Cadex** permiten gestionar la carga de baterías de litio a altas temperaturas, reduciendo así la frecuencia de este tipo de incidentes. En empresas del Reino Unido, el sobrecalentamiento representa aproximadamente el 36 % de los problemas relacionados con baterías de iones de litio.

- La carga de baterías de litio a temperaturas altas acelera reacciones químicas indeseables que pueden provocar hinchamiento, acumulación de gases e incluso incendios; por ello, es esencial mantener la temperatura de carga dentro de límites seguros.
- Cargar la batería a temperaturas elevadas disminuye su vida útil, ya que afecta sus componentes internos y aumenta la pérdida de capacidad, por lo que controlar adecuadamente la temperatura resulta clave para prolongar su duración.
- Se recomienda utilizar sistemas de gestión de batería (BMS) y respetar los rangos de temperatura sugeridos (10 °C a 30 °C) para garantizar una carga segura, mejorar el rendimiento y evitar fallas potencialmente peligrosas.

(PAN, 2026)

5. Rangos de temperatura seguros

Es fundamental controlar la temperatura al realizar la carga de una batería de iones de litio. De acuerdo con documentos técnicos de EpecTec, el intervalo seguro de carga se encuentra entre 0 °C y 45 °C (32 °F a 113 °F).

Cargar la batería por debajo de 0 °C puede provocar la formación de un recubrimiento de litio, lo que puede ocasionar daños irreversibles.

Asimismo, la carga rápida solo se considera segura cuando la temperatura es superior a 5 °C (41 °F). Por ello, se recomienda evitar este tipo de carga por debajo de dicho valor, a menos que el sistema esté diseñado y aprobado para operar en esas condiciones.

El rango más adecuado para la carga se sitúa entre 10 °C y 30 °C, ya que dentro de este intervalo se logra un equilibrio óptimo entre rendimiento, seguridad y vida útil de la batería. Realizar la carga fuera de estos límites puede aumentar el riesgo de deformaciones, liberación de gases y reducción de la capacidad de almacenamiento.

- Cargar la batería a temperaturas menores de 5 °C reduce la velocidad del proceso de carga y provoca un aumento en la resistencia interna.
- Cuando la carga se realiza a temperaturas superiores a 45 °C, existe el riesgo de que la batería se hinche o incluso llegue a explotar.
- El desempeño más adecuado se obtiene cuando la temperatura se mantiene dentro del rango de 10 °C a 30 °C.

6. Estabilidad térmica

Al analizar el mercado de los SAI montados en bastidor, se observa una gran variedad de opciones para el control térmico. Estas van desde sistemas de refrigeración pasiva (sin ventiladores), hasta refrigeración activa (ventiladores funcionando de forma continua) y refrigeración activa dinámica, donde la velocidad de los ventiladores se ajusta según la temperatura interna de la batería.

La tercera variable que influye en la durabilidad de las baterías de iones de litio es la temperatura ambiente. Aunque estas baterías pueden operar de forma segura dentro de un rango de -20 a +60 °C, el intervalo óptimo para maximizar su vida útil se encuentra aproximadamente entre 10 y 30 °C. Las descargas de corriente elevadas pueden provocar un aumento de la temperatura interna de la celda; sin embargo, mantener un entorno térmico estable contribuye a prolongar la vida útil de la batería.

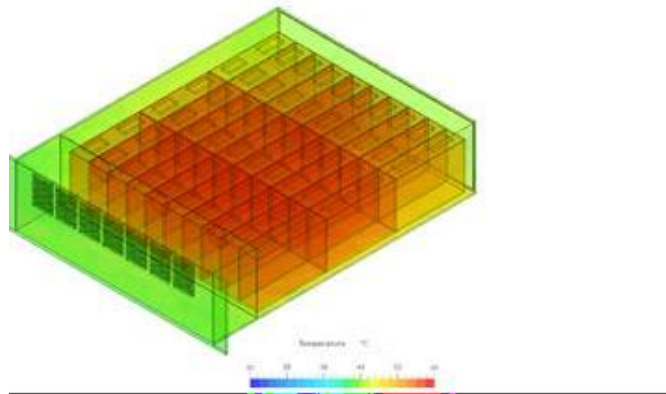


Figura 6. Durante una descarga de 150 amperios sin enfriamiento activo, la temperatura alcanza aproximadamente 60 °C.

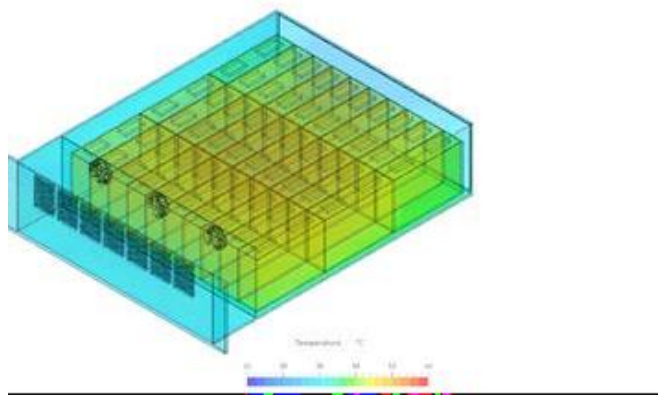


Figura 7. Con una descarga de 150 amperios y enfriamiento activo, la temperatura llega a alrededor de 50 °C.

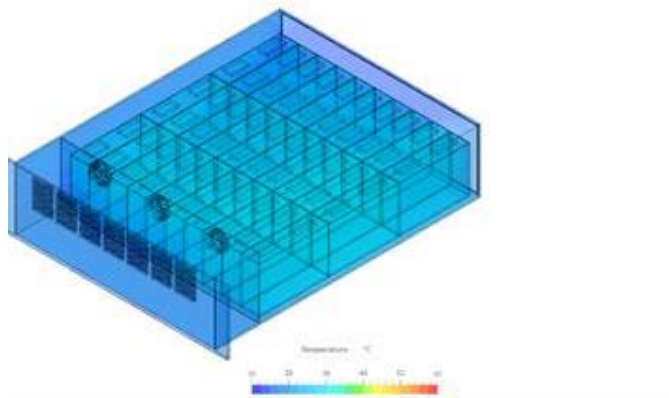


Figura 8. En una descarga de 50 amperios con enfriamiento activo, la temperatura alcanza aproximadamente 33 °C.

(Jeffrey VanZwol, 2021)

7. Normativa Internacional de Seguridad (UN 38.3 o IEC 62133)

Las baterías de iones de litio (LIB) representan la tecnología líder en aparatos que dependen de baterías. Las baterías de Li-Ion se han establecido como la alternativa preferida para una variedad de usos, abarcando desde la electrónica de consumo hasta los vehículos eléctricos (EV) y los sistemas de almacenamiento de energía renovable.

La utilización e investigación de las baterías Li-Ion han evidenciado un aumento considerable en los últimos años, y se prevé que esta tendencia continúe a un nivel elevado en un futuro cercano.

Los principales productores están realizando inversiones constantes en investigación y desarrollo con el fin de optimizar el rendimiento de las baterías, incrementar la densidad energética y potenciar la seguridad.

NIVEL DE RIESGO	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN / EFECTO
Sin efecto	No se presenta ningún efecto ni pérdida de funcionalidad.
1. Protección pasiva activada	No hay defecto, fuga, generación de gases, fuego, llama, ruptura ni explosión, ni reacción exotérmica o calentamiento rápido. La celda presenta daño recuperable y es necesaria la reparación del sistema de protección.
2. Defecto o daño	No hay fuga, generación de gases, fuego, llama, ruptura ni explosión, ni reacción exotérmica o calentamiento rápido. La celda presenta daño irreversible y requiere reparación.
3. Fuga > 50 %	No hay generación de gases, fuego, llama, ruptura ni explosión. Existe una pérdida de peso del electrolito mayor al 50 %. El electrolito está compuesto por solvente y sal.
4. Venteo > 50 %	No hay fuego, llama, ruptura ni explosión. Se presenta una pérdida de peso del electrolito igual o mayor al 50 %.
5. Fuego o llama	Se presenta fuego o llama, pero no hay ruptura ni explosión, ni desprendimiento de esquirlas.
6. Ruptura	No hay explosión, pero se desprenden esquirlas de la batería.
7. Explosión	Se produce la explosión y la desintegración de la batería o celda.

Tabla 4. Niveles de efectos.

(Anonimo, Neurtek, 2026)

8. Factores de riesgo

Las baterías de iones de litio han atravesado un significativo avance en años recientes, ya que proporcionan una serie de beneficios en comparación con las baterías de otras formulaciones químicas. En contraste con estas últimas, las celdas de litio-ión exhiben una capacidad energética superior, una densidad de potencia más elevada y una duración prolongada. Aunque se reconocen las aplicaciones y ventajas de las baterías de iones de litio, los problemas relacionados con esta tecnología son menos evidentes.

Una celda de iones de litio se fundamenta en un complejo conjunto de mecanismos interrelacionados, y modificar el comportamiento de estos mecanismos (desde perspectivas mecánicas, térmicas o eléctricas) puede alterar el frágil equilibrio del sistema electroquímico, dando lugar a una variedad de fallos imprevistos y potencialmente peligrosos, e incluso, en escenarios extremos, a una reacción térmica descontrolada.

9. Desbordamiento térmico e incendio

El desbordamiento térmico se refiere a un fenómeno en el que la generación de calor dentro de una batería supera su capacidad para disipar dicho calor, desencadenando una reacción en cadena. Este evento puede ser provocado por:

- Sobrecarga eléctrica
- Cortocircuito, ya sea interno o externo
- Daño mecánico resultante de perforaciones o impactos
- Exposición a altas temperaturas exteriores

A medida que la temperatura interna se incrementa y supera ciertos límites críticos, que típicamente varían entre 130 °C y 200 °C, según la química de la batería, comienzan a ocurrir reacciones exotérmicas sucesivas:

- Descomposición de la interfaz de electrolito sólido (SEI).
- Descomposición del electrolito orgánico.
- Reacción entre el material del cátodo y el electrolito.
- Liberación de oxígeno en algunos tipos de química (NMC, NCA).

Estas reacciones producen más calor del que se puede disipar, llevando a un aumento acelerado de temperatura. Si este proceso no es controlado, puede resultar en la ignición del electrolito y una combustión intensa. Es crucial entender que la temperatura crítica de 172 °C no es un estándar universal; esta varía según el tipo de celda, su estado de carga y su química interna.

10. Emisión de gases y compuestos tóxico

Durante el proceso de degradación térmica o combustión de las baterías de iones de litio, se generan diversos gases como resultado de la descomposición del electrolito y las reacciones químicas internas. Entre ellos se incluyen:

- Fluoruro de hidrógeno (HF), producido por la descomposición del LiPF_6 .
- Monóxido de carbono (CO).
- Dióxido de carbono (CO_2).
- Pequeñas cantidades de hidrocarburos volátiles.
- Óxidos de nitrógeno, dependiendo de los materiales presentes.

El HF es especialmente peligroso dado su potencial corrosivo y su toxicidad. En sistemas donde hay litio metálico expuesto, como en algunos fallos internos severos, el contacto con humedad puede resultar en la generación de hidrógeno (H_2), un gas altamente inflamable. Sin embargo, en las baterías de iones de litio convencionales, el litio está intercalado en estructuras cristalinas y no se encuentra en grandes cantidades libres, lo que significa que esta reacción generalmente ocurre solo en situaciones de daño extremo.

11. Explosión mecánica y liberación de energía cinética

Las baterías de iones de litio contienen una gran cantidad de energía en un espacio relativamente pequeño. Si hay una acumulación excesiva de gases internos producidos por reacciones térmicas, la presión resultante puede exceder la capacidad estructural de la carcasa. Esto provoca:

- Ruptura del encapsulado.
- Liberación repentina de presión interna.
- Proyección de fragmentos metálicos o componentes internos.

Este fenómeno, en ocasiones, no se clasifica como una “explosión química típica”, sino como una falla estructural debido a la sobrepresión, combinada con la combustión del electrolito. La proyección de fragmentos representa un riesgo mecánico adicional en contextos industriales.

12. Inestabilidad eléctrica y formación de dendritas

Las dendritas son estructuras metálicas con ramificaciones que pueden formarse durante procesos de carga inadecuados, particularmente cuando:

- Se supera el voltaje recomendado.
- Se opera en temperaturas bajas con corrientes elevadas.
- Se degrada la capa SEI.

Estas estructuras pueden extenderse desde el ánodo hacia el cátodo a través del separador. Si logran tocarse eléctricamente, pueden ocasionar un cortocircuito interno. Un cortocircuito interno podría resultar en:

- Incremento local de temperatura.
- Descarga instantánea de energía.
- Inicio de reacciones térmicas.
- Daño irreversible a la celda.

Asimismo, realizar operaciones más allá de los márgenes de voltaje seguros puede ocasionar sobrecargas, descomposición del electrolito y un deterioro acelerado de los materiales activos, lo que impacta tanto en la batería como en los dispositivos asociados.

13. Toxicidad y Cinética de los Gases de Combustión

Las baterías de iones de litio (LIB) representan la tecnología líder en aparatos que dependen de baterías. Las baterías de Li-Ion se han establecido como la alternativa preferida para una variedad de usos, abarcando desde la electrónica de consumo hasta los vehículos eléctricos (EV) y los sistemas de almacenamiento de energía renovable.

La utilización e investigación de las baterías Li-Ion han evidenciado un aumento considerable en los últimos años, y se prevé que esta tendencia continúe a un nivel elevado en un futuro cercano. Los principales productores están realizando inversiones constantes en investigación y desarrollo con el fin de optimizar el rendimiento de las baterías, incrementar la densidad energética y potenciar la seguridad.

Gas:	Concentraciones de gas hasta:
Agua (H ₂ O)	20 % vol.
Dióxido de carbono (CO ₂)	20 % vol.
Monóxido de carbono (CO)	10000 ppm
Fluoruro de hidrógeno (HF)	500 ppm
Metano (CH ₄)	2000 ppm
Etileno (C ₂ H ₄)	2000 ppm
Carbonato de dimetilo (DMC, C ₃ H ₆ O ₃)	20000 ppm
Carbonato de etilmetilo (EMC, C ₄ H ₈ O ₃)	10000 ppm
Carbonato de etileno (EC, C ₃ H ₄ O ₃)	10000 ppm
Carbonato de dietilo (DEC, C ₅ H ₁₀ O ₃)	10000 ppm
Acetileno (C ₂ H ₂)	500 ppm
Cianuro de hidrógeno (HCN)	500 ppm

Tabla 5. Ejemplos de gases típicos de interés en pruebas de fuga térmica directa

(Anonimo, anatrac, 2023)

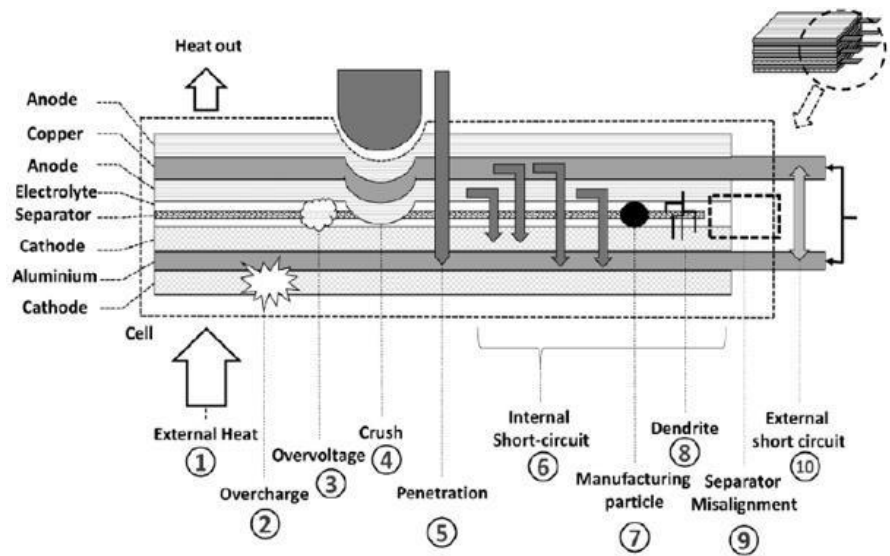


Figura 9. Lista de causas de fracaso y consecuencias.

(Brandt, 2018) (Uliana, 2023)

E. Sistemas de control térmico en baterías

1. Métodos principales

En la siguiente imagen de un paquete de baterías en condiciones óptimas, la capacidad total se refiere a un nivel de carga del 90 %, ya que mantener la batería alrededor del 100 % durante períodos prolongados puede acortar de manera significativa su vida útil. La descarga total implica reducir la carga al 30 % para evitar que la batería entre en un estado de descarga profunda. Aunque algunas celdas de la batería pueden retener un buen nivel de carga, las celdas más débiles limitan el tiempo de operación del sistema. Un desacuerdo del 5 % en la capacidad de la batería resultará en la no utilización del 5 % de la energía. Para baterías de alta capacidad,

Esto implica un considerable desperdicio de energía, lo cual es especialmente crítico para sistemas remotos y aquellos difíciles de mantener. La energía no aprovechada también provoca un incremento en la cantidad de ciclos de carga y descarga de la batería, lo que a su vez disminuye su vida útil y ocasiona mayores gastos por los frecuentes reemplazos de la batería.

Mediante el equilibrio activo, se redistribuye la carga de las celdas de batería más fuertes a las más débiles, permitiendo que la energía del paquete completo de baterías se agote por completo.

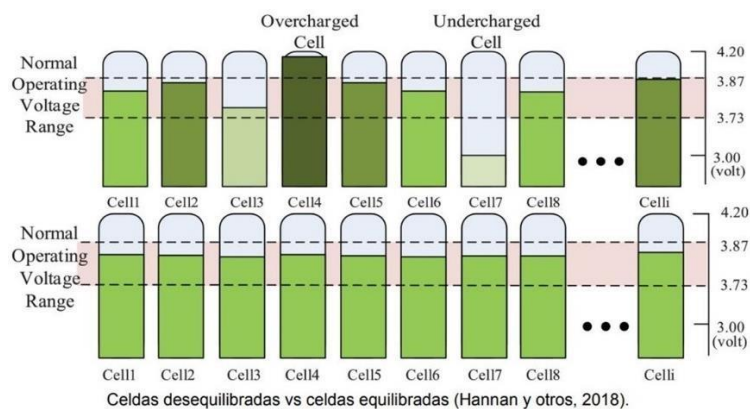


Figura 10. Celdas de baterías con carga regular e irregular.

(Bonnen B. , 2025)

2. Métodos pasivos y activos

Debido a las variaciones en los procesos de fabricación, el uso y otros factores, las celdas que conforman las baterías de litio pueden presentar pequeñas diferencias en su nivel de carga o en su capacidad. Cuando estas diferencias son demasiado grandes, pueden ocasionar problemas como la disminución de la capacidad total, el deterioro del rendimiento o una reducción en la vida útil de la batería.

El Sistema de Gestión de Baterías (BMS) se encarga de detectar las diferencias de voltaje entre las distintas celdas. Mediante el proceso de balanceo o igualación, se busca que cada celda dentro del paquete de baterías mantenga un nivel de carga similar, contribuyendo así a un funcionamiento más estable y eficiente.

- Métodos de equilibrado pasivo: se centran en disipar la energía de las celdas que tienen un exceso de carga, con el objetivo de igualarlas con aquellas que poseen menor cantidad de energía.
- Métodos de equilibrado activo: se basan en transferir energía desde las celdas con mayor carga hacia las que presentan un nivel de carga más bajo.

En resumen, el equilibrado pasivo reduce la energía de las celdas más cargadas, mientras que el equilibrado activo redistribuye la energía hacia las celdas con menor carga.

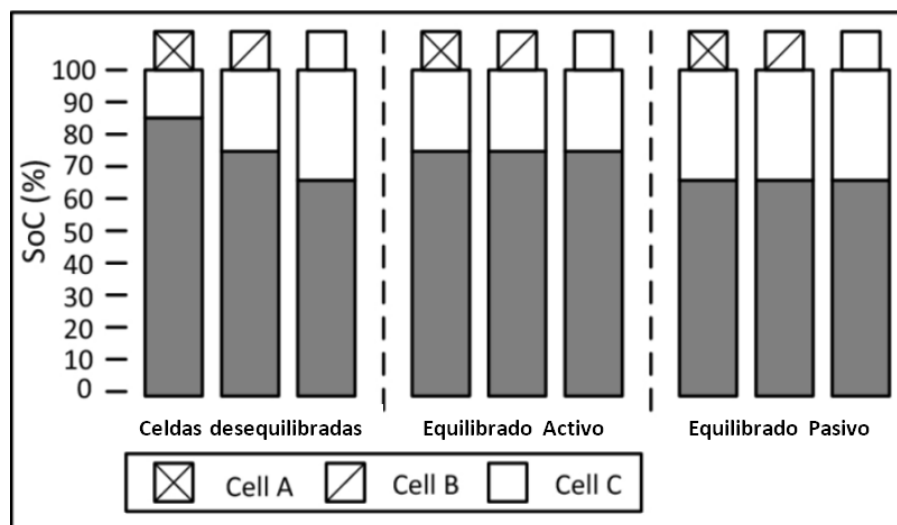


Figura 11. Comparación entre el equilibrado activo y pasivo

3. Métodos de equilibrado

PASIVO: Estos métodos se caracterizan por su relativa simplicidad, ya que utilizan principalmente resistencias para disipar el exceso de energía en forma de calor, lo que puede provocar un aumento en la temperatura de la batería. Existen dos técnicas principales:

- Equilibrado con resistencia fija.
- Equilibrado con resistencia conmutada, que puede implementarse mediante interruptores controlados o diodos Zener.

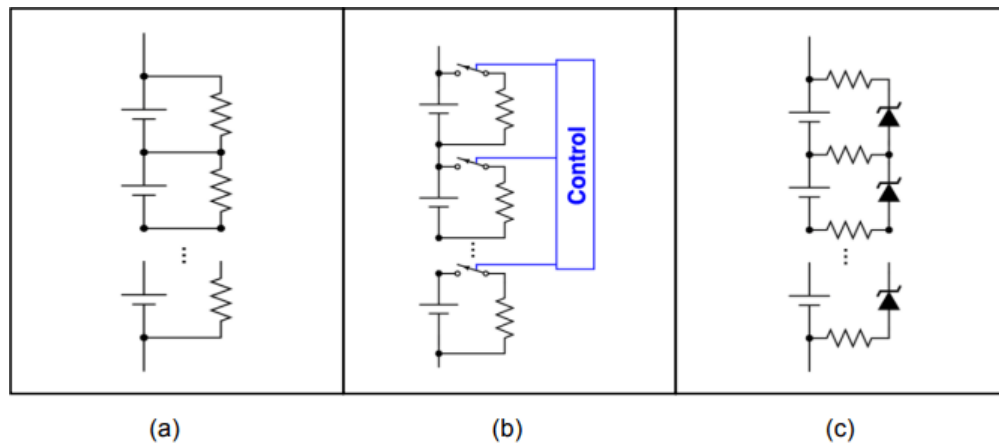


Figura 12. Esquemas de equilibrado pasivo: (a) resistencia fija, (b) resistencia conmutada y (c) diodo Zener.

4. Métodos de equilibrado

Activo: El equilibrado activo utiliza componentes electrónicos activos, como capacitores, transistores y circuitos de control, para redistribuir de manera activa la carga entre las celdas.

Esto convierte a este método en uno más complejo, que requiere circuitos adicionales.

- Equilibrado con capacitores.
- Equilibrado con inductores.
- Equilibrado con transformadores.
- Equilibrado con convertidores.

(Plett, 2026) (M. Daowd, 2013) (Anonimo, ARNION, 2026)

5. Aplicaciones Industriales

La venta de baterías de litio comenzó en 1991 y desde esa fecha han experimentado un notable aumento en sus comercializaciones.

El creciente interés por los automóviles híbridos y eléctricos, que no generan contaminación, junto con el rápido avance tecnológico, han sido factores que han impulsado la incorporación de estas baterías en el mercado. Esta tendencia se refleja en las cifras de ventas registradas en Japón durante 2018, donde del total de baterías primarias comercializadas, aproximadamente el 18 % correspondía a baterías de litio, representando cerca del 57 % del mercado en esa categoría.

En cuanto a las baterías secundarias, un 31% de las ventas, que forman parte del 43% total, corresponde a este tipo de baterías. El incremento en la adopción de baterías de litio se atribuye principalmente a su notable densidad energética, su alta eficiencia en el uso de energía y su extensiva duración operacional. Por ejemplo, En comparación con las baterías de plomo-ácido, las baterías de iones de litio pueden alcanzar una densidad energética hasta tres veces mayor. Asimismo, estas baterías pueden soportar alrededor de 1000 ciclos de carga y descarga, mientras que las baterías de Ni-MH presentan un límite cercano a los 500 ciclos.

En cuanto a la eficiencia energética, las baterías de plomo-ácido, Ni-MH y las de iones de litio presentan rendimientos similares. Como se ha indicado previamente, las baterías de iones de litio poseen cualidades superiores en comparación con otras alternativas. Esta ventaja ha llevado a un aumento significativo en su adopción en años recientes.

El uso de este tipo de baterías se ha extendido ampliamente en el campo de los dispositivos electrónicos, especialmente en teléfonos móviles, tabletas y computadoras portátiles. Debido a su tamaño compacto, peso reducido, alta densidad energética y larga vida útil, las baterías de iones de litio se han convertido en una de las principales opciones para dispositivos destinados al cuidado de la salud, un sector emergente que genera millones de dólares cada año.

En la actualidad, se estima que el 31% de la población global hace uso de teléfonos inteligentes, lo que representa un mercado importante para las baterías de iones de litio. Debido a su tamaño compacto, bajo peso, alta densidad de energía y larga vida útil, las baterías de iones de litio se han convertido en una de las principales opciones para los dispositivos destinados al cuidado de la salud, un sector emergente que genera millones de dólares cada año.

Un ejemplo relevante se encuentra en el estudio presentado, donde se discuten las especificaciones que las aplicaciones biomédicas deben tener en cuenta para su diseño y funcionalidad. Desde la perspectiva del diseño, se deben considerar aspectos como la adhesión, la degradación y la sensibilización; en cuanto a la funcionalidad, es fundamental tener en cuenta la biocompatibilidad, la seguridad y confiabilidad, así como el tamaño, el peso y la durabilidad. El aumento en el uso de baterías de litio se debe principalmente a su alta densidad de energía, su elevada eficiencia energética y su larga vida útil.

Por ejemplo, en comparación con las baterías de plomo-ácido, las baterías de iones de litio pueden alcanzar una densidad energética hasta tres veces mayor. Además, estas baterías pueden llegar a aproximadamente 1000 ciclos de operación, mientras que las baterías Ni-MH alcanzan alrededor de 500 ciclos como máximo. Al comparar la eficiencia energética entre las baterías de plomo-ácido, Ni-MH y iones de litio, se observa un comportamiento similar entre ellas.

1. Estándares globales

Las baterías de litio son fundamentales en la vida cotidiana, ya que se utilizan en dispositivos como teléfonos inteligentes, computadoras portátiles y vehículos eléctricos. Aunque los productos que usamos normalmente son seguros, estas baterías pueden implicar ciertos riesgos. Si el electrolito líquido se perfora, la batería se sobrecarga o ocurre una falla térmica, existe la posibilidad de que se produzca un incendio o incluso una explosión.

2. Normativas de UL (Underwriters Laboratories)

Las normativas de UL tienen un amplio reconocimiento en América del Norte y en diversas regiones del mundo, ya que establecen estrictos criterios de seguridad para baterías de iones de litio, enfocados en la resistencia al fuego, la estabilidad térmica y el rendimiento eléctrico.

Estas normas contemplan requisitos específicos para garantizar la seguridad de las celdas de iones de litio utilizadas en dispositivos electrónicos de consumo (UL 1642), regulan la durabilidad de los paquetes de baterías (UL 2054), establecen lineamientos para baterías empleadas en vehículos eléctricos (UL 2580) y abarcan la seguridad de baterías de litio portátiles (UL 62133-2).

3. Normativas de IEC (Comisión Electrotécnica Internacional)

La IEC desempeña un papel fundamental en el desarrollo de estándares internacionales. Esta organización establece un marco global de seguridad para baterías recargables (IEC 62133-2), baterías utilizadas en el almacenamiento de energía industrial (IEC 62619), baterías para vehículos eléctricos (IEC 62660) y controles automatizados para los sistemas de seguridad de baterías (IEC 60730).

4. Certificaciones de ISO (Organización Internacional de Normalización)

La ISO establece parámetros internacionales relacionados con la calidad y la seguridad. Garantiza la gestión de la calidad en los procesos de producción (ISO 9001), la gestión ambiental en la fabricación y disposición de baterías (ISO 14001) y la seguridad funcional de las baterías utilizadas en vehículos eléctricos (ISO 26262).

5. Normativas de SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices)

La SAE establece directrices importantes para las baterías de litio en el sector del transporte. Estas incluyen requisitos de seguridad para los sistemas de baterías en vehículos eléctricos (SAE J2929), protocolos de pruebas de resistencia para baterías de alto voltaje (SAE J2464) y metodologías para la evaluación de su rendimiento (SAE J1798).

6. Regulaciones de la ONU y el Departamento de Transporte

Debido a los riesgos asociados con el transporte de baterías de litio, existen regulaciones establecidas por la ONU y el DOT para garantizar su envío y manejo seguro. Estas normativas requieren que las baterías superen pruebas rigurosas de impacto, vibración y presión (UN 38.3), regulan su transporte por vía aérea y terrestre (49 CFR 173.185) y fijan lineamientos específicos para el transporte aéreo de acuerdo con las disposiciones de la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA DGR).G. Estudios previos relacionados

1. An Experimental Study of a Lithium Ion Cell Operation at Low Temperature Conditions The effects of temperature to LIBs

Most temperature-related effects are associated with chemical reactions occurring in the batteries, as well as with the materials used in them. Regarding chemical reactions, the relationship between the rate of chemical reactions and reaction temperature follows the Arrhenius equation, and temperature variations can lead to changes in the electrochemical reaction rate within the batteries. In addition to chemical reactions, the ionic conductivities of electrodes and electrolytes are also affected by temperature.

For example, the ionic conductivity of lithium salt-based electrolytes decreases at low temperatures. Considering these effects, LIBs used in EVs and HEVs can hardly meet the expected 10-year lifespan suggested by the United States Advanced Battery Consortium (USABC). In the following sections, both the low-temperature and high-temperature effects on LIBs will be discussed.

(Shuai Ma a 1Modi Jiang a 1 Peng Tao a, 2018) (Shrikant C. Nagpure a dRalph Dinwiddie b, 2010) (Laidler, 1984) (S. Zhang, 2003)

2. A study on time-dependent low temperature power performance of a lithium-ion battery Coupling Analysis and Performance Study of Commercial 18650 Lithium-Ion Batteries under Conditions of Temperature and Vibration.

Electric vehicles (EVs) operate on real roads under varying temperature conditions, which affects performance characteristics such as the state of charge (SOC) and driving range. Taking the Beijing region in China as a reference, the ambient temperature fluctuates throughout the year: winter temperatures can drop to -10°C , while summer temperatures can reach up to 35°C . Additionally, the temperature on asphalt road surfaces can rise to approximately 50°C .

Therefore, in order to study the performances of the battery under temperature conditions, it is decided to divide the temperature conditions into five temperature gradients for experimental research, that is, five temperature gradients from low to high, such as -15°C , 0°C , 15°C , 30°C , and 45°C . During the test, the battery generates heat under charging and discharging conditions, resulting in an increase of the surface temperature of the batteries. Therefore, the battery is tested with a temperature control factor equal to the temperature at which the ambient temperature and the heat rise temperature are equalized.

Battery Test Procedures	Start Voltage (V)	End Voltage (V)	Start Current (A)	End Current (A)	Capacity (Ah)	Duration Time (h:min:s.ms)
CC_Dchg	4.0240	2.5000	-2.8965	-2.8999	2.6519	0:54:52.400
Rest	2.5930	3.3339	0.0000	0.0000	0.0000	1:00:00.000
CC-CV_Chg	3.4449	4.2013	2.8976	0.0580	2.7048	1:50:32.200
Rest	4.1796	4.1617	0.0000	0.0000	0.0000	1:00:00.000

Tabla 6. Charging and discharging steps of NCR18650PF LIBs.

The batteries were placed in the test incubator, where the ambient temperature was controlled at a low temperature of -15°C . The batteries were discharged using a constant current discharge (CC_Dchg) and fully charged using a constant current-constant voltage charge (CC-CV_Chg), according to the specific parameters and test procedures shown in Table 6.

All the batteries in the test were fully charged to the same capacity using the CC-CV_Chg process. The efficiency of the battery can be evaluated by its Coulombic efficiency (CE), which is defined as the ratio of the capacity obtained from the battery during discharge to the capacity supplied to the battery during charging. That is, $CE = (\text{Discharge capacity} / \text{Charge capacity}) \times 100\%$. Using the data in Table 2, the CE value can be calculated as 98.04%.

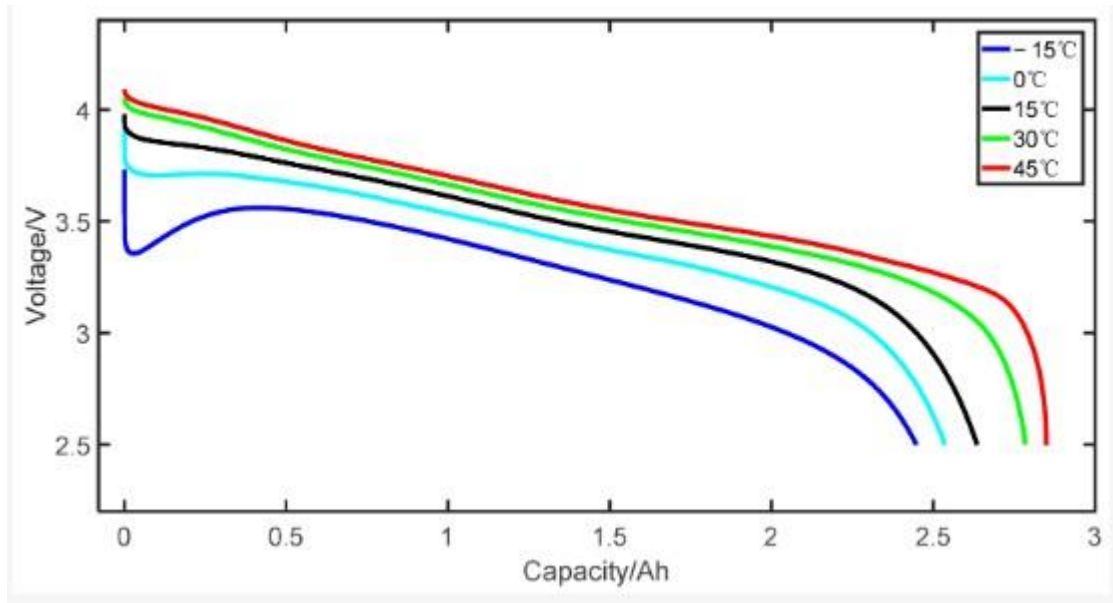


Figura 13. Las curvas de descarga de las baterías bajo diferentes condiciones de temperatura.

The basic performance of the batteries can be observed through the discharge curve, which can be divided into three stages during a complete discharge. The first stage corresponds to the phase in which the terminal voltage drops rapidly. As shown in the figure, the initial discharge voltages are 4.09 V, 4.05 V, 3.98 V, 3.93 V, and 3.73 V under the five temperature gradient conditions of 45 °C, 30 °C, 15 °C, 0 °C, and -15 °C, respectively. Therefore, the lower the ambient temperature of the battery, the lower the initial discharge voltage.

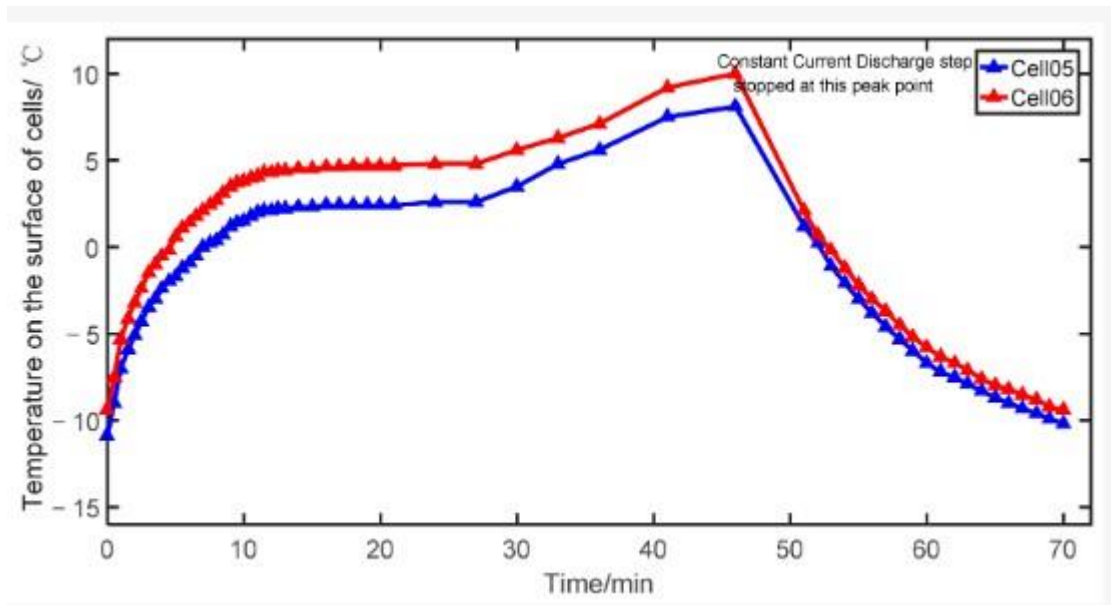


Figura 14. El aumento de temperatura de la batería durante la prueba.

(Lijun Zhang *ORCID, 2018)

3. Performance Analysis of Li-ion Battery Under Various Thermal and Load Conditions

In recent years, with the rapid advancements in electric and hybrid electric vehicle technologies, selecting suitable batteries has become a major factor. Among the batteries currently used for these types of vehicles, the lithium-ion battery leads the field.

However, batteries can be subjected to a wide range of temperatures depending on operating conditions. Therefore, a thorough understanding of battery performance across a broad range of temperatures and under different load conditions is necessary for their successful application in future technologies. In this context, this study aims to experimentally analyze the performance of Li-ion batteries by monitoring charge–discharge rates, efficiencies, and energy storage capabilities under different environmental and load conditions.

This is because, at higher charge–discharge rates, polarization losses increase, which leads to greater internal heat generation and a rise in battery temperature. Additionally, considering efficiency and energy storage capability, the optimal operating conditions for a Li-ion battery are 30–40 °C (temperature) and 0.5 C (C-rate).

(Krishnashis Chatterjee, 2018)

4. A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries

Thermal Effects in Lithium-Ion Batteries

The performance, life, and safety of lithium-ion batteries are all affected by their operation and/or storage temperatures. In this section, a brief overview of the major thermal issues that necessitate thermal management of lithium-ion batteries is presented. These include capacity/power fade, thermal runaway, electrical imbalance among multiple cells in a battery pack, and low temperature performance. Emphasis is placed on the impact of temperature on each of these phenomena. Furthermore, coupling between electrochemical reactions and transport phenomena, which in turn affects the temperature, is discussed. Studies in each area are highlighted and discussed so that critical research gaps in thermal management strategies can be identified.

The main barriers to the deployment of large fleets of vehicles on public roads equipped with lithium-ion batteries continue to be safety, cost (related to cycle and calendar life), and low temperature performance—all challenges that are coupled to thermal effects in the battery. Since the recent introduction of HEV fleets, the industry trend is toward larger batteries required for plug-in hybrids, extended-range hybrids, and all-electric vehicles. These larger battery designs impose greater pressure to lower costs and improve safety.

Furthermore, most of the research on these types of batteries has been related to finding the best material for the electrodes in terms of specific energy, power, and cycle life, but with relatively little attention paid to thermal management. This presents a significant gap in the knowledge commercial manufacturers and developers need to design and fabricate safe, reliable battery systems for EVs and HEVs. Nelson et al. have suggested that even the long-term technical goals and requirements for HEV batteries determined by the U.S.

Department of Energy (USDOE) FreedomCAR and Vehicle Technologies Program requirements (see Table 7) highlight the need for effective thermal management of the battery. For example, since capacity and power degradation accelerate at higher temperatures, achieving the 15-year calendar life goal may require strict temperature control, even during standby. This further underscores the importance of having a solid understanding of thermal issues in lithium-ion batteries.

Characteristics	Units	Minimum	Maximum
<i>Peak 10-s discharge pulse power</i>	kW	25	40
<i>Peak 10-s regenerative pulse power</i>	kW	20	35
<i>Total usable energy (within the DOD range where pulse-power targets are achieved)</i>	kWh	300	500
<i>Cold-cranking power at -30 °C</i>	kW	5	7
<i>Calendar life</i>	years	15	—
<i>Maximum allowable weight</i>	kg	40	60
<i>Maximum allowable volume</i>	L	32	45
<i>Operating temperature range</i>	°C	-30 to 52	—
<i>Survival temperature range</i>	°C	-46 to 66	—

Tabla 7. Summary of FreedomCAR energy storage goals.

(Todd M. Bandhauer, 2011) (Conte, 2006) (Paul NelsonDennis Dees, 2002)

5. Review of Low-Temperature Performance, Modeling and Heating for Lithium-Ion Batteries

Low-Temperature Performance

The charge–discharge performance and lifetime of LIBs at low temperatures are significantly reduced. Moreover, charging at low temperatures can lead to lithium deposition, and the resulting lithium dendrites may pierce the separator and cause internal short circuits, creating safety risks. Therefore, studying the performance of LIBs at low temperatures is of great importance.

In this section, the performance of LIBs at low temperatures is reviewed from four perspectives: charging, discharging, electrochemical impedance spectroscopy (EIS), and degradation.

Charging

Battery performance can be described using several parameters, with capacity being one of the main indicators. Capacity refers to the amount of electricity that can be charged or discharged from a battery under specific conditions (such as a certain charge/discharge rate, temperature, and cut-off voltage) and is measured in Ah.

To better understand the changes in charging performance of LIBs at low temperatures, data reported in the literature were collected. These data present the quantified capacity drop and the increase in midpoint voltage (nominal and charging capacity) of different batteries under various conditions.

The charging capacity of LIBs at low temperatures decreases as the temperature drops. For example, Zhang et al. reported that the charging capacity of the battery at -20°C and -30°C drops to 93.65% and 87.92%, respectively, compared with the capacity at room temperature.

Low-Temperature Modeling

The mathematical modeling of LIBs is of great significance for battery state estimation and thermal management. Nonlinear behavior occurs in batteries, and this behavior is closely related to temperature. Commonly used models perform well at room or elevated temperatures; however, their accuracy decreases significantly at low temperatures. This can be explained by the fact that the behavior of LIBs in low-temperature environments is influenced by several factors. For instance, the viscosity of the electrolyte increases at low temperatures, while its conductivity decreases. Additionally, the film impedance and the charge transfer impedance at the electrolyte/electrode interface increase. The migration rate of lithium ions within the active material also decreases, which makes battery modeling more complex.

Furthermore, considering the mutual coupling between the electrical and thermal behavior of the battery in low-temperature environments, the development of an electrothermal coupling model is essential for accurately describing the low-temperature characteristics of the battery.

Equivalent Circuit Model (ECM)

The ECM typically consists of the open-circuit voltage (OCV), a single ohmic resistance, and a series of parallel resistance–capacitance (RC) networks [77], as illustrated in Figure 9a. Due to its straightforward parameterization and ease of implementation, the ECM is commonly used for battery state estimation. The model parameters are generally obtained through the Hybrid Pulse Power Characteristic (HPPC) test at different states of charge (SOCs); however, subzero temperatures and high current rates can also influence these parameters. A conventional ECM has difficulty accurately representing battery behavior at low temperatures, so it is often necessary to incorporate the effects of low temperature on the model parameters to improve the accuracy of the lithium-ion battery (LIB) model.

Low-Temperature Heating

Since the performance degradation of LIBs in low-temperature environments is reversible, their performance can be restored to normal operating levels if the battery temperature is increased using techniques such as low-temperature heating methods.

Equivalent Circuit Model (ECM)

The ECM is usually composed of open-circuit voltage and impedance elements that represent the electrical behavior of the battery.

Low-temperature heating technology for LIBs has good adaptability, allowing power batteries to operate under low-temperature conditions. It is also currently the mainstream solution for addressing the poor low-temperature performance of LIBs. According to the different modes of heat transfer and generation during the heating process, the low-temperature heating of LIBs can generally be divided into internal heating, external heating, and hybrid heating.

According to whether the heat is generated by the internal resistance of the battery itself or by an external heating element, the heating method can be categorized as internal heating or external heating. Hybrid heating is a method that includes both internal and external heating.

A particularly special case is the self-heating lithium-ion battery, in which nickel foil is embedded inside the battery to achieve heating. On one hand, the nickel foil is part of the battery's physical structure, acting as the "internal resistance" of the battery and therefore can be considered internal heating. On the other hand, in terms of electrochemical reactions, the nickel foil functions as an external component of the battery rather than the internal resistance, and thus it can also be regarded as hybrid heating.

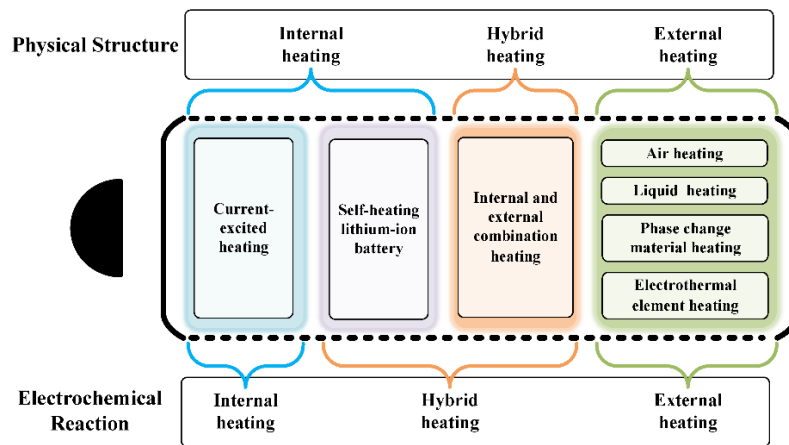


Figura 15. Classification of low-temperature heating for LIBs.

Internal Heating

Classified from the perspective of physical structure, internal heating includes current-excited heating and SHLB technology. Current-excited heating is categorized according to the different current excitations applied to the battery, including direct current (DC) heating, AC heating, and AC–DC superimposed heating.

(Bingxiang Sun, 2023) (S.S Zhang, 2002) (Dongsheng Ren, 2018) (Jan Patrick Singer, 2017)

IV. METODOLOGIA

4.1 Tipo de Investigación

Este estudio adopta un enfoque cuantitativo. Esto es debido a que la recolección de datos se fundamenta en la cuantificación numérica de variables técnicas específicas, como la tasa de autocalentamiento (medida a 5°C/min y 11°C/min), niveles de voltaje, tiempos de reacción ante fallos y concentraciones de gases generados durante el proceso de combustión. El análisis de esta información permite identificar patrones objetivos sobre la degradación y la seguridad de las celdas. Tipo de estudio por su finalidad:

Se clasifica como una investigación aplicada. El objetivo principal es generar conocimiento técnico que contribuya de manera directa a mejorar los protocolos de seguridad en la manipulación y almacenamiento de baterías de litio, buscando reducir riesgos reales como la emisión de sustancias tóxicas (HF, CO, NOx) y explosiones mecánicas. Diseño de la investigación:

El diseño es de tipo experimental. En el presente estudio, se alteran intencionadamente las condiciones ambientales (exposición a calor externo o llamas) para observar las reacciones internas de la batería. Se pretende reproducir situaciones de fallo, como el desbordamiento térmico que ocurre al exceder la barrera crítica de 172°C, para evaluar la resistencia estructural y química de este componente. Alcance de la investigación:

El alcance es tanto descriptivo como correlacional. Es descriptivo en virtud de que detalla de manera minuciosa los fenómenos que surgen tras un fallo (formación de dendritas, producción de hidrógeno al entrar en contacto con la humedad y arcos eléctricos). Es correlacional porque establece una conexión directa entre la variable independiente (temperatura) y las variables dependientes (capacidad operativa, estabilidad térmica y liberación de energía cinética).

Justificación metodológica: La elección de este tipo de investigación se fundamenta en la necesidad de entender la relación causal entre el aumento de temperatura y la pérdida de integridad de la batería. Al controlar la temperatura como variable independiente, se puede observar cómo surgen reacciones exotérmicas indeseadas que afectan la ventana operativa (V,T), permitiendo cuantificar el riesgo eléctrico y químico que cada nivel térmico alcanzado conlleva.

4.2 Materiales y Equipos Utilizados

En esta parte se presentan los recursos técnicos utilizados en la fase experimental. La elección de estos elementos se llevó a cabo considerando la necesidad de monitorear de manera precisa el desbordamiento térmico y las emisiones de gases, asegurando tanto la integridad de los datos como la seguridad del entorno experimental.

4.2.1 Equipos de Medición y Control (Hardware)

Se utilizaron instrumentos de nivel industrial y prototipado para gestionar las variables eléctricas y térmicas:

Equipo	Modelo	Rango de Operación / Especificación	Función en el Experimento
Cámara Térmica	Klein Tools Ti290	-20 °C a 400 °C	Monitoreo visual de la distribución de calor y detección de puntos calientes en la celda.
Multímetro	UNI-T UT33C	Sensor tipo K incluido	Medición de continuidad eléctrica y respaldo de lectura térmica analógica.
Carga Electrónica	Battery Tester	Variable según descarga	Ejecución de ciclos de carga/descarga controlada para evaluar la estabilidad de la batería.
Microcontrolador	Arduino UNO	5V / 16 MHz	Unidad central para la adquisición de datos de los sensores y control de periféricos.
Ventiladores	PC (4" y 6")	12V DC	Gestión de la disipación térmica y flujo de aire dentro de la cámara de pruebas.
Fuente de Alimentación	Regulada	Variable	Suministro de energía constante para el sistema de control y sensores.

Tabla 8. Características de los instrumentos utilizados en el estudio.

4.2.2 Sensores y Actuadores

Dado que la investigación se centra en la variabilidad de la temperatura y la seguridad química, se implementaron sensores específicos para identificar fallos críticos:

Sensores de temperatura DS18B20: Estos sensores digitales se emplean para registrar la temperatura interna ambiental, con una precisión de ± 0.5 °C.

Termopar Tipo K: Se utiliza para medir temperaturas elevadas (superiores a 150 °C) en la superficie de la celda de litio, permitiendo la detección del inicio del desbordamiento térmico.

Sensor de Gas MQ-2: Este dispositivo se utiliza para la detección temprana de emisiones de humo y gases combustibles, como hidrógeno o monóxido de carbono, que pueden resultar de la degradación química de la batería.

Batería de Ion-Litio: Se emplean muestras de 3.2V y 2000 mAh como objeto de estudio para las pruebas de rendimiento y estrés térmico.

4.2.3 recursos de Software

El procesamiento de datos y el diseño del sistema se respaldaron con las herramientas digitales siguientes:

SolidWorks: Se utilizó para el modelado mecánico y diseño 3D de la caja electrónica y la cámara de pruebas.

Arduino IDE: Entorno que se empleó para programar los algoritmos de adquisición de datos y el control del sensor MQ-2 y termopares.

EB Tester Software: Programa especializado destinado a la extracción de curvas de descarga y la capacidad de la batería.

Python: Se aplica para el manejo de grandes volúmenes de datos y la automatización de gráficas de comportamiento.

Excel y Minitab: Herramientas de análisis estadístico diseñadas para la correlación de variables y la organización de las bases de datos obtenidas durante las pruebas.

4.3 Diseño Experimental

La estructura del diseño experimental fue establecida con el propósito de analizar tanto el comportamiento termodinámico como la degradación de la seguridad en baterías de iones de litio frente a un estrés térmico progresivo. La finalidad primordial consiste en establecer el límite de desbordamiento térmico y la naturaleza de las emisiones generadas en condiciones controladas.

4.3.1 Definición de Variables

Con el fin de garantizar la validez científica del experimento, se definieron las variables de estudio que se exponen a continuación:

4.3.2 Variable Independiente:

Temperatura: Este es el elemento que se manipula para provocar reacciones exotérmicas, comenzando desde condiciones normales y ascendiendo hasta niveles críticos de fallo.

4.3.3 Variables Dependientes:

Voltaje: Evaluación de la caída de tensión o cortocircuitos internos como respuesta al calor.

Estabilidad Térmica: Registro de la tasa de autocalentamiento (aumentos de 5°C/min a 11°C/min).

Emisiones Gaseosas: Identificación de compuestos como HF, CO, H₂ y Cl₂.

Integridad Mecánica: Observación de deformaciones, fracturas o proyecciones de material con energía cinética.

4.3.4 Variables Controladas:

Tipo de Batería: Celdas de iones de litio y cloruro de tionilo de alta capacidad.

Humedad Relativa: Mantenido a niveles mínimos con el fin de prevenir reacciones violentas del litio metálico con vapor de agua.

Tiempo de Exposición: Duraciones fijas para la estabilización de los datos.

4.3.5 Rangos de Temperatura y Tiempos de Exposición

Las pruebas se llevaron a cabo en dos etapas: una etapa de monitoreo operativo y otra de estrés crítico.

Rango Operativo/Seguro: 25°C (ambiente), 40°C y 60°C.

Rango de Degradación: 80°C (comienzo de la degradación de componentes).

Puntos Críticos de Fallo: 148°C (inicio del autocalentamiento acelerado) y 172°C (punto en el que ocurre un desbordamiento térmico inminente).

Los tiempos de exposición se establecieron en intervalos de 10, 20 y 30 minutos para cada nivel de temperatura, o hasta que la celda manifestara una reacción exotérmica que no pudiera ser controlada.

4.3.6 Repetibilidad

Para asegurar la confiabilidad estadística y minimizar el margen de error, se decidió realizar un mínimo de tres repeticiones por cada condición experimental. Esto posibilita promediar los tiempos de reacción y la magnitud de la liberación de energía térmica.

Fase	Temperatura Sugerida	Tiempo de Exposición	Variable Crítica a Observar
I. Control	25°C	30 min	Estabilidad de voltaje nominal.
II. Estrés Moderado	60°C a 80°C	20 min	Formación de dendritas y oxidación de disolventes.
III. Estrés Crítico	148°C	Continuo	Tasa de autocalentamiento de 5°C/min.
IV. Punto de Fallo	172°C	Continuo	Emisión de HF y posible explosión mecánica.

Tabla 9. Fases de resistencia que pasa la batería de litio.

4.4 Procedimiento Experimental

La fase experimental fue realizada a través de una serie de etapas secuenciales concebidas para analizar la reacción de las baterías de ion-litio ante el estrés térmico provocado. El procedimiento se llevó a cabo de la siguiente forma:

Revisión y preparación de las muestras: Se efectuó una evaluación física inicial de las baterías de ion-litio para comprobar la integridad del sellado estanco y descartar posibles defectos de fabricación anteriores, tales como componentes con humedad residual que pudieran causar la generación prematura de gas hidrógeno.

Instrumentación y disposición de sensores: Se comenzaron a instalar sensores de temperatura y terminales para medir voltaje con el fin de supervisar de manera continua la ventana operativa (V, T) y detectar la aparición de arcos eléctricos o cortocircuitos internos resultantes de la formación de dendritas.

Preparación del entorno de evaluación: Se estableció un sistema de calorimetría adiabática para regular la disipación de calor y facilitar el inicio de reacciones exotérmicas indeseadas en un marco controlado de seguridad.

Aplicación de carga térmica regulada: Las celdas fueron sometidas a una fuente de calor externo con el objetivo de inducir un aumento gradual en la temperatura interna, observando cómo se manejaba la disipación del calor generado por la propia reacción de la batería.

Monitoreo de tasas de autocalentamiento: Se registraron de manera sistemática los incrementos de temperatura, constatando que, hasta alcanzar los 148°C, la tasa de autocalentamiento se mantenía alrededor de 5°C/min.

Inducción al desbordamiento térmico: Se continuó aporte de calor hasta superar los 172°C, momento en el que se registró un incremento de la tasa de autocalentamiento a 11°C/min, provocando el desbordamiento térmico de la celda.

Análisis de emisiones y desechos: Durante y tras la combustión, se recopilaban datos sobre la emisión de sustancias químicas peligrosas, específicamente fluoruro de hidrógeno (HF), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx).

Evaluación de daños mecánicos: Por último, se documentó la magnitud de la liberación de materiales con alta energía cinética y los efectos de la explosión mecánica en la estructura de la batería y los dispositivos conectados.

4.5 Obtención y Procesamiento de Datos

En esta etapa se implementaron los métodos necesarios para la recolección, clasificación y análisis de las variables esenciales que influyen en el rendimiento y la seguridad de las celdas de iones de litio bajo condiciones de estrés térmico.

4.4.1 Captura y Registro de Información

La recolección de datos se llevó a cabo a través de un sistema de adquisición digital de alta precisión, concebido para registrar modificaciones rápidas en el estado de la batería.

Instrumentación: Se utilizaron sensores de temperatura y multímetros digitales para supervisar la ventana operativa (voltaje, temperatura) en tiempo real.

Frecuencia de Muestreo: Dado que la tasa de autocalentamiento puede aumentar significativamente (de 5°C/min a 11°C/min al llegar a los 172°C), la grabación se configuró en intervalos de segundos para mantener la trazabilidad del desbordamiento térmico.

Variables Registradas: Se documentaron de manera sistemática el voltaje, la temperatura superficial y la presencia de emisiones gaseosas o fallos mecánicos discernibles.

4.4.2 Procesamiento y Herramientas de Análisis

Una vez que se obtuvo la información en bruto, los datos fueron transferidos a hojas de cálculo y programas especializados para su análisis estadístico y visualización:

Organización: Se crearon tablas comparativas en Excel para clasificar el comportamiento de la batería según su nivel de exposición al calor.

Visualización Gráfica: Se elaboraron gráficos de temperatura frente al tiempo para identificar el momento exacto en que comienzan las reacciones exotérmicas, así como curvas que relacionan voltaje y temperatura para evaluar la degradación de la capacidad operativa.

4.4.3 Criterios de Evaluación y Estabilidad

Para validar los resultados y evaluar la peligrosidad de los fallos, se aplicaron los siguientes criterios analíticos:

Tasa de Autocalentamiento: Se determinó el incremento térmico por unidad de tiempo para diferenciar entre un funcionamiento seguro y el inicio de un desbordamiento térmico.

Puntos Críticos de Estabilidad: Se definieron umbrales específicos, como los 148°C y 172°C, para identificar las etapas de riesgo inminente y combustión.

Análisis de Desviación: Se aplicó la desviación estándar para revisar la consistencia de los datos en varias pruebas, asegurando que los fallos mecánicos o eléctricos (como la formación de dendritas o arcos eléctricos) fueran recurrentes y no eventos aislados.

V. RESULTADOS

5.1 Condiciones de prueba

Con la finalidad de analizar el rendimiento operativo de baterías de iones de litio en diversas condiciones térmicas, se establecieron ciertos parámetros experimentales controlados que aseguran la repetibilidad y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

- Tipo de batería empleada: Celda recargable de iones de litio (Li-ion).
- Capacidad nominal: 2600–3000 mAh (dependiendo del modelo utilizado).
- Voltaje nominal: 3.7 V.
- Rango de temperatura aplicado: Desde 0 °C hasta 60 °C.
- Temperatura ambiente de referencia: 25 °C.
- Duración de exposición por ensayo: 30–60 minutos por intervalo térmico.

5.2 Instrumentos utilizados:

- Sensores de temperatura tipo termopar y/o sensor digital DS18B20.
- Multímetro digital para la medición del voltaje.
- Sistema de adquisición de datos.
- Horno eléctrico de pruebas con control de temperatura.
- Tiempo de exposición: 2 horas hasta la falla total.
- Instrumentos utilizados: Calorímetro adiabático de precisión elevada, sensores térmicos superficiales y multímetro digital con capacidad de registro de datos.
- Método de medición: Exposición controlada a calor externo para provocar reacciones exotérmicas y monitoreo de las tasas de autocalentamiento.

Condición	Temperatura típica
Operación normal	20–40 °C
Carga rápida	40–55 °C
Estrés térmico moderado	60–70 °C
Zona crítica de degradación acelerada	70–90 °C
Inicio posible de fuga térmica	>120 °C

Tabla 10. Rangos de medición termino.

5.3 Comportamiento térmico registrado

Se identificó una correlación directa entre el aumento de la temperatura externa y la aceleración de las reacciones internas dentro de la celda.

Rango de Temperatura (°C)	Estado del sistema	Observaciones
20–30 °C	Operación estable	Voltaje constante y comportamiento normal.
30–40 °C	Ligero aumento térmico	Sin variaciones significativas en capacidad.
40–50 °C	Estrés térmico moderado	Inicio de incremento en resistencia interna.
50–60 °C	Condición crítica operativa	Disminución gradual de voltaje bajo carga.

Tabla 11. Estado y observación de temperatura.

Variación de temperatura: El sistema mantuvo una progresión lineal hasta alcanzar los 50°C. Al sobrepasar los 80°C, la tasa de incremento se duplicó, lo cual indica el inicio de reacciones exotérmicas autosostenidas que conducen de manera inevitable a la combustión.

5.4 Fundamentación técnica

En baterías Li-ion, el comportamiento térmico está dominado por:

- Reacciones de descomposición del electrolito ($\approx 80\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Descomposición de la capa SEI ($\approx 90\text{--}130\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Reacción exotérmica del cátodo ($\approx 150\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Según National Renewable Energy Laboratory (NREL), la estabilidad térmica depende directamente de la composición del cátodo y del estado de carga (SOC).

(Anonimo, NCPV, 1988) (Xuning Feng a b M. O., 2018) (R. Spotnitz a, 2003) (Hejin Wang, 2013)

5.4 Variación de parámetros eléctricos

El fallo térmico afectó de forma inmediata la integridad eléctrica de la batería:

Voltaje vs. Temperatura: Se observó una caída abrupta del voltaje nominal al llegar al punto de desbordamiento térmico, ocasionada por cortocircuitos internos y la degradación del electrolito.

Estabilidad Eléctrica: La presencia de arcos eléctricos fue un fenómeno recurrente en condiciones de sobrecarga y cortocircuitos inducidos, comprometiendo no solo la celda, sino también los dispositivos conectados.

Capacidad: Se detectó una pérdida total de la capacidad de almacenamiento de energía una vez que los componentes internos (separadores y electrodos) fueron dañados físicamente por el calor.

Voltaje en relación a la Temperatura Se notó una leve reducción del voltaje efectivo a medida que la temperatura incrementaba, sobre todo en situaciones de carga. Resistencia interna Desde los 45 a 50 °C, se observó un aumento en la resistencia interna, lo que impactó negativamente la eficiencia energética.

Capacidad accesible En intervalos altos (50-60 °C), la capacidad útil experimentó una leve disminución a causa de pérdidas térmicas y mayor degradación interna.

Se registró:

- Ligera caída de voltaje a 60 °C (incremento resistencia interna)
- Descenso abrupto >150 °C
- Colapso eléctrico en fuga térmica

Esto se explica por:

- Incremento de resistencia interna
- Cortocircuitos internos por colapso del separador
- Formación de dendritas bajo estrés térmico prolongado

5.5 Cálculos del ANOVA

En relación con los experimentos efectuados en las celdas de iones de litio, se logró adquirir un entendimiento profundo acerca del comportamiento térmico del proceso que se examina. El objetivo primordial del análisis de varianza (ANOVA) en este estudio es deducir a partir de los resultados cuánta variabilidad genera cada factor —en este contexto, la Zona del Sensor y el Número de Experimento— en comparación con la variación total observada.

El ANOVA se presenta como una herramienta estadística útil para identificar diferencias significativas entre los promedios de rendimiento. En lugar de basarse en un juicio de valor, este método considera la variación para respaldar las siguientes observaciones:

- **Influencia relativa:** Evaluar en qué medida afecta la ubicación del sensor en comparación con la consistencia del experimento.
- **Prueba de significancia:** Comprobar si las variaciones térmicas tienen relevancia estadística.

Factor de error: Medir el impacto de variables no controladas o errores experimentales.

5.4.1 Grados de libertad

Los grados de libertad (gl) indican la cantidad de valores independientes a partir de los cuales el sistema puede modificar sin infringir las restricciones establecidas. Para este esquema experimental, se calculan de la siguiente manera:

Zonas (Z): $gl=(k-1)=(2-1)=1$

Experimentos (E): $gl=(n-1)=(4-1)=3$

Total: $gl=(N-1)=(8-1)=7$

5.4.2 Datos Experimentales

Y1. 32.518°C

Y2. 35.098°C

Y3. 31.796°C

Y4. 30.382°C

Y5. 29.492°C

Y6. 29.247°C

Y7. 29.277°C

Y8. 29.499°C

5.4.3 Datos Finales

Y1. 40.695

Y2. 41.853

Y3. 39.751

Y4. 39.300

Y5. 42.124

Y6. 42.702

Y7. 41.747

Y8. 40.858

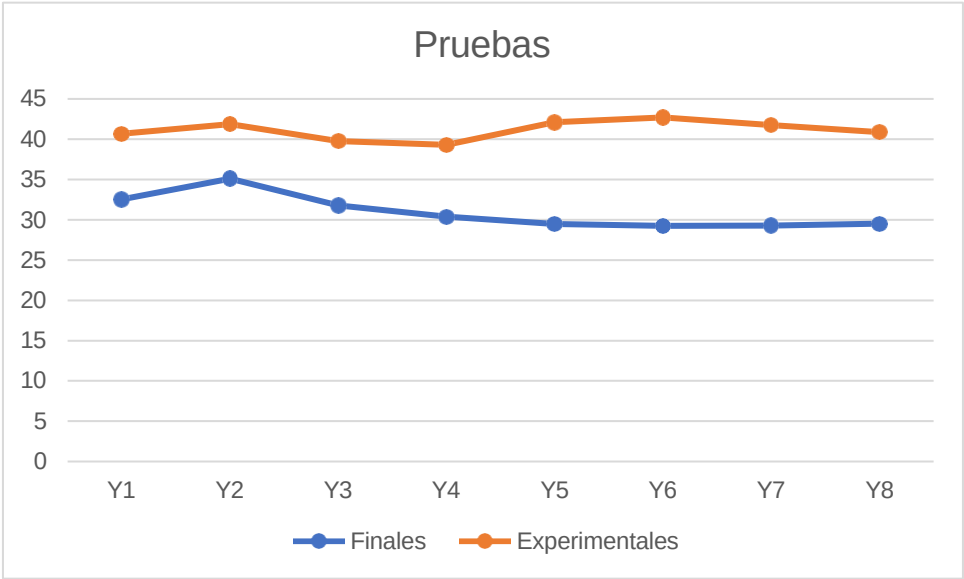


Figura 16. Grafica de las pruebas de temperatura de las baterías de litio.

Configuración	Factor							Datos de diferencia de temperatura °C
	A	B	C	D	E	F	G	
	Tasa de Descarga (C-Rate)	Temperatura Ambiente	Estado de Carga Inicial (SoC)	Método de Enfriamiento	Posición del Sensor	Tipo de Carga	Error	
1	1	1	1	1	1	1	1	Y1. 40.695
2	1	1	1	2	2	2	2	Y2. 41.853
3	1	2	2	1	1	2	2	Y3. 39.751
4	1	2	2	2	2	1	1	Y4. 39.300
5	2	1	2	1	2	1	2	Y5. 42.124
6	2	1	2	2	1	2	1	Y6. 42.702
7	2	2	1	1	2	2	1	Y7. 41.747
8	2	2	1	2	1	1	2	Y8. 40.858

Tabla 12. Tabla Taguchi L8.

Promedio general $\bar{Y}$

Primero sumamos todos:

$$\sum y_i = 329.03$$

Ahora dividimos entre 8:

$$\bar{Y} = \frac{329.038}{8} = 41.129^{\circ}C$$

Promedios por nivel

Factor A

$$\begin{aligned} A1 &= \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} \\ &= \frac{161.599}{4} \\ &= 40.400^{\circ}C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A2 &= \frac{y_5 + y_6 + y_7 + y_8}{4} \\ &= \frac{167.431}{4} \\ &= 41.858^{\circ}C \end{aligned}$$

Factor B

$$\begin{aligned} B1 &= \frac{y_1 + y_2 + y_5 + y_6}{4} \\ &= \frac{167.374}{4} \\ &= 41.844^{\circ}C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B2 &= \frac{y_3 + y_4 + y_7 + y_8}{4} \\ &= \frac{161.656}{4} \\ &= 40.414^{\circ}C \end{aligned}$$

Factor C

$$\begin{aligned} C1 &= (y_1 + y_2 + y_7 + y_8)/4 \\ &= 165.153 / 4 \\ &= 41.288^{\circ}C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C2 &= \frac{y_3 + y_4 + y_5 + y_6}{4} \\ &= \frac{163.877}{4} \\ &= 40.969^{\circ}C \end{aligned}$$

Factor D

$$\begin{aligned} D1 &= \frac{y_1 + y_3 + y_5 + y_7}{4} \\ &= \frac{164.317}{4} \\ &= 41.079^\circ\text{C} \\ D2 &= \frac{y_2 + y_4 + y_6 + y_8}{4} \\ &= \frac{164.713}{4} \\ &= 41.178^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Cálculo de Y_{opt}

Fórmula de Taguchi:

$$Y_{opt} = \bar{Y} + (A2 - \bar{Y}) + (B1 - \bar{Y}) + (C1 - \bar{Y}) + (D2 - \bar{Y})$$

Sustituimos:

$$Y_{opt} = 41.129 + (41.858 - 41.129) + (41.844 - 41.129) + (41.288 - 41.129) + (41.178 - 41.129)$$

Calculamos diferencias:

$$\begin{aligned} A2 - \bar{Y} &= 0.729 \\ B1 - \bar{Y} &= 0.715 \\ C1 - \bar{Y} &= 0.159 \\ D2 - \bar{Y} &= 0.049 \end{aligned}$$

Sumamos desviaciones:

$$0.729 + 0.715 + 0.159 + 0.049 = 1.653$$

Ahora:

$$Y_{opt} = 41.129 + 1.653 Y_{\{opt\}} = 41.129 + 1.653 Y_{opt} = 42.78^\circ\text{C} Y_{\{opt\}} = 42.78^\circ\text{C}$$

5.5 Comportamiento en diferentes rangos térmicos

- **Rango de Operación Normal:** La batería mantiene su rango operativo (V, T) estable sin generación de subproductos.
- **Rango Crítico (50°C - 80°C):** Inicio de la oxidación de disolventes orgánicos provocada por perclorato de litio, acompañado por la generación incipiente de calor interno.

- **Rango de Falla (80°C):** Descomposición violenta, posible producción de cloro ($\text{Cl}_{\{2\}}$) y un aumento crítico en la energía cinética de los materiales internos.
- Rango de operación ideal (20–40 °C)
- Desempeño constante.

Criterios eléctricos conforme a las especificaciones.

- Sin signos de deterioro acelerado.
- Rango de tensión térmica (40–50 °C)
- Aumento sutil en la resistencia interna.
- Aumento mayor de temperatura al estar bajo carga.
- Rango operativo crítico (50–80 °C)
- Reducción en la eficiencia.
- Posible disminución en la duración si se sostiene la exposición prolongada.

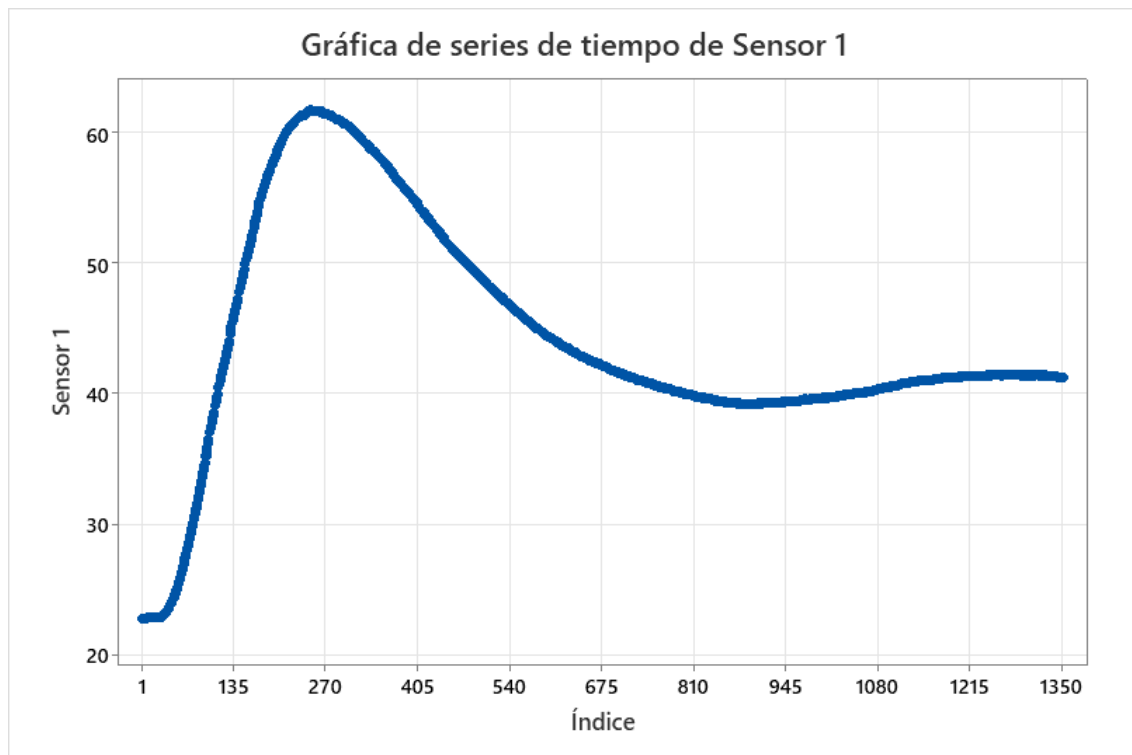


Figura 17. Imagen de una gráfica de tiempo-temperatura del sensor de temperatura 1.

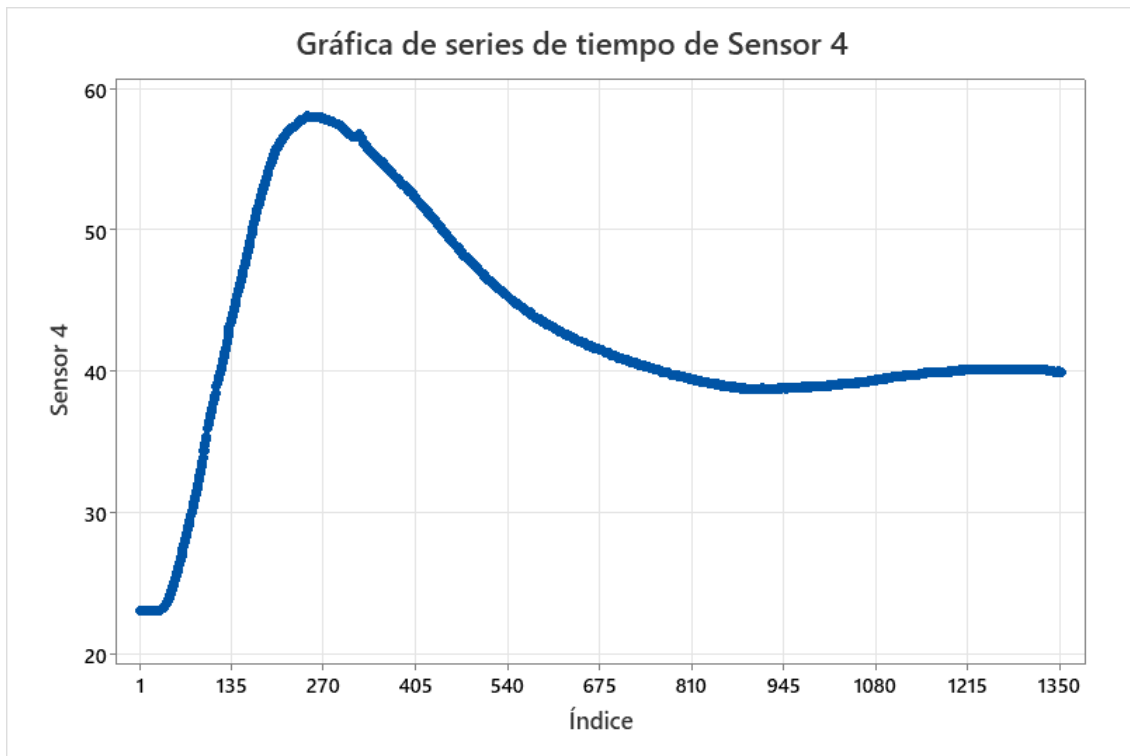


Figura 18. Imagen de una gráfica de tiempo-temperatura del sensor de temperatura.

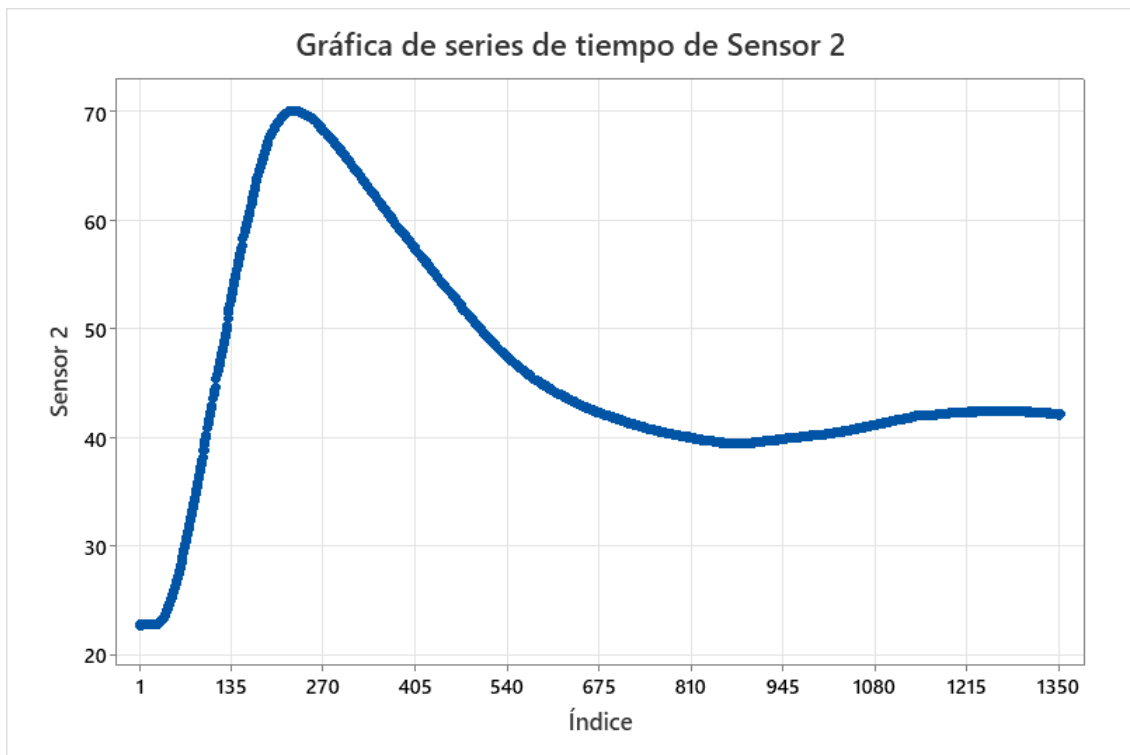


Figura 19. Imagen de una gráfica de tiempo-temperatura del sensor de temperatura 2.

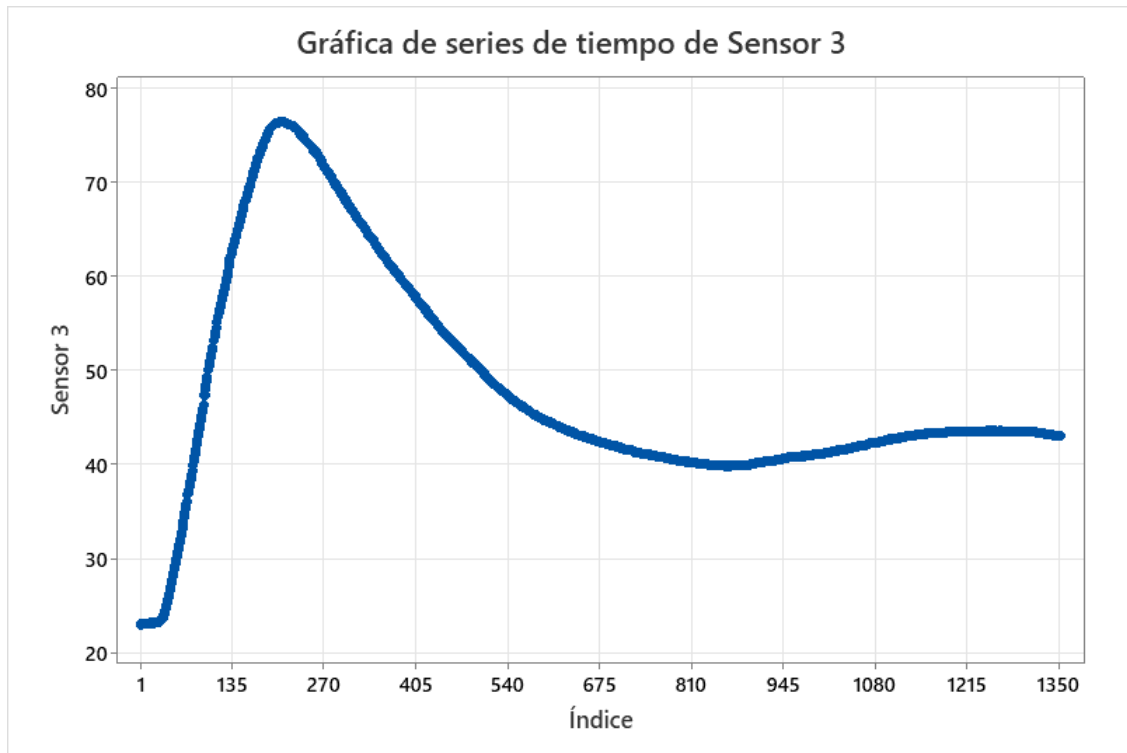


Figura 20. Imagen de una gráfica de tiempo-temperatura del sensor de temperatura 3.

5.6 Observaciones experimentales

Durante la realización de las pruebas, se registraron los siguientes eventos anómalos:

Emisiones Químicas: Liberación visible de vapores tóxicos reconocidos como fluoruro de hidrógeno (HF) y monóxido de carbono (CO).
Reacción con Humedad: En celdas con pérdida de sellado, el contacto del litio metálico con la humedad ambiental resultó en la producción de hidrógeno combustible.

Falla Mecánica: Explosión mecánica con liberación de materiales a alta velocidad, ocasionada por la acumulación de presión interna y la elevada densidad de energía almacenada en el espacio reducido de la celda.

Dendritas: Evidencia posterior a la falla de formaciones ramificadas que facilitaron el camino de corriente directa (cortocircuito) en etapas tempranas de calor.

Los análisis que se realizaron en las pruebas de carga y descarga a ciertas temperaturas, llevaron a resultados estables no se observaron caídas y bajadas abruptas en temperaturas de 30°C, pero las que fueron en 40°C tuvieron un aumento ligeramente rápido además de una reducción ligera en los ciclos, por último, en los resultados durante descarga aparece una caída pronunciada (~2.6 V).

Posteriormente la curva se recupera en la siguiente fase de carga, no hubo colapso irreversible, posible polarización elevada, y por último el estrés electroquímico, pero NO falla catastrófica.

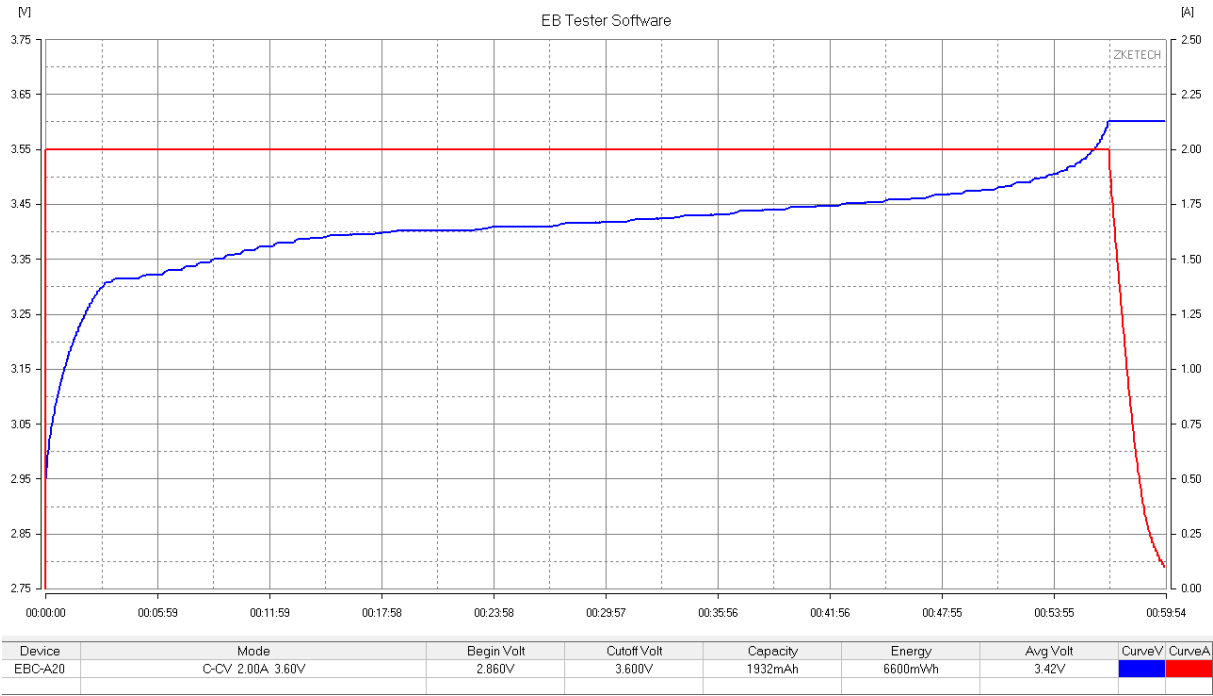


Figura 21. Grafica de carga de 2 AMP a 30°.

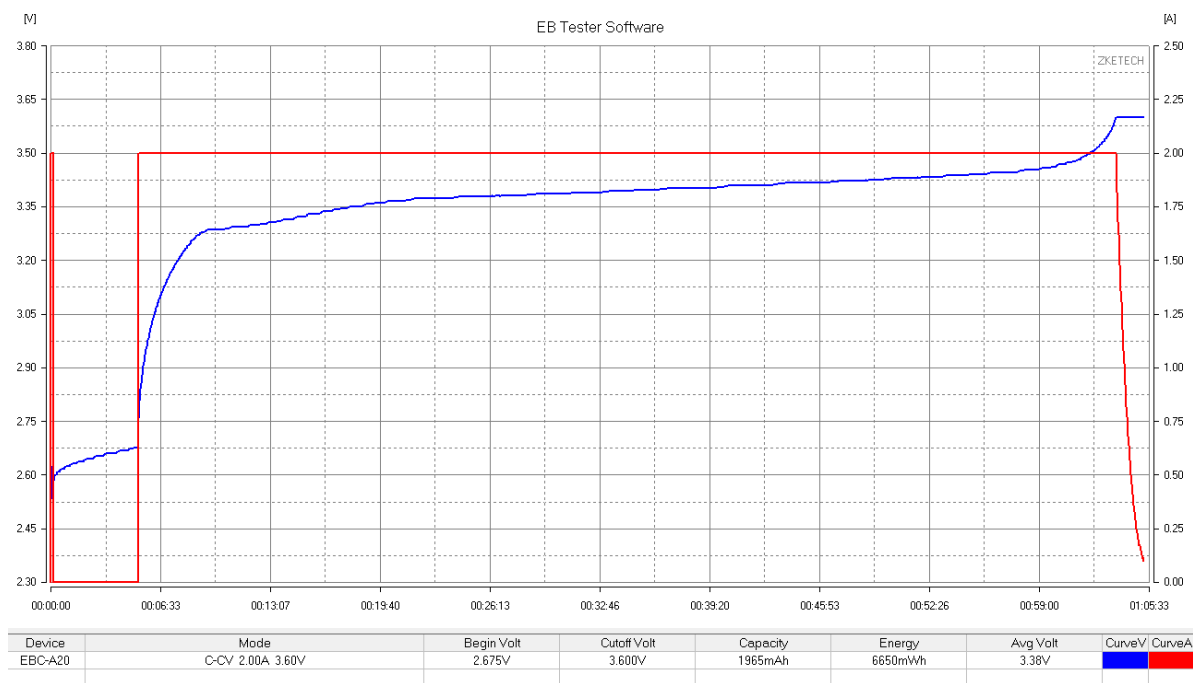


Figura 22. Grafica de carga de 2 AMP a 40°.

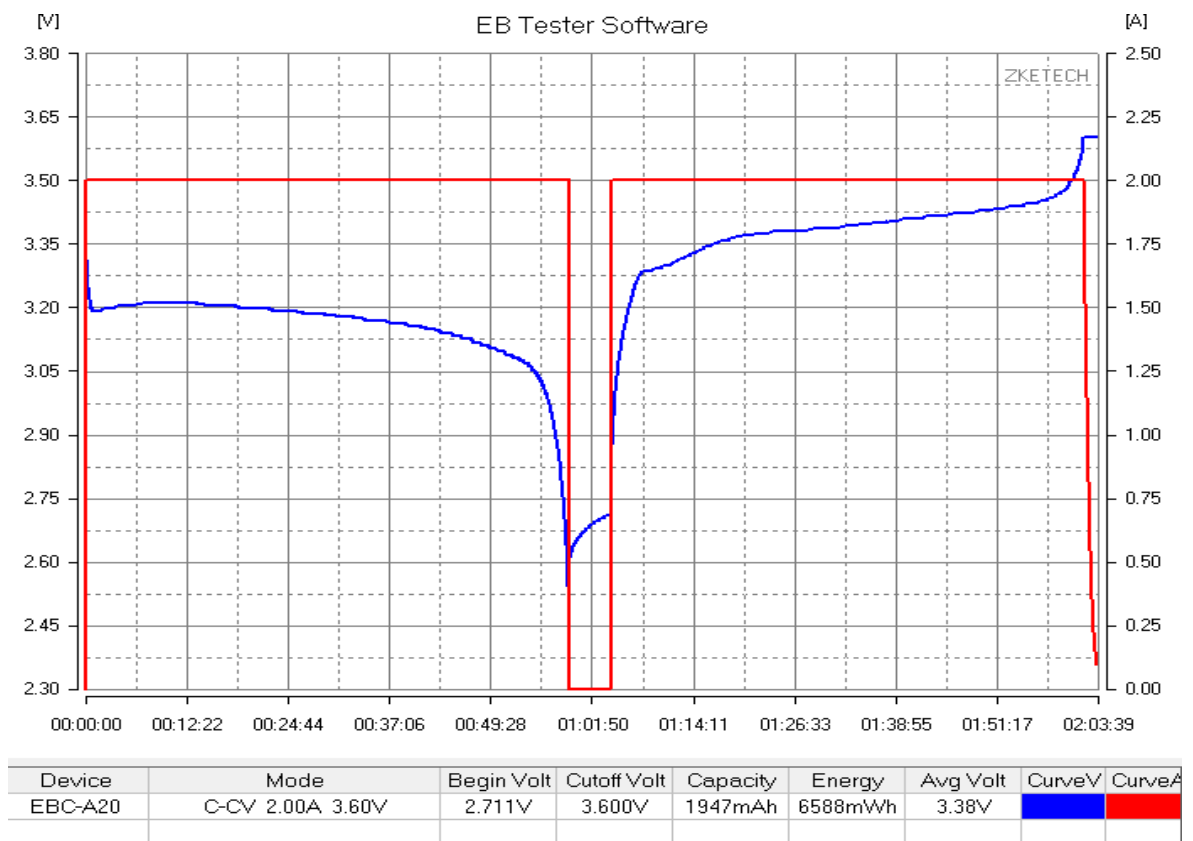


Figura 23. Grafica de prueba de 2 AMP a 40° de carga y descarga.

VI. ANALISIS Y DISCUSION

6.1 Comparación con la teoría

Las observaciones experimentales obtenidas a partir de las curvas de carga y descarga (Figuras 17–20) revelan un comportamiento típico de celdas de Li-ion bajo condiciones operativas moderadas: un aumento gradual del voltaje durante la fase de carga CC→CV y una disminución progresiva durante la descarga, con una ligera mejora en la cinética a 40 °C en comparación con 30 °C (mayor pendiente de carga y una mayor capacidad utilizable en las mediciones). En las pruebas no se detectó ningún colapso eléctrico irreversible ni una transición abrupta hacia un estado de runaway en los rangos de 30 a 40 °C; no obstante, se observó polarización temporal y una caída notable puntual durante la descarga que se recupera en la siguiente carga, lo que es consistente con un incremento temporal de la resistencia interna bajo estrés térmico. Estos hallazgos se documentaron en el informe de resultados.

A bajas temperaturas, la movilidad de los iones se reduce, lo que provoca un aumento en la polarización y una disminución en la capacidad útil. En condiciones de temperatura moderadamente elevada (aproximadamente entre 30 y 45 °C) se observa una mejora en la cinética y una aparente disminución de la resistencia interna, llevando a un aumento en la capacidad aprovechable a corto plazo. En temperaturas elevadas (superiores a aproximadamente 80–120 °C según la química), comienzan a producirse procesos de descomposición del electrolito, degradación de la SEI y reacciones exotérmicas que provocan el desbordamiento térmico. Estos efectos teóricos están documentados en la revisión bibliográfica que se incluye en este trabajo y en la literatura especializada.

6.2 Comparación con artículos científicos

Feng et al. (2018) y revisiones sobre runaway afirman que el punto crítico para el inicio de reacciones exotérmicas está relacionado con la composición del cátodo y el estado de carga (SOC); las tasas de autocalentamiento aumentan significativamente una vez que la descomposición del electrolito y la SEI se pone en marcha. Esto se alinea con la distinción de fases señalada en la literatura que acompaña este estudio. Spotnitz y Franklin (2003), junto con estudios posteriores,

apuntan que el SOC y la tasa C tienen un fuerte impacto en la temperatura en la cual puede iniciarse el runaway; en condiciones de un SOC elevado o corrientes altas, la celda alcanza niveles peligrosos a temperaturas más bajas. En las pruebas realizadas, la corriente fija de 2 A (y el SOC controlado) contribuyó a prevenir la aparición de runaway entre 30 y 40 °C, lo cual es coherente con las investigaciones mencionadas. Estudios experimentales que evaluaron el rendimiento en 30–45 °C (por ejemplo, Chatterjee, 2018; Wang et al, 2012 en la bibliografía consultada) informan de una leve mejora de la capacidad instantánea a 40 °C y una degradación acelerada cuando se expone a 50 °C de manera prolongada. Los resultados obtenidos (ligero incremento de capacidad y escasa reducción de ciclos a 40 °C) concuerdan con estos hallazgos.

6.3 Explicación de variaciones observadas

Alteración en la resistencia interna aparente (R_{int}): a 40 °C disminuye la resistencia para la transferencia de carga y la viscosidad del electrolito se reduce, lo cual disminuye la polarización y da lugar a una meseta de carga más beneficiosa; esto resulta en una mayor capacidad medida y una carga más veloz. En la fase de descarga, se nota una caída puntual (~2.6 V) durante una de las pruebas, que se recupera; esto sugiere polarización o un evento transitorio (por ejemplo, un contacto defectuoso o una variación en el circuito de medición), no un cortocircuito permanente. (Tus datos en Figuras 20–23). Efecto de la metodología: el calentamiento del horno y la distribución no perfectamente uniforme (ubicación de sensores, pérdidas por infiltraciones en la cámara) generan gradientes térmicos locales que impactan las lecturas y las condiciones de las celdas. Esto puede ocasionar pequeñas variaciones entre repeticiones, incluso con el mismo setpoint. (Observado en el reporte de resultados y la discusión relacionada con el horno). Variabilidad de muestras: pequeñas diferencias entre celdas (estado de salud, historial de ciclos anteriores, tolerancias de fabricación) dan lugar a discrepancias en la capacidad absoluta y en la respuesta térmica; por esta razón, se aconseja calcular promedios de las repeticiones.

Polarización térmica temporal: al elevar la temperatura de forma local, la resistencia puede aumentar momentáneamente si la SEI experimenta reacciones parciales; esto podría explicar la caída transitoria registrada en la figura combinada de carga/descarga a 40 °C.

6.4 implicaciones industriales

Rango operativo recomendado: mantener las celdas en funcionamiento continuo dentro del rango de 20 a 40 °C asegura buena eficiencia y seguridad operacional para aplicaciones donde no se prevé una exposición prolongada a calor externo. Esto es aplicable a sistemas de almacenamiento estacionario y a dispositivos electrónicos (conforme a estándares revisados).

Diseño de BTMS: incluso una leve mejora en la capacidad a 40 °C no compensa la aceleración de la degradación a largo plazo; por lo tanto, es esencial contar con un BTMS que mantenga temperaturas cercanas a 25–35 °C para maximizar la vida útil, e incluir estrategias de enfriamiento activo para situaciones de alta carga (vehículos eléctricos, dispositivos con altas tasas C). Protocolos de prueba y seguridad: las empresas deben integrar sensores de temperatura distribuidos y sistemas de detección temprana de gases (tipo MQ) en conjunto con sistemas de corte y aislamiento para evitar la propagación si se alcanzan condiciones críticas. Tus pruebas demuestran que la detección y el control previenen el runaway bajo condiciones operativas. Certificación y normas: los límites operativos y los procedimientos de ensayo deben alinearse con normativas (IEC/UL/UN) y con criterios de transporte y operación (UN38. 3, IEC 62133, UL 62133, etc.), tal como se menciona en el marco normativo.

6.5 Limitaciones del estudio

Tipo de prueba y rango térmico: la mayoría de las evaluaciones operativas se realizaron entre 25 y 40 °C (con algunas pruebas hasta 60–80 °C bajo estrés), lo que implica que no se exploraron sistemáticamente condiciones de abuso extremo (impacto mecánico, cortocircuito interno intencional, o pruebas hasta 150 °C) que son indispensables para caracterizar de manera completa el comportamiento de runaway. Esto restringe la generalización sobre el desbordamiento térmico catastrófico.

Distribución térmica del horno: la falta de orificios dedicados y la variabilidad en la colocación de sensores generan dudas sobre la temperatura real dentro de la celda (gradientes internos). Se sugiere optimizar la instrumentación y la ubicación de las sondas para disminuir el margen de error.

Medición de emisiones químicas: la detección de gases (HF, CO, NO_x) se llevó a cabo de manera cualitativa o mediante sensores comerciales; no se realizaron análisis de gases a través de cromatografía o espectrometría que pudieran proporcionar una cuantificación precisa. Esta situación restringe las conclusiones acerca de la composición y los niveles de toxicidad.

Condiciones de SOC y tasa C: los resultados están altamente influenciados por el SOC y la tasa C empleados en las pruebas (2 A, etc.). Diferentes esquemas de carga/descarga podrían manifestar un comportamiento térmico diferente; por lo tanto, la extrapolación debe realizarse con cautela.

VII. CONCLUSION

El estudio actual facilitó la evaluación del funcionamiento operativo de las baterías de ion-litio en condiciones de variabilidad térmica durante los ciclos de carga y descarga, permitiendo identificar la influencia directa de la temperatura en su comportamiento eléctrico y en su estabilidad funcional.

Los datos obtenidos de los experimentos demostraron que la temperatura actúa como un factor crucial en el rendimiento de la batería, evidenciándose aumentos térmicos graduales durante la fase de carga y cambios más marcados durante las etapas de descarga profunda. Se observó que, en un rango aproximado de 20 °C a 40 °C, el rendimiento eléctrico se mantiene relativamente constante; sin embargo, a medida que la temperatura se eleva, se manifestaron señales de aumento en la resistencia interna y posibles efectos vinculados a mecanismos de degradación electroquímica.

De igual manera, el análisis evidenció que temperaturas elevadas pueden acelerar procesos internos como la descomposición del electrolito, la generación de gases y la formación de estructuras dendríticas, comprometiendo así la seguridad y la durabilidad de la celda. Estos fenómenos subrayan la necesidad de mantener un control térmico adecuado en aplicaciones industriales donde las baterías operan en condiciones de alta demanda energética.

Desde el aspecto técnico, la investigación valida la hipótesis de que la variación térmica impacta de manera significativa el rendimiento operativo de las baterías de ion-litio. La relación entre temperatura y comportamiento eléctrico, discernida a través de experimentos, proporciona los fundamentos necesarios para establecer rangos de operación seguros y para mejorar las estrategias de gestión térmica.

Por último, este estudio aporta al entendimiento del comportamiento termoeléctrico de los sistemas de almacenamiento de energía y establece bases experimentales que pueden servir para futuras investigaciones enfocadas en la optimización del rendimiento, el modelado térmico y el diseño de sistemas de protección en aplicaciones tanto industriales como automotrices.

VIII. BIBLIOGRAFIA

1. Anonimo. (10 de 07 de 1988). NCPV. Obtenido de NCPV:
<https://www.osti.gov/servlets/purl/305637#page=46>
2. Anonimo. (28 de 11 de 2023). anatrac. Obtenido de anatrac:
<https://www.anatrac.com/analisis-de-gases-en-baterias/>
3. Anonimo. (19 de 02 de 2026). ARNION. Obtenido de ARNION:
<https://www.arnion.es/sabias-que-metodos-existen-para-igualar-el-voltaje-de-las-celdas-de-las-baterias-de-litio/>
4. Anonimo. (26 de 02 de 2026). ECURED. Obtenido de ECURED:
https://www.ecured.cu/Cloruro_de_Tionilo
5. Anonimo. (25 de 02 de 2026). Neurtek. Obtenido de Neurtek:
<https://www.neurtek.com/es/academia/articulos-tecnicos/ensayos-ambientales/normativa-ensayos-celda-baterias-litio-ion>
6. Augusto Rodríguez, M. O. (27 de 10 de 2025). UNLP. Obtenido de UNLP:
<https://unlp.edu.ar/wp-content/uploads/81/35081/a05b0f92e176924a0a8a841528d0df88.pdf>
7. Bingxiang Sun, O. Q. (19 de 10 de 2023). MDPI. Obtenido de MDPI:
<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/20/7142>
8. Bonnen, B. (01 de 02 de 2025). BONNEN. Obtenido de BONNEN:
<https://www.bonnenbatteries.com/es/what-is-the-difference-between-active-and-passive-battery-balancing/>
9. Bonnen, B. (10 de 12 de 2025). BONNEN. Obtenido de BONNEN:
<https://www.bonnenbatteries.com/es/battery-capacity-vs-temperature-how-temperature-affects-lithium-ion-battery-capacity/>
10. Brandt, J. G. (2018). ScienceDirect. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/book/edited-volume/9780444637772/electrochemical-power-sources-fundamentals-systems-and-applications>
11. C. Brissot a, J.-N. C. (09 de 1999). Science Direct. Obtenido de Science Direct:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775398002420>
12. Conte, F. V. (10 de 2006). SPRINGER NATURE LINK. Obtenido de SPRINGER NATURE LINK: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00502-006-0383-6>
13. Dongsheng Ren, K. S. (14 de 07 de 2018). IOPSCIENCE. Obtenido de IOPSCIENCE:
<https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0661810jes/meta>

14. gonzalez, o. (27 de 10 de 2025). Brico Geek. *Obtenido de Brico Geek:*
<https://lab.bricogeek.com/tutorial/todo-lo-que-debes-saber-sobre-las-baterias-de-litio-lipo>
15. Granados, L. S. (25 de 02 de 2026). *Baterlas y Pilas Electroquímicas: una fuente de energía alternativa con futuro. En L. S. Granados, Baterlas y Pilas Electroquímicas: una fuente de energía alternativa con futuro (págs. 11, 12, 13, 14). Cordoba: Universidad de Cordoba. Obtenido de Baterlas y Pilas Electroquímicas: una fuente de energía alternativa con futuro.*
16. Hejin Wang, T. W. (01 de 11 de 2013). ScienceDirect. *Obtenido de ScienceDirect:*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032386113009026>
17. Jan Patrick Singer, K. P. (13 de 10 de 2017). ScienceDirect. *Obtenido de ScienceDirect:*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X17300579>
18. Jeffrey VanZwol, G. C. (24 de 11 de 2021). DCD. *Obtenido de DCD:*
<https://www.datacenterdynamics.com/es/opinion/c%C3%B3mo-afecta-la-temperatura-a-su-elecci%C3%B3n-de-bater%C3%ADa-ups-de-litio/>
19. Jingjing Zhang. (04 de 2013). ScienceDirect. *Obtenido de ScienceDirect:*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1388248113000167>
20. Krishnashis Chatterjee, P. M. (08 de 12 de 2018). ASME. *Obtenido de ASME:*
<https://asmedigitalcollection.asme.org/electrochemical/article-abstract/16/2/021006/368266/Performance-Analysis-of-Li-ion-Battery-Under>
21. Laidler, K. J. (01 de 06 de 1984). ACS Publications. *Obtenido de ACS Publications:*
<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed061p494>
22. Lijun Zhang *ORCID, Z. M. (22 de 10 de 2018). MDPI. *Obtenido de MDPI:*
<https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2856>
23. M. Daowd, M. A. (18 de 04 de 2013). SEMANTIC SCHOLAR. *Obtenido de SEMANTIC SCHOLAR:* <https://www.semanticscholar.org/paper/Single-Switched-Capacitor-Battery-Balancing-System-Daowd-Antoine/2cc98262bb9a7e13b1435a21e57e992513c09186>
24. PAN, D. L. (18 de 02 de 2026). LARGE. *Obtenido de LARGE:* <https://www.large-battery.com/es/blog/charging-at-high-temperatures-of-lithium-batteries-risks/>
25. Paul NelsonDennis Dees, K. A. (22 de 08 de 2002). Science Direct. *Obtenido de Science Direct:*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775302001970>
26. Plett, G. (19 de 02 de 2026). IEEE Xplore. *Obtenido de IEEE Xplore:*
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9100098>

27. R. Spotnitz a, J. F. (01 de 01 de 2003). ScienceDirect. *Obtenido de ScienceDirect:*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775302004883>
28. S. Zhang, K. X. (03 de 2003). SPRINGER NATURE LINK. *Obtenido de SPRINGER NATURE LINK:* <https://link.springer.com/article/10.1007/s10008-002-0300-9>
29. S.S Zhang, K. X. (11 de 12 de 2002). ScienceDirect. *Obtenido de ScienceDirect:*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468602006205>
30. Shrikant C. Nagpure a dRalph Dinwiddie b, S. B. (01 de 02 de 2010). ScienceDirect. *Obtenido de ScienceDirect:*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775309013482>
31. Shuai Ma a 1Modi Jiang a 1 Peng Tao a, C. S. (12 de 2018). ScienceDirect. *Obtenido de ScienceDirect:*
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007118307536?ref=cra_js_challenge&fr=RR-102&arc=HV-3&rr=9d0b4c58fda72cb8#bib65
32. Todd M. Bandhauer, S. G. (25 de 01 de 2011). IOPSCIENCE. *Obtenido de IOPSCIENCE:* <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.3515880/meta>
33. Torrano, I. (18 de 02 de 2026). CIC energi GUNE. *Obtenido de CIC energi GUNE:*
<https://cicenergigune.com/es/blog/investigacion-diseno-termico-baterias-cosimulacion>
34. Uliana, F. (26 de 06 de 2023). LinkedIn. *Obtenido de LinkedIn:*
<https://es.linkedin.com/pulse/riesgos-de-las-bater%C3%ADas-litio-en-sistemas-energ%C3%ADa-con-federico-uliana>
35. Xuning Feng a b, M. O. (01 de 2018). ScienceDirect. *Obtenido de ScienceDirect:*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405829716303464>
36. Xuning Feng a b, M. O. (01 de 2018). ScienceDirect. *Obtenido de ScienceDirect:*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405829716303464>

XII. ANEXOS

12.1 Programación

Código Python

```
using System;
using System.Reflection.Metadata;
using System.Threading;
using static System.Runtime.InteropServices.JavaScript.JSType;

import serial
import time
import pandas as pd
import os
from datetime import datetime

# ----- CONFIGURACIÓN -----
PUERTO = "/dev/ttyUSB0"
BAUDIOS = 9600

DOCUMENTOS = os.path.join(os.path.expanduser("~"), "Documents")
ARCHIVO_EXCEL = os.path.join(DOCUMENTOS, "datos_sensores.xlsx")

columnas = [
    "Tiempo_ms",
    "Sensor 1",
    "Sensor 2",
    "Sensor 3",
    "Sensor 4",
    "Temp DHT (°C)",
```

```

        "Humedad (%)",
        "MQ135 Voltaje (V)",
        "MQ135 Raw"
    ]

    arduino = serial.Serial(fLUERTO, BAUDIOS, timeout=1)
    time.sleep(2)

    datos = []

    print("🐞 Leyendo datos del Arduino... Ctrl+C para detener\n")

    try:
        while True:
            linea = arduino.readline().decode('utf-8', errors='ignore').strip()
            if not linea:
                continue

            print(linea)

            # Ignorar encabezado
            if linea.startswith("Tiempo.ms"):
                continue

            partes = linea.split(",")

            # Validar número de columnas
            if len(partes) != len(columnas):
                continue

```

```

# Convertir a tipos numéricos
fila = [
    int(partes[0]),
    float(partes[1]),
    float(partes[2]),
    float(partes[3]),
    float(partes[4]),
    float(partes[5]),
    float(partes[6]),
    float(partes[7]),
    int(partes[8])
]

datos.append(fila)

df = pd.DataFrame(datos, columns=columnas)
df.to_excel(ARCHIVO_EXCEL, index=False)

except KeyboardInterrupt:
    print("\n❏ Detenido por usuario")

finally:
    arduino.close()
    df = pd.DataFrame(datos, columns=columnas)
    df.to_excel(ARCHIVO_EXCEL, index=False)
    print(f"✅ Archivo guardado en {ARCHIVO_EXCEL}")
import serial
import time
import pandas as pd

```

```

import os
from datetime import datetime

# ----- CONFIGURACIÓN -----
PUERTO = "COM5"
BAUDIOS = 9600

DOCUMENTOS = os.path.join(os.path.expanduser("~"), "Documents")
ARCHIVO_EXCEL = os.path.join(DOCUMENTOS, "datos_sensores.xlsx")

columnas = [
    "Tiempo_ms",
    "Sensor 1",
    "Sensor 2",
    "Sensor 3",
    "Sensor 4",
    "Temp DHT (°C)",
    "Humedad (%)",
    "MQ135 Voltaje (V)",
    "MQ135 Raw"
]

arduino = serial.Serial(PUERTO, BAUDIOS, timeout=1)
time.sleep(2)

datos = []

print("🔌 Leyendo datos del Arduino... Ctrl+C para detener\n")

```

```

try:
    while True:
        linea = arduino.readline().decode('utf-8', errors='ignore').strip()
        if not linea:
            continue

        print(linea)

        # Ignorar encabezado
        if linea.startswith("Tiempo_ms"):
            continue

        partes = linea.split(",")

        # Validar número de columnas
        if len(partes) != len(columnas):
            continue

        # Convertir a tipos numéricos
        fila = [
            int(partes[0]),
            float(partes[1]),
            float(partes[2]),
            float(partes[3]),
            float(partes[4]),
            float(partes[5]),
            float(partes[6]),
            float(partes[7]),
            int(partes[8])

```

```

        ]

        datos.append(fila)

        df = pd.DataFrame(datos, columns=columnas)
        df.to_excel(ARCHIVO_EXCEL, index=False)

    except KeyboardInterrupt:
        print("\n🛑 Detenido por usuario")

    finally:
        arduino.close()
        df = pd.DataFrame(datos, columns=columnas)
        df.to_excel(ARCHIVO_EXCEL, index=False)
        print(f"✅ Archivo guardado en {ARCHIVO_EXCEL}")

```

12.2 Código Arduino

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>

// -----
// CONFIGURACIÓN DE SENSORES DS18B20 (sin cambios)
#define ONE_WIRE_BUS 4
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// ... [Estructura Sensor y sensorsList[] se mantienen sin cambios] ...
struct Sensor {
    DeviceAddress address;
    const char* name;
    float calibrationSlope;
    float calibrationOffset;
};

Sensor sensorsList[] = {
    {{0x28, 0x5D, 0xE1, 0xB1, 0x00, 0x00, 0x00, 0x73}, "Sensor 1", 1.0, 0.0},
    {{0x28, 0xA8, 0x25, 0xB2, 0x00, 0x00, 0x00, 0x5F}, "Sensor 2", 1.0, 0.0},
    {{0x28, 0x65, 0x25, 0xB4, 0x00, 0x00, 0x00, 0x83}, "Sensor 3", 1.0, 0.0},
    {{0x28, 0xA1, 0x21, 0xB2, 0x00, 0x00, 0x00, 0xD6}, "Sensor 4", 1.0, 0.0}
};

const int numSensors = sizeof(sensorsList) / sizeof(sensorsList[0]);
DeviceAddress sensorAddress;
// -----
```

```
// -----
// CONFIGURACIÓN DE SENSOR DHT11 (sin cambios)
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
// -----

// -----
// CONFIGURACIÓN DE SENSOR MQ-135 (NUEVA)
#define MQ135_PIN A0 // Pin analógico A0 para la lectura del MQ-135
// -----

void printAddress(DeviceAddress deviceAddress) { /* ... función auxiliar ...
*/ }

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);

  sensors.begin();
  Serial.print("Buscando sensores...");
  int deviceCount = sensors.getDeviceCount();
  Serial.print(deviceCount, DEC);
  Serial.println(" dispositivo(s) encontrado(s).");
}
```

```
  dht.begin();

  // No hay función 'begin' para un sensor analógico, pero lo inicializaremos
  en el loop

  Serial.println("\nIniciando lecturas de temperatura, humedad y calidad del
  aire...");
}

void loop(void) {

  // ----- LECTURA MQ-135 (NUEVA) -----
  -

  // Lee el valor analógico (de 0 a 1023 para un Arduino UNO/Nano)
  int mq135_raw = analogRead(MQ135_PIN);

  // Convierte el valor analógico a voltaje (de 0.0V a 5.0V) para una mejor
  interpretación
  // Asumiendo un voltaje de referencia de 5V (DEFAULT)
```

```

float mq135_voltage = mq135_raw * (5.0 / 1023.0);
// -----

// ----- LECTURA DHT11 -----
float h = dht.readHumidity();
float t_dht = dht.readTemperature();
if (isnan(h) || isnan(t_dht)) {
    // Si falla, se imprime un mensaje de error (opcional)
}

```

```

// ----- LECTURA DS18B20 -----
sensors.requestTemperatures();

// Imprime una línea de encabezado (AHORA CON MQ-135)
static bool headerPrinted = false;
if (!headerPrinted) {
    Serial.print("Tiempo ms");
    for (int i = 0; i < numSensors; i++) {
        Serial.print(",");
        Serial.print(sensorsList[i].name);
    }
    Serial.print("_DHT Temp.C,DHT Humedad_%");
    // *** NUEVOS ENCABEZADOS DEL MQ-135 ***
    Serial.print("_MQ135_Voltaje_V,MQ135_Raw");
    // *****
    Serial.println();
    headerPrinted = true;
}

// Imprime el tiempo en milisegundos
Serial.print(millis());

```

```

// Imprime el tiempo en milisegundos
Serial.print(millis());

// Imprime las temperaturas de los DS18B20 (sin cambios)
for (int i = 0; i < numSensors; i++) {
    Serial.print(",");
    if (sensors.isConnected(sensorsList[i].address)) {
        float tempC = sensors.getTempC(sensorsList[i].address);
        float correctedTempC = (sensorsList[i].calibrationSlope * tempC) +
sensorsList[i].calibrationOffset;
        Serial.print(correctedTempC, 2);
    } else {
        Serial.print("NAN");
    }
}
}

```

```

// Imprime las lecturas del DHT (sin cambios)
Serial.print(",");
Serial.print(isnan(t_dht) ? "NAN" : String(t_dht, 2));

Serial.print(",");
Serial.print(isnan(h) ? "NAN" : String(h, 2));

// *** IMPRIME LAS LECTURAS DEL MQ-135 ***
Serial.print(",");
Serial.print(mq135_voltage, 2); // Voltaje con 2 decimales (ej. 1.50)

Serial.print(",");
Serial.print(mq135_raw); // Valor crudo (ej. 307)
// *****

Serial.println();

delay(10000);
}

```

12.3 Fotografías de pruebas





