



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

## **CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FUNCIÓN DE PÉRDIDAS EN UNA BATERÍA DE IONES DE LITIO**

Autor: Javier Rodríguez Criado

Director: Javier García González

Co-Director: Jorge Suárez Porras

Madrid

2025



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
**CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FUNCIÓN DE PÉRDIDAS EN  
UNA BATERÍA DE IONES DE LITIO**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/2025 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Javier Rodriguez Criado

Fecha: 27/08/2025

Autorizada la entrega del proyecto

**EL DIRECTOR DEL PROYECTO**

GARCIA  
GONZALEZ  
JAVIER -  
25685421X

Firmado digitalmente  
por GARCIA GONZALEZ  
JAVIER - 25685421X  
Fecha: 2025.08.28  
13:01:15 +02'00'

Fdo.: Javier García González

Fecha: 27/08/2025





# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

## CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FUNCIÓN DE PÉRDIDAS EN UNA BATERÍA DE IONES DE LITIO

Autor: Javier Rodríguez Criado

Director: Javier García González

Co-Director: Jorge Suárez Porras

Madrid

2025



# Agradecimientos

Agradecimientos a mis padres Alicia y Carlos por su incesante apoyo a lo largo de mi carrera y por haber apostado por mí a lo largo de estos 6 años totales de formación en comillas ICAI. Agradecimientos también a mis profesores de la carrera por su excelente trabajo, apoyo y confianza depositada en nosotros para labrar el futuro que siempre hemos soñado y por poder tener la suerte de dedicarme a lo que me gusta.

# CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FUNCIÓN DE PÉRDIDAS EN UNA BATERÍA DE IONES DE LITIO

**Autor:** Rodríguez Criado, Javier.

**Director:** García González, Javier.

**Co-Director:** Suárez Porras, Jorge.

**Entidad Colaboradora:** ICAI

## RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto tiene como objetivo medir experimentalmente las pérdidas que se producen en una batería Li-Ion durante la carga y descarga. Los resultados se contrastarán con expresiones teóricas recogidas en la literatura técnica. En particular, se analizarán las formulaciones propuestas en el trabajo de García-González y Guerrero, que modelan pérdidas no lineales[1] .

## Palabras Clave

batería de iones de litio, pérdidas instantáneas, pérdidas no lineales, eficiencia energética, caracterización experimental, gestión de baterías, sistemas de almacenamiento.

## Introducción

Este proyecto tiene como motivación el entendimiento, desarrollo y caracterización del almacenamiento de la energía eléctrica en baterías de iones de litio. Este tipo de tecnología de almacenamiento se ofrece como la más popular para, por ejemplo, gestionar la intermitencia de la generación renovable, entre otros beneficios.

El aumento de la necesidad de almacenamiento eléctrico viene motivado por el cambio de modelo actual de generación eléctrica. Este nuevo modelo, impulsado por toda Europa, se basa en la sustitución de la generación eléctrica convencional por tecnologías renovables.

No obstante, esta rápida transformación del modelo energético actual y de los

sistemas de redes eléctricas presenta grandes retos. Entre ellos, los principales se pueden resumir en gestionar la intermitencia de generación, debido a que esta depende de fenómenos meteorológicos cambiantes, a la vez que se debe dar estabilidad y aportar potencia de cortocircuito a la red. Para ello, actualmente se depende de los grandes generadores síncronos acoplados a la red y de centrales de bombeo para el almacenamiento masivo de energía eléctrica. No obstante, el mix energético está tendiendo cada vez más hacia una generación en la que el porcentaje de renovables es cada vez mayor, y la generación síncrona está tomando cada vez menor protagonismo. Además, las centrales de bombeo son limitadas, pues dependen únicamente de la geografía del terreno y de la presencia de agua para poder ser almacenada como energía potencial. Por ello, es cada vez más común que se opte por proyectos de almacenamiento energético en baterías de litio.

Este método de almacenamiento en baterías de ion-litio está siendo el más usado por diversos motivos:

- **Optimización económica:** Los propietarios de explotaciones solares fotovoltaicas pueden incrementar la rentabilidad de sus instalaciones almacenando la energía producida en los períodos de máxima generación (generalmente al mediodía) para posteriormente aprovecharla o venderla en los tramos de mayor demanda, como el anochecer, cuando el precio de la electricidad aumenta considerablemente.
- **Evitar restricciones de inyección a la red:** Si la generación de electricidad es elevada en momentos de alta producción y las líneas de evacuación están saturadas, los generadores solares pueden ser obligados a reducir su producción o incluso desconectarse completamente, fenómeno conocido como *curtailment*. Esto provoca períodos de inactividad en los que no se generan ingresos.
- **Participación en servicios de red:** El almacenamiento permite ofrecer servicios adicionales como el aporte de inercia sintética a la red y control dinámico de tensiones, esencial para la estabilidad del sistema.

## Definición del Proyecto

El presente Trabajo de Fin de Grado busca complementar y validar los modelos de pérdidas propuestos en la literatura [1] mediante un enfoque experimental. Específicamente, se pretende:

- Verificar la validez de las ecuaciones propuestas en el estudio base, realizando pruebas experimentales para medir las pérdidas reales durante la carga y descarga de baterías de ion-litio.
- Comparar los resultados experimentales con los modelos teóricos, determinando el grado de ajuste y la necesidad de posibles mejoras en las ecuaciones existentes.
- Proponer ajustes en el modelado de pérdidas, con el objetivo de desarrollar algoritmos más precisos para la gestión de sistemas de almacenamiento energético.
- Este estudio contribuirá a la optimización de la operación de baterías de iones de litio, permitiendo una mejor planificación de su uso en aplicaciones de almacenamiento de energía renovable.

## Descripción del ensayo

En este proyecto se ha realizado un ensayo real en el que se pretende probar diferentes modelos de celdas, con diferentes químicas en el cátodo, para comprobar la veracidad del modelado de las pérdidas instantáneas según la literatura actual y el artículo publicado por el IIT de ICAI [1] . Para ello, se ha construido un banco de ensayos para probar celdas de litio, sometiendo a procesos de carga y descarga, midiendo sus variables eléctricas. Estas variables eléctricas son la tensión en bornas de la celda y la corriente que pasa a través de ella, a través de las cuales también se van a poder estimar otras variables como la potencia o el estado de carga (SoC, del inglés *State of Charge*). Estos experimentos tienen el objetivo de modelar las pérdidas. Mediante la potencia instantánea derivada de las dos magnitudes medidas, se ha realizado una integración de la misma para cuantificar la energía extraída o aportada a la celda durante los periodos de descarga y carga y obtener el balance energético total eléctrico. En paralelo, se han computado también, gracias a las fórmulas de la literatura, las pérdidas instantáneas teóricas de la celda, medida que también se integrará para compararla con las pérdidas totales. Debido a que, en la práctica, y como se explicará en el proyecto, es muy complicado medir las pérdidas instantáneas de una celda y, por tanto, obtener una función de las pérdidas reales, lo que se ha hecho es atajar este problema mediante aproximaciones. Se ha propuesto una metodología experimental para poder validar las pérdidas de la batería tanto en carga como en descarga, pudiendo así comparar las ecuaciones teóricas con la validación experimental.

## Resultados

Los ensayos realizados sobre celdas  $\text{LiFePO}_4$  han permitido cuantificar las pérdidas reales y compararlas con las pérdidas teóricas propuestas en la literatura. Los resultados muestran que las pérdidas aumentan de manera significativa con la corriente de operación y que se concentran principalmente en los extremos del estado de carga (SOC).

En la Figura 1 se observa la histéresis de potencia disipada neta entre carga y descarga para diferentes tasas de corriente. Se aprecia cómo, a medida que aumenta la tasa C, crecen las pérdidas instantáneas y la diferencia entre potencias.

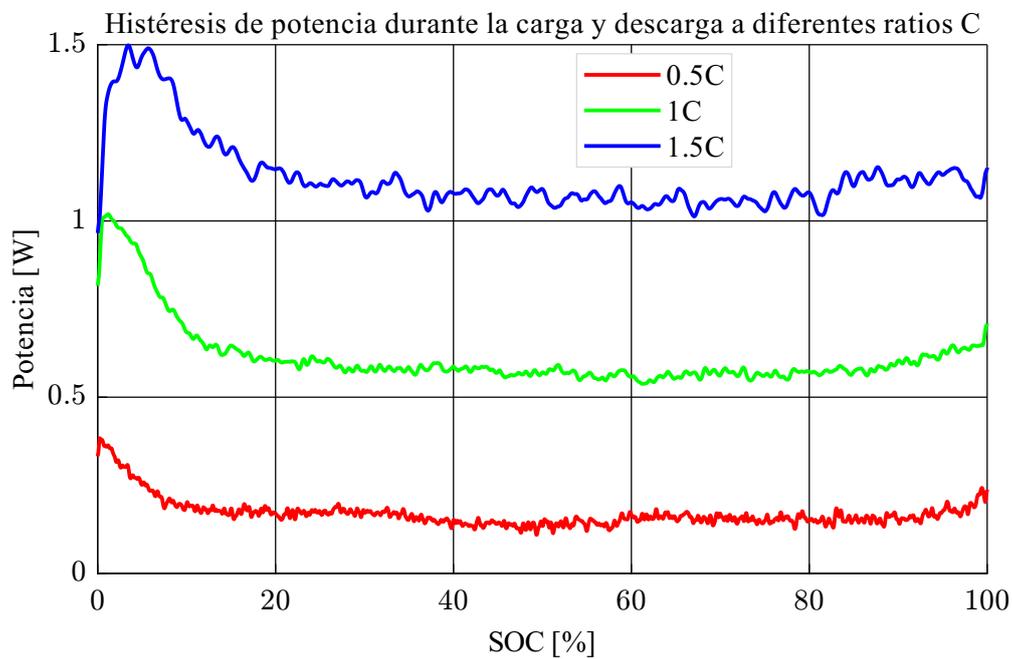


Figura 1. Histéresis de potencia neta disipada en función del SOC para distintas tasas de corriente.

Asimismo, la Figura 2 compara la energía disipada experimentalmente frente a la estimada por el modelo. Aunque la tendencia general es similar, las pérdidas reales resultan siempre superiores a las teóricas, con diferencias que en algunos casos superan el 90%.

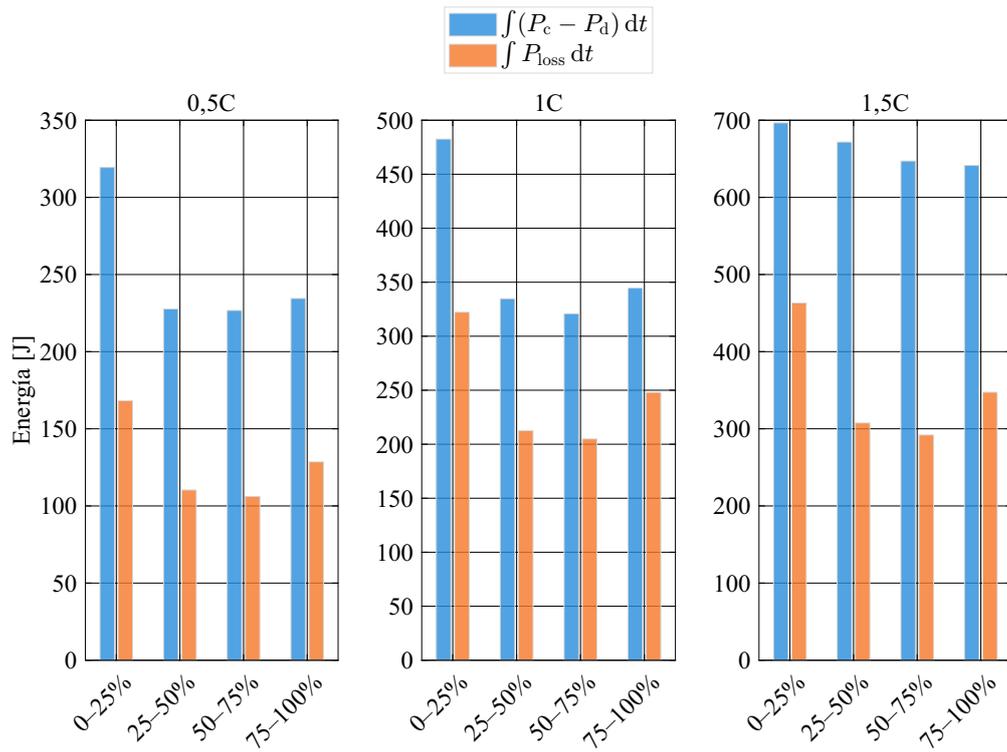


Figura 2. Comparación de la energía disipada real y teórica por tramos de SOC para distintas tasas de corriente.

Por último, la Figura 3 resume el balance global de pérdidas para las tres tasas de corriente, confirmando que las pérdidas reales son sistemáticamente más elevadas.

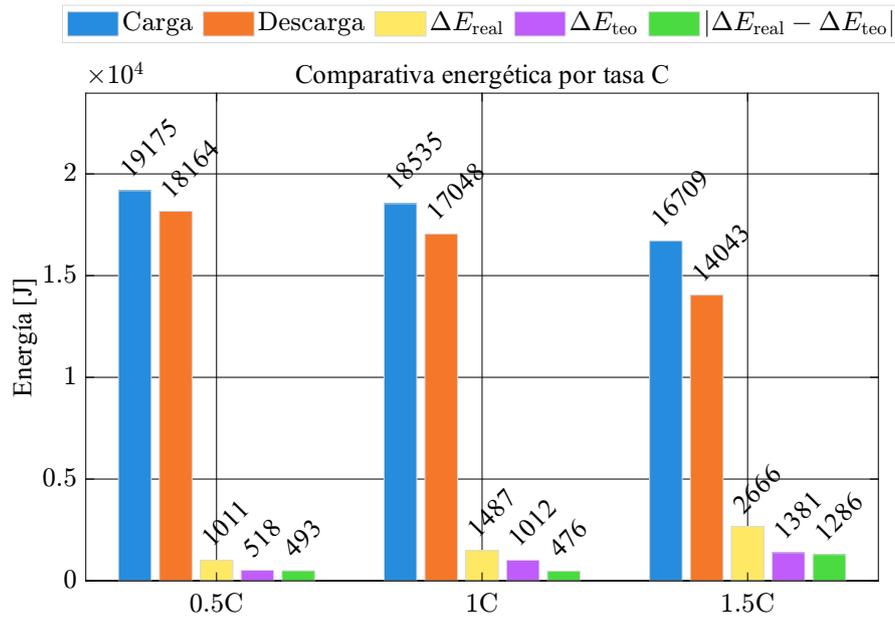


Figura 3. Comparativa de energía disipada total (real vs. teórica) para distintas tasas C.

En paralelo, se ha evaluado el ajuste del modelo de Shepherd. Se ha encontrado que la inclusión del término de corriente filtrada ( $I^*$ ) aumenta el error de ajuste. Eliminando dicho término, el RMSE se reduce en más de un 60 %, como se muestra en la Tabla 1, lo que valida la conveniencia de emplear el modelo simplificado.

Tabla 1: Comparación del error cuadrático medio entre variantes del modelo de Shepherd

Modelo	Incluye corriente filtrada	RMSE
Shepherd básico	No	0,0109
Shepherd con término de corriente filtrada	Sí	0,0336

## Conclusiones

A partir del estudio realizado se pueden extraer las siguientes conclusiones principales:

- Se ha logrado medir y parametrizar una celda de  $\text{LiFePO}_4$ , estableciendo

experimentalmente su comportamiento eléctrico en procesos de carga y descarga.

- Se ha construido y validado un banco de ensayo de celdas de litio, capaz de registrar variables eléctricas y energéticas de forma precisa.
- Las pérdidas energéticas se acentúan en los extremos del SOC, en coherencia con lo predicho por los modelos electroquímicos.
- La introducción del término de corriente filtrada en el modelo de Shepherd empeora el ajuste frente a los datos experimentales, lo que provoca que las pérdidas teóricas no coincidan con las reales.
- La eliminación de dicho término proporciona un mejor ajuste del modelo a la celda real, reduciendo significativamente el error y describiendo con mayor fidelidad el comportamiento observado.

# Referencias

- [1] Javier García-González y Salvador Guerrero. «Optimal Management of a Microgrid Li-Ion Battery Considering Non-Linear Losses Using the Integer Zig-Zag Formulation». En: *Electric Power Systems Research* 235 (oct. de 2024), pág. 110776. ISSN: 03787796. DOI: 10.1016/j.epsr.2024.110776. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877962400662X> (visitado 16-05-2025).

# EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF THE LOSS FUNCTION IN A LITHIUM-ION BATTERY

**Author:** Rodríguez Criado, Javier.

**Supervisor:** García González, Javier.

**Co-Director:** Suárez Porras, Jorge.

**Collaborating Entity:** ICAI

## ABSTRACT

This project aims to experimentally measure the losses that occur in a Li-Ion battery during charging and discharging. The results will be compared with theoretical expressions found in the technical literature. In particular, the formulations proposed in the work of García-González and Guerrero, which model nonlinear losses, will be analyzed

## Keywords

Lithium-ion, Lithium-ion battery, instantaneous losses, nonlinear losses, energy efficiency, charging and discharging, experimental characterization, current sensors, voltage sensors, data acquisition, numerical analysis, experimental validation, loss modeling, energy optimization, battery management, state of charge, state of health, degradation, simulation, microgrids, storage systems, renewable energy, power electronics, linear formulation, electrochemical models.

## Introduction

This project is motivated by the understanding, development, and characterization of electrical energy storage in lithium-ion batteries. This type of storage technology is currently the most popular solution for managing the intermittency of renewable energy generation, while also providing short-circuit power to the grid, among other benefits. The growing need for electrical energy storage is driven by the current shift in the power generation model. This new model, promoted across

Europe, is based on the replacement of traditional power generation with renewable technologies, aiming to achieve net-zero in electricity generation. This means reducing (CO<sub>2</sub>) emissions from electricity generation to zero within a country. To achieve this, renewable generation is used, offering increasingly lower energy prices, zero or near-zero CO<sub>2</sub> emissions, and greater competitiveness, while also enabling easier access for small businesses to participate in energy generation.

However, this rapid transformation of the current energy model and electrical grid systems presents major challenges. Chief among them are the management of generation intermittency—since it depends on changing weather conditions—while also ensuring grid stability and supplying short-circuit power. Currently, this relies on large synchronous generators connected to the grid and on pumped-storage plants for large-scale energy storage. Nevertheless, the energy mix is increasingly shifting toward a generation model with a higher share of renewables, and synchronous generation is playing a progressively smaller role. Moreover, pumped-storage plants are geographically limited, as they depend on the availability of terrain and water to store energy as gravitational potential. Therefore, lithium battery energy storage projects are becoming more common.

This lithium-ion battery storage method is becoming the most widely used for several reasons:

- **Economic optimization:** Owners of photovoltaic solar installations can increase the profitability of their systems by storing the energy produced during peak generation periods (usually at midday) to later use it to meet their own energy demand or simply sell it during high-demand periods, such as in the evening, when electricity prices rise significantly.
- **Avoiding grid injection restrictions:** If electricity generation is high during times of peak production and the evacuation lines are saturated, solar generators may be forced to reduce their output or even completely disconnect—a phenomenon known in English as curtailment. This results in periods of inactivity and lost revenue.
- **Participation in grid services:** Participation in grid services: Storage enables the provision of additional services such as increasing short-circuit power—essential for system stability—as well as controlling the flow of active and reactive power.

## Project definition

This Bachelor's Thesis aims to complement and validate the loss models proposed in the literature [1] through an experimental approach. Specifically, the objectives are:

- To verify the validity of the equations proposed in the reference study by conducting experimental tests to measure the actual losses during the charging and discharging of lithium-ion batteries..
- To compare the experimental results with the theoretical models, determining the degree of fit and the potential need for improvements in the existing equations.
- To propose adjustments or refinements to the loss modelling, with the goal of developing more accurate algorithms for the management of energy storage systems.
- This study will contribute to the optimization of lithium-ion battery operation, enabling better planning of their use in renewable energy storage applications and microgrid systems.

## Test description

In this project, a real test has been carried out in which different cell models, with different cathode chemistries, are going to be tested in order to verify the accuracy of the modeling of instantaneous losses according to the current literature and the paper published by the IIT of ICAI. For this purpose, a test bench has been built to test lithium cells, in which they have been subjected to charging and discharging while carefully measuring their electrical variables. These electrical variables are the terminal voltage of the cell and the current passing through it, from which other variables such as power or SoC can also be estimated. A series of charge and discharge cycles have been carried out on the cell to model the losses. These cycles start and end at the same SoC point.

Using the instantaneous power derived from the two measured magnitudes, an integration has been performed to quantify the energy extracted from or supplied to the cell during the discharge and charge periods, obtaining the total electrical energy balance. In parallel, the theoretical instantaneous losses of the cell have

also been computed using formulas from the literature. This value has also been integrated to compare it with the total losses.

Since it is very difficult to measure the instantaneous losses of a cell and therefore to obtain a real loss function, the problem has been approached through approximations. The real instantaneous loss function, which is unknown, should yield through its integration over time the energy balance of delivered/absorbed energy. This result will be compared with the integral of the theoretical loss function. As there are infinite functions whose integral over time may be identical, to verify whether these two functions are the same, the value of their integral will be compared in segments over time and following different paths. In this way, we will be able to affirm that the real loss function closely resembles the theoretical one. For this reason, cells have been tested at different current levels across different SoC intervals.

## Results

The experiments carried out on  $\text{LiFePO}_4$  cells have allowed the quantification of real losses and their comparison with the theoretical losses proposed in the literature. The results show that losses increase significantly with the operating current and are mainly concentrated at the extremes of the state of charge (SOC).

Figure 4 shows the hysteresis of net dissipated power between charge and discharge for different current rates. It can be observed that as the C-rate increases, instantaneous losses and the power difference both grow.

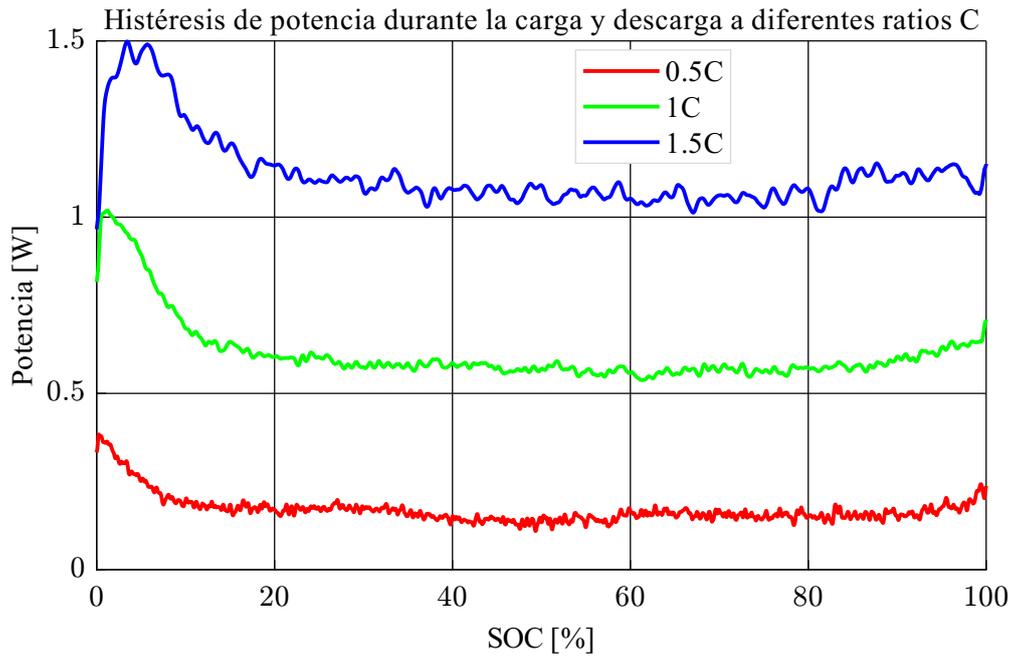


Figura 4. Hysteresis of net dissipated power as a function of SOC for different current rates.

Similarly, Figure 5 compares the experimentally dissipated energy with the energy estimated by the model. Although the general trend is similar, real losses are always higher than theoretical ones, with differences that in some cases exceed 90 %.

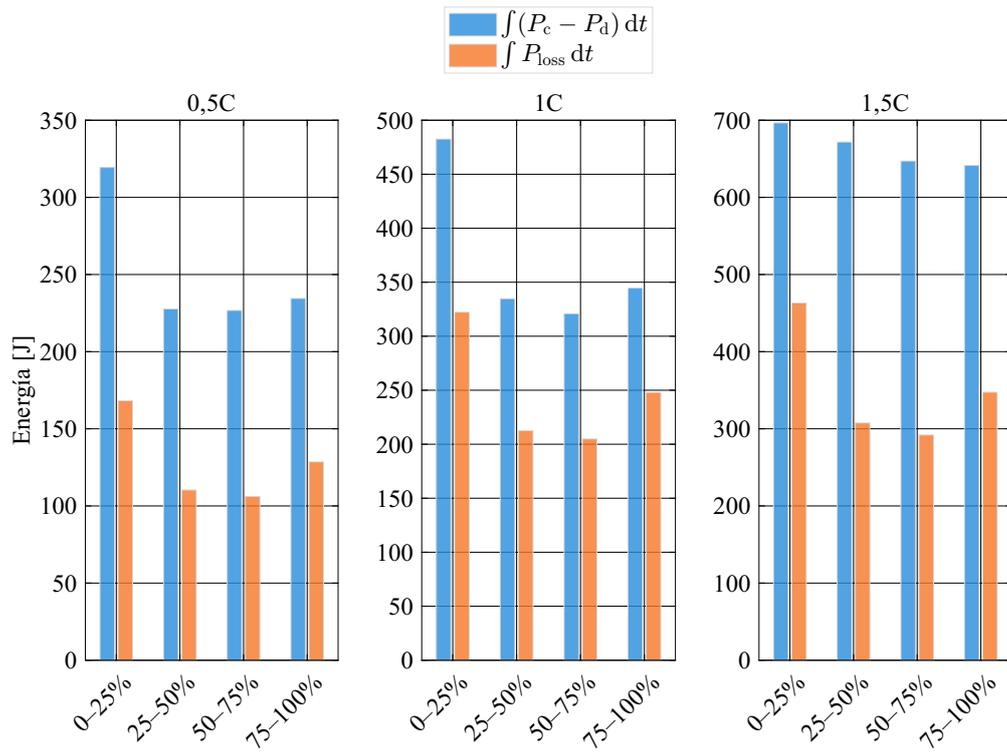


Figura 5. Comparison of real and theoretical dissipated energy by SOC segments for different C-rates.

Finally, Figure 6 summarizes the global balance of losses for the three current rates, confirming that real losses are systematically higher.

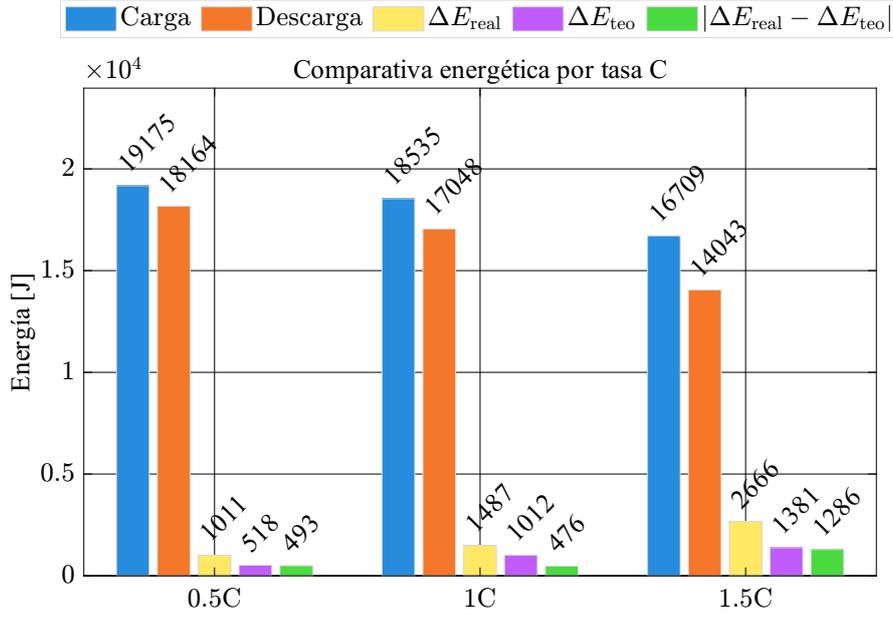


Figura 6. Comparison of total dissipated energy (real vs. theoretical) for different C-rates.

In parallel, the fit of the Shepherd model was evaluated. It was found that the inclusion of the filtered current term ( $I^*$ ) increases the fitting error. By removing this term, the RMSE is reduced by more than 60 %, as shown in Table 2, which validates the convenience of using the simplified model.

Tabla 2: Comparison of root mean square error between Shepherd model variants

Model	Includes filtered current	RMSE
Basic Shepherd	No	0,0109
Shepherd with filtered current term	Yes	0,0336

## Conclusions

From the study carried out, the following main conclusions can be drawn:

- A LiFePO<sub>4</sub> cell has been successfully measured and parameterized, experimentally establishing its electrical behavior during charge and discharge processes.

- A lithium cell test bench has been built and validated, capable of accurately recording electrical and energetic variables.
- Energy losses are accentuated at the extremes of the SOC, in line with electrochemical model predictions.
- The introduction of the filtered current term in the Shepherd model worsens the fit against experimental data, causing theoretical losses not to match the real ones.
- Eliminating this term provides a better fit of the model to the real cell, significantly reducing the error and describing the observed behavior more faithfully.

# References

- [1] Javier García-González y Salvador Guerrero. «Optimal Management of a Microgrid Li-Ion Battery Considering Non-Linear Losses Using the Integer Zig-Zag Formulation». En: *Electric Power Systems Research* 235 (oct. de 2024), pág. 110776. ISSN: 03787796. DOI: 10.1016/j.epsr.2024.110776. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877962400662X> (visitado 16-05-2025).

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación del proyecto . . . . .	1
1.2. Antecedentes . . . . .	4
1.3. Objetivos . . . . .	4
1.4. Organización . . . . .	5
<b>2. Estado de la cuestión</b>	<b>6</b>
2.1. Tipos de baterías recargables . . . . .	6
2.2. Tipos y partes de una celda de ion-litio . . . . .	9
2.2.1. Ánodo . . . . .	11
2.2.2. Cátodo . . . . .	12
2.2.3. Separador . . . . .	15
2.2.4. Electrolito . . . . .	16
2.3. Pérdidas energéticas dentro de una celda de litio . . . . .	18
2.3.1. Perdidas por efecto Joule . . . . .	18
2.3.2. Perdidas por resistencia de polarización . . . . .	19
2.3.3. Irreversibilidades y aumento de entropía interna . . . . .	20
2.4. Modelo de Thévenin y sus ecuaciones . . . . .	22
2.5. Modelo Shepherd para baterías de Litio . . . . .	25
2.6. Estado de carga o Soc . . . . .	29

2.7. Modelado de las pérdidas instantáneas . . . . .	31
<b>3. Metodología</b>	<b>33</b>
3.1. Variables necesarias a medir para los ensayos . . . . .	34
3.2. Diseño del circuito eléctrico para el ensayo de celdas de ion-litio . . .	35
<b>4. Desarrollo y prototipo</b>	<b>40</b>
4.1. Selección del microcontrolador y sistema de adquisición de datos . . .	40
4.2. Elección de los sensores de corriente y de tensión . . . . .	43
4.2.1. Sensor de corriente: Infineon TLI4970-D050T4 . . . . .	43
4.2.2. Sensor de tensión: módulo ADC de 16 bits I2C . . . . .	44
4.3. Conexión de los componentes a la placa controladora . . . . .	46
4.4. Programación de la placa controladora . . . . .	52
4.4.1. Estructura general del código . . . . .	52
4.4.2. Adquisición de variables eléctricas . . . . .	52
4.4.3. Transmisión de datos y supervisión . . . . .	53
4.4.4. Control de seguridad . . . . .	53
4.5. Montaje final . . . . .	53
4.6. Monitorización durante el experimento . . . . .	55
<b>5. Ensayos</b>	<b>58</b>
5.1. Ensayo de carga y descarga profunda . . . . .	58
5.2. Capacidad acumulada durante la carga y descarga . . . . .	62
5.3. Caracterización de los parámetros de la celda . . . . .	65
5.4. Ensayos de carga y descarga a distintos tramos del SoC . . . . .	71
5.4.1. Descarga y carga simétrica a 0,5C . . . . .	73
<b>6. Resultados y Conclusiones</b>	<b>77</b>

6.1. Gráficas finales a corrientes de descarga constantes . . . . .	77
6.2. Modelo Shepherd con término de intensidad filtrada . . . . .	82
<b>7. Trabajos futuros</b>	<b>85</b>
<b>8. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible</b>	<b>86</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>88</b>

# Índice de figuras

1.	Histéresis de potencia neta disipada en función del SOC para distintas tasas de corriente. . . . .	V
2.	Comparación de la energía disipada real y teórica por tramos de SOC para distintas tasas de corriente. . . . .	VI
3.	Comparativa de energía disipada total (real vs. teórica) para distintas tasas C. . . . .	VII
4.	Hysteresis of net dissipated power as a function of SOC for different current rates. . . . .	V
5.	Comparison of real and theoretical dissipated energy by SOC segments for different C-rates. . . . .	VI
6.	Comparison of total dissipated energy (real vs. theoretical) for different C-rates. . . . .	VII
1.1.	Cambio del modelo eléctrico hacia uno basado en energías renovables [1] . . . . .	2
2.1.	Batería de plomo-ácido [6] . . . . .	7
2.2.	Batería de níquel-hidruro metálico [7] . . . . .	8
2.3.	Batería de níquel-hidruro metálico [8] . . . . .	8
2.4.	Baterías de ion de litio [9] . . . . .	9
2.5.	Componentes principales de una celda de litio [10] . . . . .	10
2.6.	Intercalado de los átomos de litio entre las capas de grafito en el ánodo [11] . . . . .	11
2.7.	Estructura de diamante del material $LiMn_2O_4$ [12] . . . . .	13

2.8. Batería dañada, debido a la liberación de gases del cátodo [13]. . . . .	14
2.9. Thermal runaway de una batería de ion-litio por liberación de calor en la descomposición gaseosa del cátodo en la que además se generan gases inflamables y auto alimentados de oxígeno [14]. . . . .	15
2.10. Separador de una celda de litio [15] . . . . .	16
2.11. Electrolito y su función en la celda de litio [17] . . . . .	17
2.12. Visualización de la capa SEI en la interfase del material activo al electrolito [18] . . . . .	19
2.13. Esquema equivalente del modelo de Thévenin de una celda [22] . . . . .	22
2.14. Modelo de Thévenin para una sola resistencia interna serie. . . . .	23
2.15. Modelo de Thévenin con una rama RC . . . . .	24
2.16. Obtención empírica de los parámetros de la celda para el modelo Shepherd [23] . . . . .	26
2.17. Curva de descarga típica de una celda de ion-litio [26]. . . . .	29
2.18. Relación entre el SoC, la tensión en circuito abierto (OCV) y la tensión bajo carga para un modelo específico de batería [27]. . . . .	31
3.1. Testador de celdas Arbin [28]. . . . .	33
3.2. Esquema eléctrico elegido para el proyecto mediante el cual se obtendrán los datos necesarios de las variables eléctricas y además contara con un relé que abrirá el circuito cuando lo requiera el ensayo o por seguridad . . . . .	36
3.3. Caja de aluminio con borneas donde se aloja la celda en el interior . . . . .	36
3.4. Fuente de tensión empleada para la carga y descarga controlada de la celda a corriente constante funcionando en modo control de corriente [29] . . . . .	37
3.5. Esquema eléctrico para la carga a corriente continua usando la fuente de tensión del laboratorio en modo control de corriente constante. . . . .	37
3.6. Esquema para la descarga de la celda a corriente constante mediante una fuente de tensión en modo control de corriente que aporta el voltaje necesario para que la suma de $V_{celda}$ y $V_{fuente}$ sea constante en todo momento . . . . .	39

3.7. Circuito eléctrico completo para la carga y descarga constante con fuentes de tensión del laboratorio usadas en modo fuentes de corriente y con resistencia disipadora . . . . .	39
4.1. Configuración del ensayo a realizar . . . . .	40
4.2. Placa Arduino Uno R3 utilizada como unidad de control y adquisición del sistema [30] . . . . .	42
4.3. Placa STM32 “Blue Pill”, alternativa considerada para el sistema [31] . . . . .	42
4.4. Sensor de corriente elegido para los ensayos Infineon TLI4970 con la placa de desarrollo S2GOCURSENSETLI4970TOBO1 [32] . . . . .	44
4.5. Módulo ADC de 16 bits Gravity I2C utilizado para la adquisición de la tensión de la celda [33] . . . . .	45
4.6. Conexión del sensor de corriente TLI4970 al microcontrolador Arduino Uno, incluyendo los divisores de tensión en las líneas SCK y CS para la adaptación de niveles lógicos. . . . .	48
4.7. Distribución de pines de la placa Arduino Uno utilizada en el sistema [34] . . . . .	49
4.8. Esquema de conexión del sistema durante el proceso de carga. Se observa la conexión de la fuente de tensión, el relé de control, los sensores de medida y su interfaz con la placa Arduino. . . . .	50
4.9. Esquema de conexión del sistema durante el proceso de descarga. Se observa la conexión de la fuente de tensión, el relé de control, los sensores de medida y su interfaz con la placa Arduino. . . . .	51
4.10. Vista general del sistema de adquisición montado con el Arduino Uno y sensores conectados . . . . .	54
4.11. Detalle del conexión entre la placa controladora y los sensores de corriente y tensión . . . . .	55
4.12. Interfaz de Matlab <sup>®</sup> utilizada para la adquisición y monitorización en tiempo real del experimento . . . . .	56
5.1. Curva de tensión registrada durante una descarga profunda de la celda $LiFePO_4$ . Se aprecia la evolución característica de la tensión conforme el estado de carga (SoC) disminuye y la duración del ensayo a distintos ratios de descarga C. . . . .	59

5.2.	Curva de tensión registrada durante una carga profunda de la celda $LiFePO_4$ a distintos ratios de carga $C$ . Se aprecia la evolución característica de la tensión conforme el estado de carga (SoC) aumenta. La meseta central es indicativa del comportamiento típico de esta química. . . . .	60
5.3.	Capacidad acumulada durante las descargas realizadas a distintas tasas de corriente. Se observa una ligera reducción de la capacidad efectiva conforme aumenta la corriente, atribuible a la caída de tensión interna y a los efectos de polarización. . . . .	63
5.4.	Capacidad acumulada durante los procesos de carga realizados a distintas tasas de corriente. La linealidad de las curvas y la coincidencia en los valores finales validan la fiabilidad del procedimiento de integración. . . . .	64
5.5.	Ajuste del modelo de Shepherd con término exponencial para cada una de las curvas de descarga individualmente. Se observa una buena concordancia entre la tensión medida y la estimada para todos los regímenes de corriente. . . . .	66
5.6.	Descomposición de los términos que forman el modelo de Shepherd ajustado individualmente. Se representa la contribución de los términos de (5.3) a la tensión $V_{bat}(t)$ de la celda a lo largo del tiempo. . . . .	68
5.7.	Comparación entre el voltaje medido experimentalmente y el voltaje estimado mediante el modelo Shepherd ajustado globalmente a los tres datasets de descarga a diferentes corrientes (0.5 C, 1 C y 1.5 C). . . . .	69
5.8.	Descomposición de los términos que conforman el modelo Shepherd para cada dataset de descarga. Se visualiza la contribución de la resistencia interna, la dependencia con la capacidad residual, y el término exponencial asociado a la dinámica transitoria, evidenciando su impacto diferencial en la tensión estimada. . . . .	70
5.9.	Dos funciones exponenciales con misma integral total . . . . .	72
5.10.	Potencia real durante carga y descarga, y su diferencia a lo largo del SoC . . . . .	73
5.11.	Potencia de pérdidas teóricas durante carga y descarga del modelo. El área en rojo representa los julios perdidos durante la descarga y el área en azul representa los julios perdidos durante la carga . . . . .	74

5.12. Comparación de las pérdidas energéticas reales y teóricas por tramos del SoC a una tasa de descarga de 0,5C. En azul se representa la energía disipada real, obtenida como la diferencia entre las áreas bajo las curvas de potencia absorbida durante la carga y la descarga. En amarillo se muestra la energía disipada teóricamente, calculada mediante la integración de la función de pérdidas instantáneas del modelo. . . . .	76
6.1. Curvas de potencia disipada neta ( $P_{\text{carga}} - P_{\text{descarga}}$ ) en función del SOC, para distintos C 0,5C, 1C y 1,5C. A mayor tasa de corriente, mayor es la histéresis de potencia debida a pérdidas internas. . . . .	78
6.2. Suma teórica de las potencias de pérdida ( $P_{\text{loss}}^{\text{carga}} + P_{\text{loss}}^{\text{descarga}}$ ) para distintas tasas de corriente a cada tramo del SoC. . . . .	79
6.3. Comparación de la energía disipada por tramos del SOC para distintos C-rates. En azul se representa la energía disipada real (potencia neta), y en amarillo la energía teórica estimada mediante el modelo. . . . .	80
6.4. Comparativa de energía disipada por tasa C. Se muestran las pérdidas reales y teóricas, así como la diferencia entre ambas. . . . .	81
6.5. Modelo de Shepherd ajustado a tres curvas de descarga con diferentes tasas C. Se observa que, en descargas a 0,5C y 1,5C, el desajuste causado por el parámetro $I^*$ es más acusado, evidenciando que este término distorsiona el ajuste de los parámetros del modelo. . . . .	83
6.6. Ajuste del modelo de Shepherd sin el término $I^*$ , en el que se aprecia una mayor precisión en la estimación de los parámetros. . . . .	84

# Índice de tablas

1.	Comparación del error cuadrático medio entre variantes del modelo de Shepherd . . . . .	VII
2.	Comparison of root mean square error between Shepherd model variants . . . . .	VII
2.1.	Comparativa de los principales tipos de baterías recargables . . . . .	9
2.2.	Principales composiciones de cátodo y densidades energéticas en baterías de ion-litio . . . . .	10
5.1.	Corrientes aplicadas durante los ensayos en función de la tasa C, para celdas $LIFEPO_4$ con capacidad nominal de 1500 mAh. . . . .	59
5.2.	Parámetros del modelo de Shepherd ajustados para cada curva de descarga. . . . .	67
5.3.	Parámetros del modelo de Shepherd ajustados de forma global para los tres regímenes de descarga. . . . .	69
6.1.	Pérdidas reales vs. teóricas y porcentaje de error. . . . .	82
6.2.	Comparación del error cuadrático medio entre variantes del modelo de Shepherd . . . . .	84

# Acrónimos

<i>SoC</i>	State of Charge / Estado de carga.
<i>SoH</i>	State of Health.
<i>OCV</i>	Open Circuit Voltage / Voltaje de circuito abierto.
<i>BMS</i>	Battery Management System / Sistema de gestión de baterías.
<i>SPI</i>	Serial Peripheral Interface / Interfaz periférica en serie.
<i>MOSI</i>	Master Out Slave In.
<i>MISO</i>	Master In Slave Out.
<i>SCK</i>	Serial Clock.
<i>CS</i>	Chip Select.

# 1 Introducción

## 1.1. Motivación del proyecto

Este proyecto surge gracias al cambio de modelo energético que está experimentando Europa y el mundo entero recientemente. Desde la prehistoria, el ser humano ha necesitado de fuentes de energía para abastecerse de calor, luz o poder cocinar alimentos. Esta necesidad energética experimenta un cambio drástico a partir de la revolución industrial, donde el consumo se dispara de forma exponencial, haciendo vital el abastecimiento de energía primaria para el funcionamiento de los países modernos. Hasta hace unos siglos, el ser humano ha cubierto sus necesidades con fuentes de energía primaria como la madera y el carbón. No obstante, conforme la tecnología iba avanzando y la necesidad energética fue mayor, se empezó a emplear otras fuentes como el petróleo y el gas, fuentes de energía clave para alimentar las modernas redes eléctricas que crecían en Europa ya por el siglo XX.

Estas redes eléctricas fueron una revolución para la vida moderna ya que permitían alimentar fábricas y procesos de manera más sencilla, segura y económicamente. Con el nacimiento de la industria moderna y las redes eléctricas modernas, el sector energético es clave para la supervivencia y desarrollo de un país. No obstante, conforme la demanda energética crece surge una cierta preocupación sobre las fuentes primarias con las que nos abastecemos. Los combustibles fósiles quemados en las centrales eléctricas convencionales, como las de carbón, gasoil o ciclos combinados, emiten un gas con un efecto secundario sobre el planeta Tierra. El  $\text{CO}_2$  resultante de la quema de hidrocarburos comienza a ser un problema y supone una amenaza para la vida en la Tierra ya que este gas, emitido en más a la atmósfera, tiene el potencial de subir la temperatura terrestre, conocido como el efecto invernadero, en el cual la radiación solar que incide sobre la Tierra y es reflejada de nuevo al espacio exterior, es reflejada de vuelta a la Tierra, aumentando la cantidad de energía incidente sobre la Tierra. En los tiempos actuales existen ya organizaciones a nivel mundial que trabajan por reducir al máximo las emisiones de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, proponiendo soluciones y fuentes de energía alternativas.

Con objetivo de abordar esta problemática, surgen las fuentes de energía primaria renovables, que son aquellas de las que se dispone de forma ilimitada ya que o bien provienen directamente del sol o pueden regenerarse en un periodo de tiempo aceptablemente corto. El objetivo europeo actual es conseguir el “Net Zero”, que consiste en tener un balance entre el  $\text{CO}_2$  emitido y el absorbido. Para ello,

una de las mejores formas de reducir el uso de combustibles fósiles es mediante la electrificación de todos los procesos que antes necesitaban de ellos y, a su vez, generar electricidad con fuentes de energía renovable.

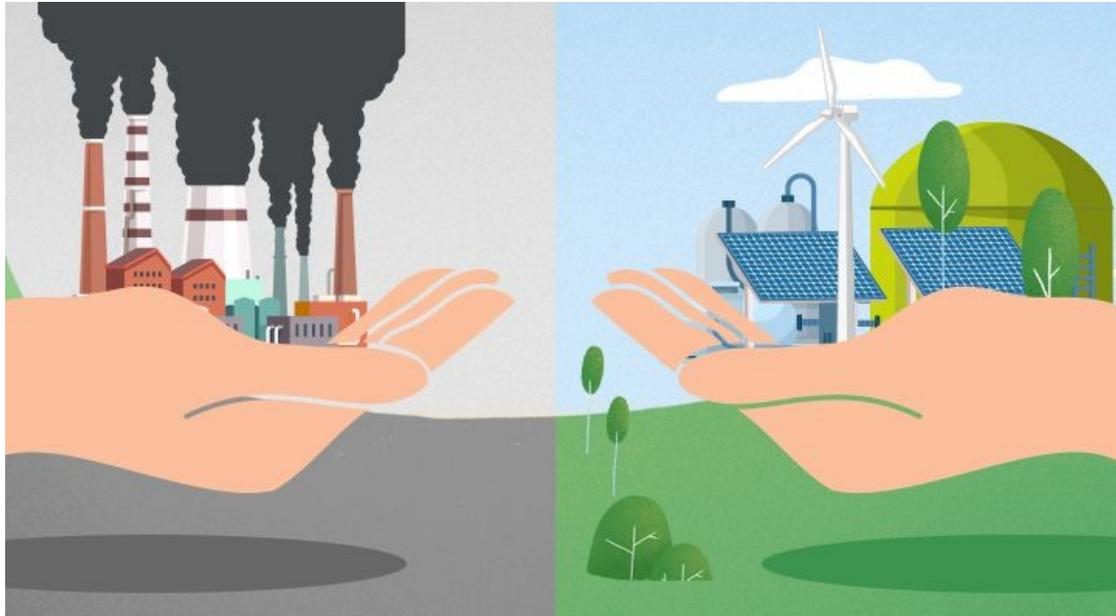


Figura 1.1. Cambio del modelo eléctrico hacia uno basado en energías renovables [1]

Es aquí donde surge la motivación de este proyecto, que pretende aportar a esta transición energética para la sustitución de la totalidad de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la red eléctrica mediante la implementación de fuentes renovables entre las que destacan la energía eólica, con aerogeneradores onshore y offshore, y la energía solar, tanto en su forma térmica, de menor presencia, como en la fotovoltaica, que ha experimentado un crecimiento exponencial en España en los últimos años. El aumento sustancial de la generación renovable hace indispensable el desarrollo de tecnologías de almacenamiento eléctrico, ya que su producción depende de factores climáticos no controlables, lo que puede generar tanto excesos, como déficit de generación.

Para solucionar esta intermitencia de generación, se han desarrollado diversas tecnologías de almacenamiento energético. El bombeo hidroeléctrico es el método más utilizado, pues permite almacenar grandes cantidades de energía con alta eficiencia mediante el desplazamiento de agua entre embalses a diferentes alturas. Estas instalaciones aprovechan las horas de alta generación renovable, cuando el precio de la energía cae significativamente, para bombear agua a cotas superiores y posteriormente turbinarla en períodos donde el precio es mayor, es decir, en perio-

dos nocturnos o de alta demanda. Sin embargo, su implementación está limitada por la geografía y, en la actualidad, en España quedan pocos lugares donde se pueda instalar más capacidad de almacenamiento.

Existen también otros métodos de almacenamiento masivo energético como la presurización de aire comprimido en cavidades subterráneas que siguen una dinámica muy parecida a la de las centrales de bombeo, pero con un menor rendimiento y muy limitadas también a la geografía, por lo que no han tenido tanto éxito. Por otro lado, se están desarrollando modernos sistemas de electrolizadores que pretenden convertir la energía eléctrica en hidrógeno para ser usado como vector energético o para ser empleado en la industria, gran consumidora de este gas que actualmente es obtenido mediante el reformado del metano, proceso que como resultado emite CO<sub>2</sub>. No obstante, la baja eficiencia de este proceso y los desafíos técnicos y económicos de los electrolizadores, que son una tecnología no madura, han hecho que no sea un método de almacenamiento con presencia significativa. También hay otros métodos minoritarios para el almacenamiento energético, pero debido a su alto coste y compleja operación los hace una tecnología poco viable para la integración de la generación renovable intermitente en el sistema eléctrico.

Ante estas limitaciones, se han impulsado alternativas como las baterías de ion-litio, que destacan por su alta densidad energética, las cuales permiten almacenamiento energético en un espacio reducido sin depender de la geografía del terreno y, además, entregando una rápida respuesta a demandas repentinas, al igual que permiten una excelente regulación del sistema eléctrico, ya que los convertidores CC-CA que las conectan con la red eléctrica permiten regular las variables eléctricas del nudo al que se conectan, pudiendo realizar regulación de frecuencia ante *mismatches* (desequilibrios) entre potencia generada o demandada o mediante el consumo o generación de reactiva para regular la tensión en los nudos.

Estas últimas características de las celdas de ion-litio están popularizando el uso de este tipo de tecnología en cada vez más parques de generación fotovoltaica. Ya que los propietarios de estas instalaciones reciben los siguientes beneficios:

- **Optimización económica:** Los propietarios de explotaciones solares fotovoltaicas pueden incrementar la rentabilidad de sus instalaciones almacenando la energía producida en los períodos de máxima generación (generalmente al mediodía) para posteriormente aprovecharla en sus instalaciones demandantes de energía eléctrica o simplemente venderla en los tramos de mayor demanda, como el anochecer, cuando el precio de la electricidad aumenta considerablemente.
- **Evitar restricciones de inyección a la red:** Si la generación de electri-

cidad es elevada en momentos de alta producción y las líneas de evacuación están saturadas, los generadores solares pueden ser obligados a reducir su producción o incluso desconectarse completamente, fenómeno conocido como curtailment, en inglés. Esto provoca o bien períodos de inactividad en los que no se generan ingresos o una reducción de la potencia generada desaprovechando la capacidad de la instalación. Durante estos periodos de tiempo los excedentes que no pueden ser inyectados en la red pueden ser almacenado para posteriormente ser inyectado a la red en aquellos periodos en los que no están saturadas las líneas de evacuación o la energía esta mas cara.

- **Participación en servicios de red:** El almacenamiento permite ofrecer servicios adicionales como el control de flujos de potencia activa y reactiva ademas de poder regular tensión y frecuencia.

Por estos motivos, el papel de la celdas de litio es cada vez mayor ya que permiten una descarbonización del sistema eléctrico gracias a la integración de generación intermitente como las renovables, cada vez más presentes en nuestro sistema eléctrico y que requieren de una adaptación de las instalaciones actuales a este nuevo modelo energético de generación.

## 1.2. Antecedentes

El modelado matemático de los sistemas de batería de ión litio se hace imprescindible para su estudio en redes eléctricas.

Numerosos estudios han tratado de modelar las pérdidas en baterías mediante enfoques lineales y no lineales, en un intento por representar con mayor precisión los fenómenos internos que afectan al rendimiento y la eficiencia de los sistemas de almacenamiento energético. Estos modelos buscan optimizar el diseño, la operación y la vida útil de las baterías.

## 1.3. Objetivos

El objetivo de este proyecto es crear un banco de ensayos para probar celdas de litio y, posteriormente, analizar su función de pérdidas instantáneas. Para ello, el banco de ensayos debe ser capaz de cargar y descargar la celda de forma constante. Además, debe ser capaz de medir con precisión la corriente y la tensión de la celda, con el fin de estimar variables como la potencia instantánea y la energía total

entregada, así como otras variables derivadas de la corriente y la tensión, como el estado de carga (SoC, del inglés *State of Charge*).

Todos estos datos deben poder registrarse para su posterior tratamiento en MATLAB, además de mostrarse en tiempo real durante el experimento, con el objetivo de comprobar en todo momento que la celda opera dentro de unos rangos seguros de funcionamiento. Posteriormente, se analizarán varias gráficas de carga y descarga de las celdas a corriente constante en diferentes tramos del SoC, con el fin de validar las ecuaciones de pérdidas instantáneas presentes en la literatura actual.

## 1.4. Organización

Este proyecto está organizado en 3 etapas:

- Descripción del modelo de baterías de litio, funcionamiento, estado del arte, elementos internos de la celda que provocan pérdidas eléctricas y literatura sobre este tipo de elementos de almacenamiento energético.
- Diseño del banco de ensayos, requisitos, hardware y seguridad. Además, se estudiará como obtener y tratar los datos para realizar el estudio y la caracterización de la función de pérdidas.
- Realización de los ensayos, obtención de conclusiones, alcance del proyecto y futuras ampliaciones del estudio

## 2 Estado de la cuestión

Las baterías son dispositivos electroquímicos que permiten almacenar energía eléctrica en forma de energía química. Su funcionamiento se basa en reacciones redox (reducción-oxidación) que facilitan la conversión reversible o irreversible entre ambas formas de energía. La historia de las baterías comienza a finales del siglo XVIII, cuando en 1799 Alessandro Volta inventó la primera batería eléctrica, conocida como la pila voltaica [2]. Este invento marcó un hito al ser el primer dispositivo capaz de generar una corriente eléctrica continua mediante reacciones químicas controladas.

Desde entonces, el desarrollo de las baterías ha evolucionado significativamente, dando lugar a distintos tipos según los materiales y configuraciones internas. Estas diferencias químicas definen el comportamiento y las características eléctricas de cada batería, adaptándose a una amplia variedad de usos y aplicaciones.

Actualmente, las baterías se utilizan como fuentes de alimentación autónoma en numerosos dispositivos, desde pequeños aparatos portátiles hasta grandes vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento estacionarios. Además, en los últimos años, las baterías están cobrando un papel fundamental en la integración y estabilización de las redes eléctricas, especialmente en sistemas de energía renovable. En España, proyectos como la batería de almacenamiento conectada a la red de Endesa en Mallorca o el sistema de baterías de Iberdrola en la central solar de Núñez de Balboa [3] ejemplifican cómo el almacenamiento energético se está incorporando para mejorar la gestión de la demanda, la estabilidad de la red y la integración de energías renovables. En el caso de Mallorca, Endesa ha desplegado una batería de flujo redox de vanadio de 1,1 MW y 5,5 MWh, la mayor de su tipo en Europa, conectada a la planta solar Son Orlandis para proporcionar almacenamiento de larga duración y mejorar la flexibilidad de la red [4].

### 2.1. Tipos de baterías recargables

Las baterías recargables han evolucionado significativamente en las últimas décadas, dando lugar a múltiples tecnologías, cada una con sus características particulares. Se describen dos grandes grupos: baterías primarias y secundarias. Las baterías primarias son aquellas que, debido a su composición, no pueden ser recargadas, y las baterías secundarias son aquellas que pueden ser recargadas tantas

veces como su ciclo de vida lo permita. Dentro de la industria, las baterías más utilizadas son las secundarias, aquellas que se pueden recargar, y a continuación se describen las más relevantes [5]:

- **Baterías de plomo-ácido:** Esta tecnología, la más antigua y comercialmente extendida, se caracteriza por su bajo coste y capacidad para entregar altas corrientes, lo que las hace idóneas para aplicaciones de arranque e iluminación en vehículos. Sin embargo, presentan una baja densidad energética, peso elevado y una vida útil limitada debido a la sulfatación y degradación del electrolito.



Figura 2.1. Batería de plomo-ácido [6]

- **Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd):** Fueron utilizadas ampliamente en el pasado por su robustez y capacidad para soportar descargas profundas y amplios rangos de temperatura. Su principal inconveniente es el efecto memoria, que reduce su capacidad útil tras repetidos ciclos de carga y descarga, además del elevado impacto ambiental derivado de la toxicidad del cadmio, lo que ha limitado su uso en la actualidad.



Figura 2.2. Batería de níquel-hidruro metálico [7]

- **Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH):** Estas baterías mejoran la densidad energética respecto a las Ni-Cd y presentan menor toxicidad. Han encontrado aplicación en electrónica portátil y vehículos híbridos, aunque presentan mayor autodescarga y degradación en comparación con tecnologías más modernas.



Figura 2.3. Batería de níquel-hidruro metálico [8]

- **Baterías de ion de litio (Li-ion):** Actualmente son la tecnología más extendida debido a su alta densidad energética, bajo peso y alta eficiencia en ciclos de carga y descarga. Existen variantes según la composición química del cátodo, como NMC (níquel-manganeso-cobalto), LFP (litio-fosfato de hierro) y NCA (níquel-cobalto-aluminio), que permiten optimizar aspectos como la seguridad, vida útil, coste y rendimiento según la aplicación específica.



Figura 2.4. Baterías de ion de litio [9]

La Tabla 2.1 muestra una comparativa entre los principales tipos de baterías secundarias en términos de densidad energética, ciclos de carga y descarga y eficiencia.

Tabla 2.1: Comparativa de los principales tipos de baterías recargables

Tipo	Energía (Wh/kg)	Ciclos	Eficiencia (%)
Plomo-ácido	30–50	500–1000	70–85
Ni-Cd	45–80	1000–2000	70–90
Ni-MH	60–120	500–1000	65–75
Li-ion	150–250	1000–3000	90–99

## 2.2. Tipos y partes de una celda de ion-litio

A pesar de la existencia de diversas químicas en las baterías de ion-litio, las principales diferencias entre ellas radican en la composición del cátodo, el electrolito y el separador. Estas variaciones determinan características como la densidad energética, la seguridad y la vida útil de la batería. En esta sección, se detallará el funcionamiento de una celda de ion-litio, describiendo sus componentes fundamentales y los procesos electroquímicos que permiten la conversión de energía química en eléctrica 2.5. La Tabla 2.2 muestra las distintas composiciones químicas en el cátodo y sus densidades energéticas.

Composición química	Nombre común	Densidad energética (Wh/kg)
Óxido de litio-cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ )	LCO	150–200
Óxido de níquel- manganeso-cobalto ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ )	NMC	150–220
Fosfato de litio-hierro ( $\text{LiFePO}_4$ )	LFP	90–160
Óxido de níquel-cobalto- aluminio ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ )	NCA	200–260

Tabla 2.2: Principales composiciones de cátodo y densidades energéticas en baterías de ion-litio

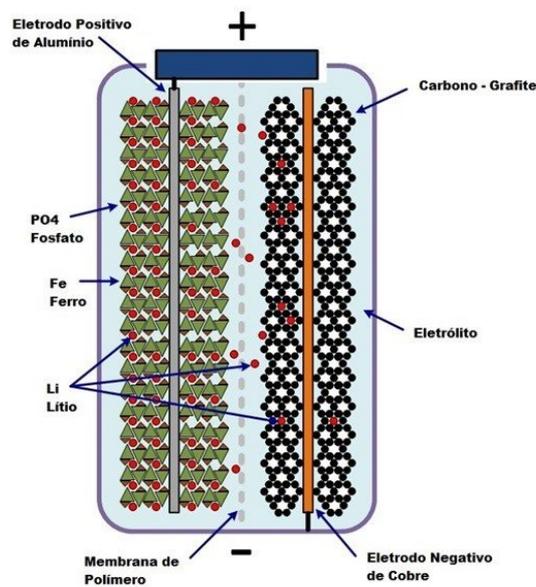


Figura 2.5. Componentes principales de una celda de litio [10]

Las celdas de litio tienen varios elementos principales, el ánodo, el cátodo, la membrana que los separa, electrolito que permite el intercambio iónico y por último, el camino eléctrico que unen ánodo y cátodo, es decir, el sistema que alimenta la batería.

### 2.2.1. Ánodo

El ánodo es la parte negativa de una celda de ion-litio y está compuesto por una lámina colectora de corriente de cobre sobre la cual se deposita una mezcla activa basada en grafito. El material activo dentro de una celda es aquel que tiene capacidad de almacenar iones de litio de forma reversible, siendo el material que participa activamente en la acumulación de energía dentro de la celda. El grafito actúa como material hospedador para los iones de litio durante la carga de la celda. En dicho estado, los iones de litio se encuentran intercalados entre las capas del grafito, formando una fase de composición aproximada  $Li_xC_6$ , donde la  $x$  es la proporción de átomos de litio que hay por cada unidad básica de la estructura cristalina de grafito. La Figura 2.6 muestra un esquemático de la estructura de iones de litio intercalados en capas de grafito. Este proceso de intercalación es reversible y constituye el mecanismo principal de almacenamiento de carga en el ánodo.

La migración de los iones de litio desde el cátodo hasta el ánodo durante la carga no ocurre de forma espontánea, sino que requiere la aplicación de energía eléctrica desde una fuente externa. Los iones de litio atraviesan el electrolito mientras los electrones se desplazan por el circuito externo hacia el ánodo, donde ambos se recombinan para formar la fase intercalada. Esta transferencia controlada y reversible de litio entre ambos electrodos permite múltiples ciclos de carga y descarga sin alteración significativa de la estructura del grafito.

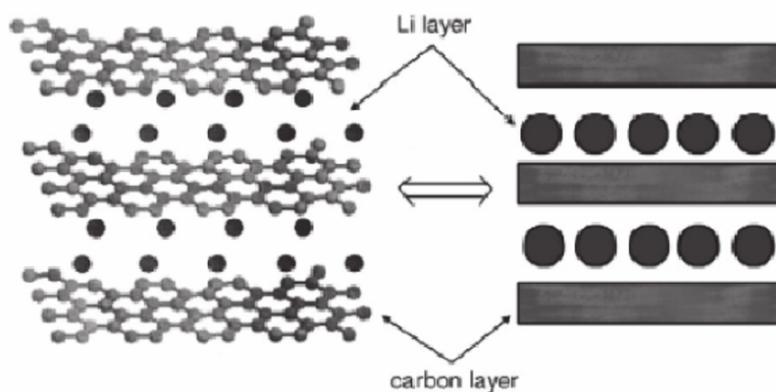
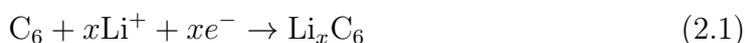


Figura 2.6. Intercalado de los átomos de litio entre las capas de grafito en el ánodo [11]

Cuando el valor de  $x$  en la fase intercalada  $Li_xC_6$  es demasiado bajo, es decir, cuando la batería se encuentra en un estado de carga extremadamente bajo, las estructuras de grafito que normalmente alojan los iones de litio pueden colapsar. Esta falta de litio intercalado debilita la integridad mecánica de las capas de grafito, provocando una degradación irreversible del ánodo. Como consecuencia, se acelera el envejecimiento de la celda y se reduce su capacidad útil. Además, en estos estados profundos de descarga, el potencial del ánodo puede descender por debajo del umbral de estabilidad del cobre, lo que puede provocar la disolución del colector de corriente. Durante la recarga, el cobre disuelto puede redepositarse de forma no controlada en forma de dendritas, estructuras metálicas filiformes que, al crecer, pueden atravesar el separador del cátodo y el ánodo, provocando un cortocircuito interno en la celda.

El cobre a potenciales extremadamente bajos en el ánodo experimenta la siguiente reacción química, pasando a formar parte del electrolito y pudiendo reconvertirse de nuevo a cobre metal, formando dendritas en el ánodo:



El uso de grafito como material anódico en baterías comerciales se debe a su bajo coste, alta estabilidad estructural y electroquímica, y capacidad específica relativamente elevada [12]. En comparación con materiales empleados en generaciones anteriores, como el carbón amorfo o el óxido de estaño  $SnO_2$ , el grafito ofrece una mayor eficiencia y una inserción más controlada y reversible del litio. Además, su potencial de inserción es bajo, aproximadamente 0,1–0,2 V frente a  $Li/Li^{+}$ , lo cual contribuye a maximizar la tensión total de la celda.

Por su parte, el cobre se emplea como colector de corriente en el ánodo debido a su excelente conductividad eléctrica y su estabilidad frente a potenciales negativos.

### 2.2.2. Cátodo

El cátodo es el electrodo positivo en una celda de ion-litio y está compuesto al igual que el ánodo, por una lámina colectora de aluminio sobre la cual se deposita un material activo basado en óxidos metálicos de litio. Este material activo es el responsable de liberar y almacenar iones de litio durante los ciclos de carga y descarga. Durante la descarga, los iones de litio se desintercalan del cátodo y migran mediante fenómenos de difusión a través del electrolito hacia el ánodo, mientras que los electrones fluyen por el circuito eléctrico hacia el ánodo.

Los materiales de cátodo más comunes son compuestos basados en óxidos de metales de transición, como el óxido de litio-cobalto ( $LiCoO_2$ ), el óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto ( $LiNiMnCoO_2$ ), NMC o el fosfato de litio-hierro ( $LiFePO_4$ ), LFP. Estos materiales permiten una intercalación reversible de iones de litio en su estructura cristalina, manteniendo la estabilidad mecánica y química del cátodo a lo largo de numerosos ciclos.

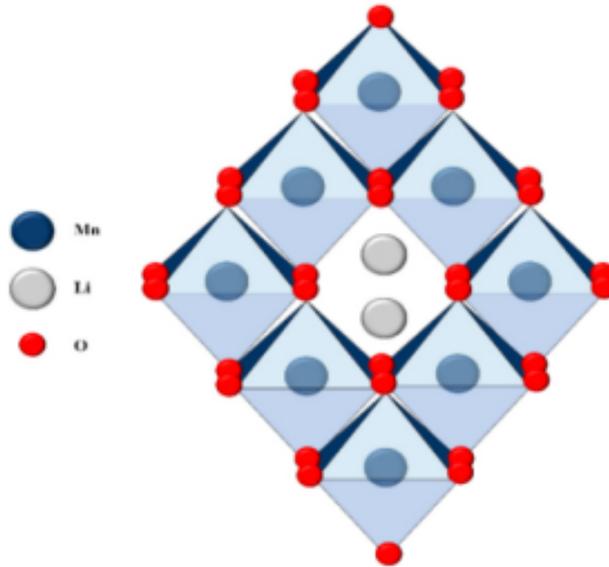


Figura 2.7. Estructura de diamante del material  $LiMn_2O_4$  [12]

La reacción química general que ocurre en el cátodo durante la descarga puede representarse como (2.3):



donde  $MO_2$  representa el material activo y  $x$  es la fracción de iones de litio que se intercalan o desintercalan. La capacidad y la tensión del cátodo dependen del material específico y de su estructura cristalina.

Estos materiales catódicos son altamente sensibles a valores extremos del parámetro  $x$  de la ecuación de balance estequiométrico  $Li_xMO_2$ . Esto se debe a que, en condiciones de sobrecarga, cuando  $x$  alcanza valores elevados, todos los iones de litio migran al ánodo, dejando la estructura cristalina tridimensional del óxido de litio carente de átomos de litio. Estas estructuras pueden colapsar ante este déficit

de electrones, causando reacciones químicas inesperadas y secundarias, como la liberación de oxígeno presente en el óxido metálico. La figura 2.8 muestra celdas dañadas en las que se ve una clara hinchazón debido a la liberación de gases. Estas reacciones deterioran el material activo, reduciendo su capacidad de almacenar iones de litio y empeorando la capacidad de la celda.

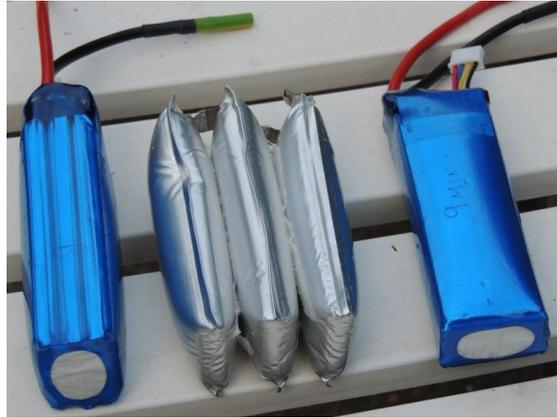


Figura 2.8. Batería dañada, debido a la liberación de gases del cátodo [13].

No obstante, si estas reacciones son demasiado acusadas debido a un valor aún más extremo de  $x$ , este oxígeno puede reaccionar con el electrolito, que contiene altos niveles de hidrógeno, y junto con el calor liberado por estas reacciones exotérmicas, puede dar lugar al denominado *thermal runaway*. La Figura 2.9, muestra el proceso en el que la celda entra en combustión repentina, pudiendo llegar a explotar.

El gran desafío en estos casos es mitigar el fuego, ya que se trata de reacciones altamente exotérmicas y autoalimentadas. El oxígeno proveniente del óxido de metales de transición actúa como su propio oxidante, y el comburente está intrínsecamente presente en los electrolitos orgánicos y en el propio metal de litio, que es altamente reactivo.

Por ello, es vital controlar  $x$  que tiene relación directa con la tensión en vacío en bornas de la celda. Estos valores de tensión dependen del tipo de celda, del material del cátodo y del fabricante, por lo que es fundamental que los componentes electrónicos de control supervisen estas variables para asegurar que la operación se mantenga siempre dentro de los rangos seguros de la celda.

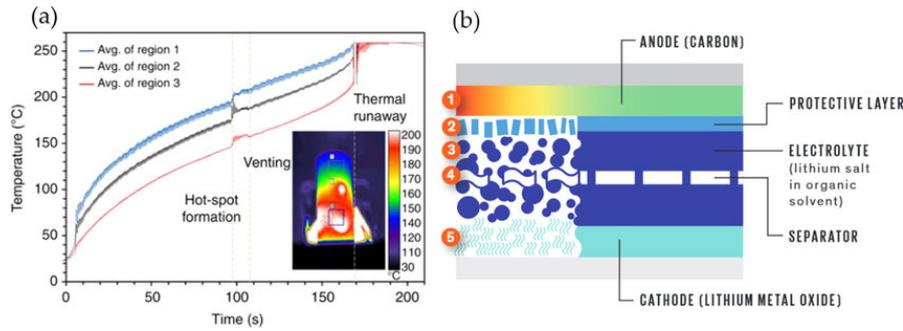


Figura 2.9. Thermal runaway de una batería de ion-litio por liberación de calor en la descomposición gaseosa del cátodo en la que además se generan gases inflamables y auto alimentados de oxígeno [14].

El colector de corriente del cátodo es típicamente de aluminio debido a su baja masa, buena conductividad eléctrica y estabilidad electroquímica a los potenciales positivos del cátodo.

Al igual que el cobre en el ánodo con potenciales bajos, el aluminio puede oxidarse a potenciales elevados; esto daría lugar, en condiciones de sobrecarga, a la siguiente reacción:



Dando lugar a la solvatación del aluminio en el medio electrolítico, que posteriormente, al descargarse la celda, daría lugar a estructuras filiformes internas que podrían penetrar la lámina de separación, produciendo, al igual que en el caso de sobredescarga, un cortocircuito interno.

### 2.2.3. Separador

El separador es una membrana que se interpone entre el ánodo y el cátodo en una celda de ion-litio con el objetivo de evitar el contacto directo entre ambos electrodos, lo cual provocaría un cortocircuito interno. Su función principal es bloquear el paso de electrones dentro de la celda, forzándolos a circular por el circuito externo, donde pueden realizar trabajo útil. A su vez, el separador debe permitir el paso de iones de litio desde un electrodo hacia el otro, garantizando así la continuidad de las reacciones electroquímicas de carga y descarga.

Para cumplir estas funciones de manera eficaz, el separador debe ser eléctricamente aislante, químicamente estable, mecánicamente robusto y presentar una

alta porosidad que permita el paso del electrolito. El encargado de transportar los iones entre los dos materiales activos de la celda, y conformándose de diferentes solventes orgánicos corrosivos a los que tiene que ser resistente la membrana.

Existen numerosas tecnologías de separadores, cada una optimizada para distintas aplicaciones y condiciones operativas. Los más comunes son los de poliolefinas (como polietileno y polipropileno), que ofrecen buena estabilidad térmica y mecánica. Sin embargo, su rendimiento puede verse comprometido a altas temperaturas, por lo que han sido desarrolladas variantes con recubrimientos cerámicos que mejoran su estabilidad y seguridad.

También existen separadores a base de materiales sostenibles como la celulosa, que buscan reducir el impacto ambiental de las baterías. Otros diseños más avanzados incluyen separadores funcionalizados con capas activas o inteligentes que responden a cambios de temperatura o tensión, contribuyendo a prevenir condiciones de fallo como el *thermal runaway*.

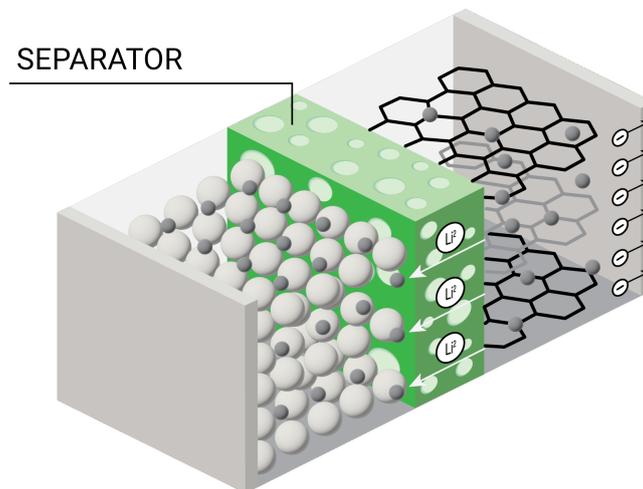


Figura 2.10. Separador de una celda de litio [15]

#### 2.2.4. Electrolito

El electrolito es un componente fundamental en el funcionamiento de una celda de ion-litio, ya que permite el transporte de los iones de litio entre el ánodo y el cátodo durante los procesos de carga y descarga. La Figura 2.11 muestra de forma esquemática este proceso. Este transporte ocurre gracias a fenómenos de difusión y migración bajo la acción de gradientes de concentración y campos eléctricos internos, siendo esencial para el mantenimiento del equilibrio electroquímico y el

rendimiento de la celda.

Tradicionalmente, los electrolitos empleados en baterías de ion-litio son líquidos compuestos por una sal de litio, usualmente hexafluorofosfato de litio ( $\text{LiPF}_6$ ) disuelta en una mezcla de disolventes orgánicos, como carbonato de etileno (EC), carbonato de dimetilo (DMC) o carbonato de dietilo (DEC). Esta combinación proporciona una alta conductividad iónica a temperatura ambiente, lo que permite operar la celda con materiales de alta tensión en el cátodo [16]. Sin embargo, estos electrolitos líquidos presentan importantes limitaciones, entre las que destacan su inflamabilidad, volatilidad y sensibilidad a la humedad, factores que comprometen la seguridad y la durabilidad de las celdas. Por ello, en la última década se ha intensificado la investigación en nuevos tipos de electrolitos con mejores prestaciones en términos de estabilidad térmica, electroquímica y seguridad.

Por otra parte, los electrolitos poliméricos, como el polímero de óxido de polietileno (PEO) dopado con sales de litio, son más fáciles de procesar, pero su conductividad a temperatura ambiente es aún insuficiente para aplicaciones de alta potencia. Por ello, la comunidad científica está explorando soluciones intermedias, como los electrolitos geles o los sistemas compuestos, que combinan la flexibilidad de los polímeros con partículas inorgánicas para mejorar tanto la conductividad como la estabilidad.

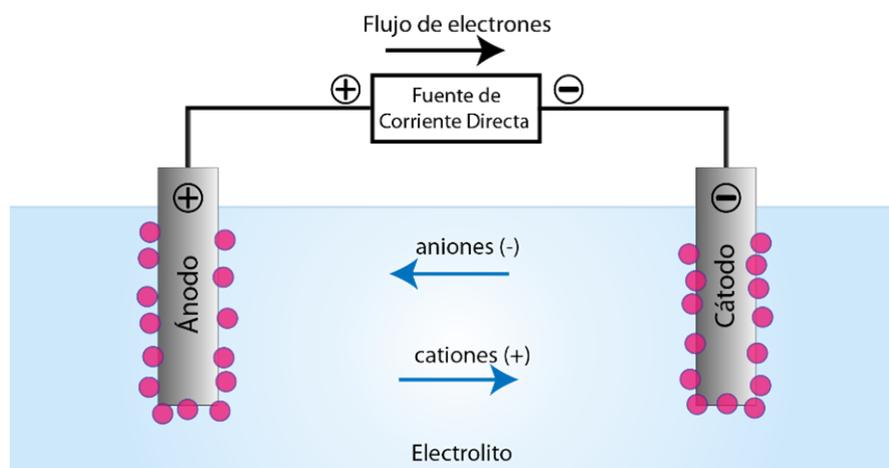


Figura 2.11. Electrolito y su función en la celda de litio [17]

## 2.3. Pérdidas energéticas dentro de una celda de litio

En esta sección se desglosarán las pérdidas energéticas de una celda de ion-litio. Estos mecanismos, por los cuales la celda pierde energía, son de vital importancia para entender la función de pérdidas instantáneas, ya que, mediante magnitudes eléctricas, se intentará establecer una relación matemática con los distintos procesos electroquímicos internos.

### 2.3.1. Perdidas por efecto Joule

Las pérdidas por efecto Joule, también conocidas como pérdidas resistivas, son aquellas que se producen por la disipación de energía en forma de calor debido al paso de corriente eléctrica a través de los distintos componentes con resistencia interna dentro de la celda. Estas pérdidas están descritas por la ley de Joule, según la cual la potencia disipada es proporcional al cuadrado de la corriente (2.5):

$$P_{\text{Joule}} = I^2 \times R \quad (2.5)$$

donde  $I$  es la corriente que circula por la celda y  $R$  representa la resistencia interna efectiva.

En una celda de ion-litio, esta resistencia interna no se reduce a un único valor, sino que es el resultado de múltiples contribuciones: la resistencia del electrolito tanto líquido como sólido, las resistencias de contacto entre los materiales activos y los colectores de corriente, y las resistencias asociadas a las interfases electroquímicas. Una de las más relevantes es la debida a la formación de la llamada SEI (Solid Electrolyte Interphase).

La SEI es una capa que se forma de manera espontánea sobre la superficie del ánodo y cátodo, generalmente durante los primeros ciclos de carga, debido a la reducción electroquímica de los componentes del electrolito. Esta capa es esencial para el funcionamiento de la batería, ya que impide una descomposición continua del electrolito, pero permite el paso de iones de litio. Sin embargo, la SEI también introduce una resistencia adicional al transporte iónico, que contribuye a las pérdidas por efecto Joule. La Figura 2.12 muestra la formación de la capa SEI en la superficie del ánodo y del cátodo.

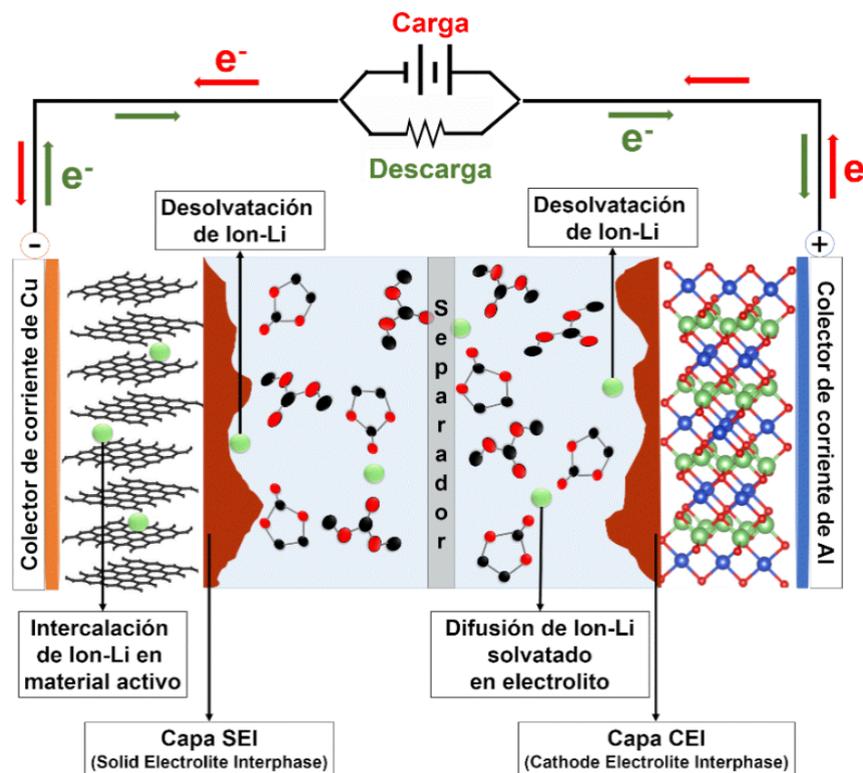


Figura 2.12. Visualización de la capa SEI en la interfase del material activo al electrolito [18]

Además, la morfología, espesor y composición química de la SEI evolucionan con el tiempo y el uso de la celda, lo que puede aumentar su resistencia y, en consecuencia, las pérdidas energéticas. Factores como la temperatura de operación, la velocidad de carga/descarga y la estabilidad del electrolito afectan directamente a la formación y estabilidad de esta interfase.

Estas pérdidas son instantáneas y dependientes de la corriente, por lo que aumentan significativamente durante ciclos de carga o descarga rápida. Además de reducir la eficiencia energética de la celda, el calor generado puede inducir efectos secundarios indeseados, como degradación de materiales activos, crecimiento de la SEI o incluso riesgos de seguridad si no se disipa adecuadamente.

### 2.3.2. Pérdidas por resistencia de polarización

Las baterías de ion-litio muestran un comportamiento dinámico complejo que no puede describirse simplemente con una resistencia óhmica constante. Uno de

los fenómenos clave en la respuesta eléctrica interna dinámica es la resistencia de polarización, que representa la oposición a la transferencia de carga y a los procesos de transporte que ocurren durante la carga y descarga.

Esta resistencia surge principalmente debido a tres mecanismos:

1. **Polarización de inactivación:** Es la barrera energética que deben superar los electrones e iones para reaccionar en la interfaz electrodo-electrolito. Está asociada a las cinéticas electroquímicas de reacción. Se describe matemáticamente con la ecuación de Butler-Volmer [19], que modela la densidad de corriente en función de la sobrepotencial  $\eta$ :

$$i = i_0 \left( e^{\frac{\alpha_n F \eta}{RT}} - e^{-\frac{\alpha_c F \eta}{RT}} \right) \quad (2.6)$$

- $i_0$  es la corriente de intercambio, reflejo de la velocidad de la reacción en equilibrio,
  - $\alpha_a$  y  $\alpha_c$  son los coeficientes de transferencia de carga anódica y catódica,
  - $F$  es la constante de Faraday,
  - $R$  la constante universal de gases,
  - $T$  es la temperatura del interior de la celda,
  - $\eta$  es el potencial aplicado respecto al potencial de equilibrio.
2. **Polarización de concentración:** Durante transitorios de carga o descarga rápida, los iones en el electrolito pueden acumularse o agotarse cerca del electrodo, generando gradientes de concentración. Esto limita la velocidad de reacción y produce una caída de tensión adicional que evoluciona en el tiempo según la difusión de especies químicas.
  3. **Polarización interfacial o estructural:** e relaciona con la formación de capas en el electrodo, como la capa SEI (Solid Electrolyte Interphase), que, aunque inicialmente introduce una resistencia adicional, se estabiliza con el tiempo y suele incorporarse a la resistencia óhmica.

### 2.3.3. Irreversibilidades y aumento de entropía interna

Las pérdidas energéticas que ocurren durante la operación de una batería de ion-litio no solo se manifiestan en forma de calor disipada, sino que tienen un origen termodinámico ligado a la irreversibilidad de los procesos involucrados. Toda

transformación no reversible en el seno de la celda genera un aumento de entropía interna, lo cual implica una degradación parcial de la energía disponible en forma no recuperable. Este aumento de entropía está estrechamente relacionado con los fenómenos de disipación, como las pérdidas por efecto Joule asociadas a la resistencia óhmica efectiva del sistema y las pérdidas por resistencia de polarización, las cuales reflejan la dinámica en la transferencia de carga y el transporte de masa dentro de los electrodos y el electrolito [20]. A nivel macroscópico, estas irreversibilidades se traducen en la necesidad de aplicar una tensión superior al OCV para sostener una corriente durante la carga (o en una caída por debajo de este valor durante la descarga), lo que constituye la sobrepotencial. Desde un punto de vista energético, esta diferencia de potencial implica una generación de calor interna, que puede expresarse como:

$$Q_{\text{gen}} = I (V_{\text{bat}} - E_{\text{eq}}) \quad (2.7)$$

- $Q_{\text{gen}}$  es el calor generado en el interior de la celda,
- $I$  es la corriente a través de la celda,
- $V_{\text{bat}}$  es la tensión en bornas de la celda,
- $E_{\text{eq}}$  es la tensión de OCV de la celda,

Además de este calor generado por procesos irreversibles, durante las reacciones de carga y descarga también tiene lugar un intercambio térmico reversible asociado a los cambios de entropía del sistema. Este fenómeno, conocido como calor reversible, no implica una pérdida energética como tal, ya que puede ser absorbido o liberado dependiendo del signo del cambio de entropía y del sentido de la reacción:

$$Q_{\text{rev}} = I T \left( \frac{dE_{\text{eq}}}{dT} \right) \quad (2.8)$$

donde:

- $Q_{\text{rev}}$  es el calor reversible intercambiado,
- $T$  es la temperatura absoluta del sistema,
- $\frac{dE_{\text{eq}}}{dT}$  es el coeficiente térmico del potencial de equilibrio.

Este calor reversible puede ser exotérmico, es decir, liberado si  $\frac{dE_{eq}}{dT} > 0$  o endotérmico, absorbido si  $\frac{dE_{eq}}{dT} < 0$ . A diferencia de las pérdidas por resistencias internas, el calor reversible está vinculado al equilibrio termodinámico de la reacción electroquímica y es, por tanto, recuperable si se invierte el proceso [21].

## 2.4. Modelo de Thévenin y sus ecuaciones

Aunque una celda de litio está compuesta por elementos químicos que reaccionan entre sí, es fundamental contar con un modelo eléctrico equivalente que permita predecir su comportamiento eléctrico dinámico. Esto es especialmente importante para el diseño y control de sistemas de almacenamiento energético, así como para la gestión y el dimensionamiento de baterías en aplicaciones reales.

En particular, al diseñar un *battery pack* (paquete de baterías), que consiste en la configuración de múltiples celdas conectadas en serie y paralelo para alcanzar la tensión y la capacidad deseados, es necesario anticipar cómo se comportará cada celda bajo diferentes condiciones de carga y descarga para la aplicación requerida.

Para representar el comportamiento eléctrico de una celda de ion-litio, se han desarrollado numerosos ensayos eléctricos que han llevado a la propuesta del modelo equivalente conocido como modelo de Thévenin. La Figura 2.13 muestra el esquema equivalente de Thévenin de una celda, compuesto por una tensión interna ( $E_m = OCV$ ), dos etapas de RC ( $R_{1,2}, C_{1,2}$ ) y una resistencia interna ( $R_0$ ).

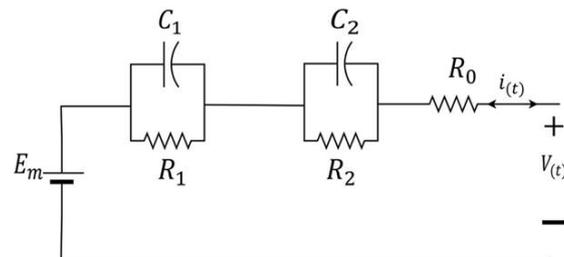


Figura 2.13. Esquema equivalente del modelo de Thévenin de una celda [22]

Este modelo simplifica la celda a un circuito compuesto por:

- Una fuente de tensión dependiente, que representa la tensión de circuito abierto (OCV) de la celda.
- Una resistencia en serie  $R_0$ , que modela las pérdidas resistivas instantáneas, también llamadas pérdidas óhmicas o efecto Joule.

- Uno o más pares de elementos en paralelo compuestos por una resistencia  $R_i$  y un condensador  $C_i$ , que representan las dinámicas de polarización y difusión dentro de la celda. El numero de elementos depende de la precisión con la que se quiere describir los efectos no lineales de la tensión de la celda y a la capacidad de obtener el valores de  $R_i$  y  $C_i$

En función de la cantidad y la disposición de estos elementos resistivos y capacitivos, se pueden obtener los diferentes modelados de la celda de litio. Este esquema permite reproducir con buena precisión la respuesta transitoria de la tensión ante cambios en la corriente de carga o descarga, y es ampliamente utilizado en sistemas de gestión de baterías BMS (Battery Management System) para predicción del SoC y estado de salud (SoH).

La Figura 2.14 muestra modelo más sencillo posible de una celda de litio es el modelo de resistencia interna. En este modelo no se tienen en cuenta los efectos transitorios de corriente y tensión, modelándose la celda como una fuente de tensión ideal en serie con una resistencia. Esta resistencia serie representa las pérdidas debidas a los contactos eléctricos, la resistividad de los conductores, la resistividad del electrolito y la capa de interfase sólida.

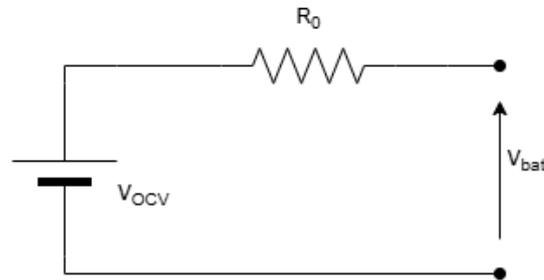


Figura 2.14. Modelo de Thévenin para una sola resistencia interna serie.

$$V_{\text{bat}} = V_{\text{OCV}} - IR_0 \quad (2.9)$$

donde:

- $V_{\text{bat}}$  es la tensión en los terminales de la batería,
- $V_{\text{OCV}}$  es la tensión de circuito abierto, tensión que alcanza la celda al no circular corriente por ella ,función del estado de carga,

- $I$  es la corriente que circula por la celda positiva para descarga,
- $R_0$  es la resistencia óhmica insterna de la celda,

Por lo tanto, la función de pérdidas para este modelo de celda es básica, siendo simplemente las pérdidas resistivas asociadas a la resistencia interna de la celda. En el modelo de Thévenin para una sola resistencia en serie, las pérdidas pueden expresarse como:

$$P_{\text{loss}}(t) = R \cdot I(t)^2 \quad (2.10)$$

No obstante, si se quiere aproximar más el modelo al comportamiento real de la celda, se le puede añadir una rama RC en serie. De esta forma, el modelo de Thévenin queda compuesto por una resistencia  $R_0$  en serie con una rama formada por una resistencia  $R_1$  y un condensador  $C_1$  en paralelo. La Figura 2.15 muestra un esquema equivalente de Thévenin con una resistencia serie. Este modelo permite representar de forma más precisa fenómenos transitorios y la dinámica de la celda durante procesos de carga y descarga.

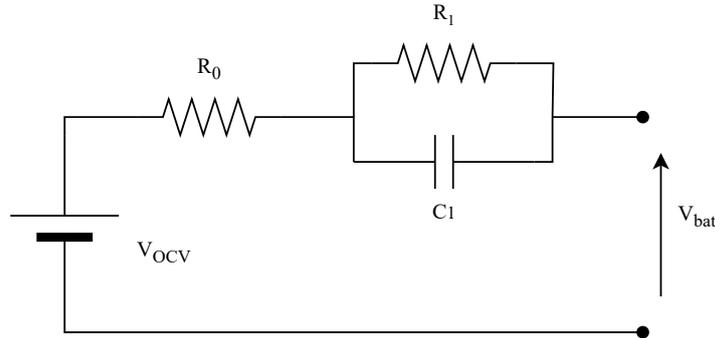


Figura 2.15. Modelo de Thévenin con una rama RC

A continuación, se presentan las ecuaciones básicas que describen el modelo de Thévenin para una sola rama RC:

$$V_{bat} = V_{OCV} - IR_0 - V_{RC} \quad (2.11)$$

$$\frac{dV_{RC}}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_1} V_{RC} + \frac{1}{C_1} I \quad (2.12)$$

donde:

- $V_{\text{bat}}$  es la tensión terminal de la batería,
- $V_{\text{OCV}}$  es la tensión de circuito abierto, función del estado de carga,
- $I$  es la corriente que circula por la celda positiva para descarga,
- $R_0$  es la resistencia óhmica instantánea,
- $V_{RC}$  es la tensión en la rama RC que modela la polarización,
- $R$  y  $C$  son la resistencia y capacitancia de la rama RC, respectivamente.

De esta forma, resolviendo la ecuación diferencial de primer orden y considerando  $V_{RC}(0) = 0$ , ya que la celda parte del reposo, la ecuación que modela la tensión de la batería en bornas es:

$$V_{\text{bat}}(t) = V_{\text{OC}} - (R_0 + R_1)I_0 + R_1I_0e^{-t/(R_1C_1)} \quad (2.13)$$

En modelos más completos, se pueden incluir múltiples ramas RC para captar diferentes fenómenos electroquímicos con distintas constantes de tiempo, lo que mejora la fidelidad en la simulación dinámica de la celda.

## 2.5. Modelo Shepherd para baterías de Litio

El modelo Shepherd es empleado para describir el comportamiento dinámico de la tensión terminal de una batería durante los procesos de carga y descarga. Este modelo tiene como objetivo representar la relación no lineal entre la tensión, la corriente y el SoC de la batería, capturando además los efectos de polarización interna y resistencia óhmica, siendo uno de los modelos más completos y más fieles a la realidad. Por ello, va a ser el modelo empleado en este proyecto.

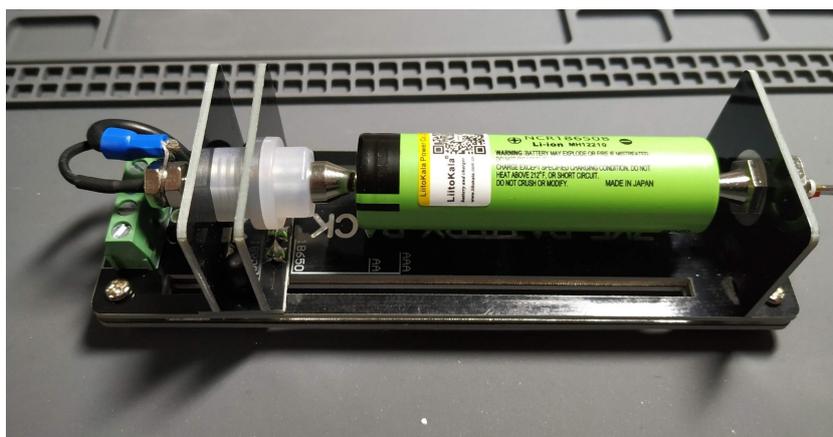


Figura 2.16. Obtención empírica de los parámetros de la celda para el modelo Shepherd [23]

En este modelo, la tensión en bornas de la batería,  $V_{bat}$ , se expresa como función de la corriente instantánea  $I(t)$  y la cantidad de carga extraída desde el inicio del proceso, además de una componente exponencial de parámetros empíricos. La expresión matemática clásica del modelo Shepherd para el proceso de descarga es la siguiente [24]:

$$V(t) = E_0 - K \underbrace{\frac{Q_m}{Q_m - \int_0^t I(\tau) d\tau}}_{\Delta V} I(t) - RI(t) \quad (2.14)$$

donde:

- $V(t)$  es la tensión terminal de la batería en el instante  $t$ ,
- $E_0$  es la tensión de circuito abierto nominal (OCV), considerado constante,
- $K$  es una constante que representa la pendiente de la caída de voltaje debido a la polarización interna,
- $Q_m$  es la capacidad nominal de la batería, expresada en amperios-hora (Ah),
- $\int_0^t I(t) dt$  representa la carga acumulada extraída de la batería desde el instante inicial,
- $I(t)$  es la corriente instantánea de descarga tomada positiva durante la descarga,

- $R$  es la resistencia interna óhmica de la batería.
- $\Delta V$  es el término que modela la caída de tensión debida a la polarización interna de la batería. Este término depende de la corriente instantánea y del estado de carga restante de la batería, ya que a medida que se extrae carga, la cantidad de carga disponible disminuye, aumentando así el efecto de polarización.

Para expresar el modelo en función del estado de carga (explicado en detalle en la Sección 2.6), se define el *state of charge* (SoC) como:

$$\text{SoC}(t) = 1 - \frac{1}{Q_m} \int_0^t I(t)dt \quad (2.15)$$

con lo que la ecuación (2.14) puede reescribirse como:

$$V(t) = E_0 - K \frac{I(t)}{\text{SoC}(t)} - RI(t) \quad (2.16)$$

De esta manera, el modelo Shepherd incorpora la no linealidad de la tensión con respecto a la corriente y el estado de carga, reflejando que la caída de tensión por polarización se incrementa a medida que disminuye el SoC.

El término final  $RI(t)$  representa la caída de tensión inmediata debida a la resistencia interna óhmica, que afecta de forma lineal a la tensión terminal.

Este modelo, aunque sencillo, proporciona una buena aproximación al comportamiento real de la batería para simulaciones en tiempo real y estrategias de gestión energética. No obstante, presenta limitaciones al no incluir fenómenos transitorios complejos, como la difusión interna de iones, para los cuales modelos más elaborados, como por ejemplo, con ramas RC múltiples son necesarios.

Finalmente, existen variantes del modelo Shepherd que incluyen términos adicionales para mejorar la precisión, tales como componentes exponenciales para representar caídas rápidas de tensión o la incorporación de efectos térmicos y envejecimiento. Estos modelos son los que emplean las herramientas potentes de simulación como Simscape (de Matlab<sup>®</sup>) para su modelo matemático de batería.

En particular, el modelo Shepherd modificado que utiliza Simscape incorpora un término exponencial para capturar la caída rápida de tensión al inicio de la descarga o carga. La expresión de la tensión terminal en este modelo es:

$$V(t) = E_0 - RI(t) - K \frac{Q_m}{Q_m - \int_0^t I(t) dt} I(t) + A e^{-B \int_0^t I(t) dt} \quad (2.17)$$

donde:

- $A$  y  $B$  son parámetros que modelan la magnitud y la tasa de decaimiento de la caída rápida de tensión,
- El término exponencial  $A e^{-Bq(t)}$ , con  $q(t) = \int_0^t I(t) dt$ , representa el efecto de polarización rápida que ocurre principalmente al comienzo del ciclo de descarga,
- Los demás términos corresponden a los descritos en el modelo clásico Shepherd.

Este término exponencial permite representar con mayor fidelidad la forma característica de la curva de tensión en baterías reales, especialmente la caída rápida al inicio de la descarga, que no puede ser modelada con precisión por el modelo Shepherd básico.

Por último, para este modelo, tal y como se menciona en el artículo en el que se basa este proyecto [25], se realizará una ligera modificación en la resistencia de polarización, añadiendo un nuevo término y aplicando un desplazamiento del 10 % en el estado de carga para este termino, diferenciando si la celda se encuentra en proceso de carga o descarga.

Esta nueva resistencia de polarización está multiplicada por  $I^*$ , que representa la corriente que atraviesa la celda tras aplicarle un filtro paso bajo.

De este modo, la resistencia de polarización en la fórmula completa del modelo Shepherd queda definida como:

$$R_{\text{pol}}(I) = \begin{cases} K \frac{Q_m}{Q_m - I(t)} & \text{si } I > 0 \\ K \frac{Q_m}{I(t) + 0,1 \cdot Q_m} & \text{si } I \leq 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

siendo  $I(t) < 0$  para la carga. Finalmente, el modelo de celda para este proyecto queda expresado como:

$$V_{\text{bat}} = E_0 - R \cdot I - R_{\text{pol}}(I) \cdot I^* - K \frac{Q_m}{Q_m - It} \cdot It + A \cdot e^{-B \cdot It} \quad (2.19)$$

## 2.6. Estado de carga o Soc

El Estado de Carga, o SoC, es una variable que indica el nivel de energía disponible en una batería en un instante dado, expresado generalmente como un porcentaje respecto a su capacidad máxima. Su estimación precisa es fundamental para la gestión de la batería, ya que proporciona información sobre la energía remanente en el sistema de almacenamiento antes de alcanzar los límites operativos de la celda, ayudando así a protegerla frente a descargas o cargas extremas que puedan dañarla o reducir su vida útil.

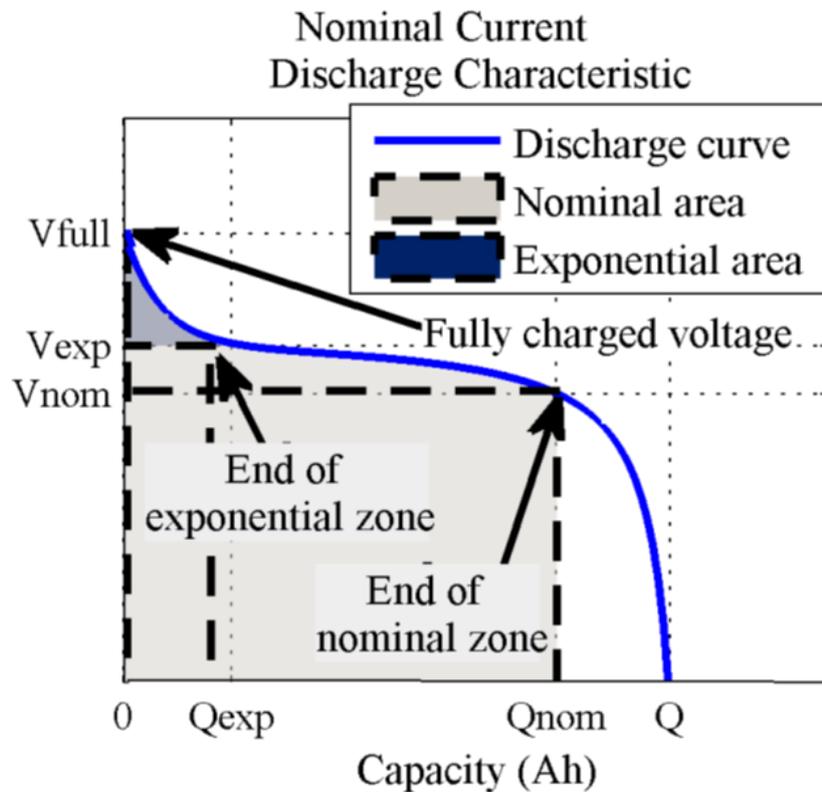


Figura 2.17. Curva de descarga típica de una celda de ion-litio [26].

El SoC también representa el parámetro que, en las reacciones redox internas de la batería, mide el índice  $x$  en la reacción química:



Además, el SoC es crucial para determinar valores variables como la resistencia

de polarización, lo que permite obtener un modelo dinámico más realista de la celda.

Existen principalmente dos métodos para estimar el SoC:

- Coulomb counting

Este método se basa en integrar la corriente que entra o sale de la batería durante un intervalo de tiempo para estimar la cantidad de carga utilizada o almacenada. Matemáticamente, se expresa como:

$$\text{SoC}(t) = 1 - \frac{1}{Q_m} \int_0^t I(t) dt \quad (2.21)$$

donde  $Q_m$  es la capacidad nominal de la batería y  $I(t)$  la corriente instantánea.

Es necesario contar con una buena calibración inicial del SoC para estimar con precisión el parámetro  $Q_m$  ya que esta capacidad nominal puede variar de una celda a otra debido a las tolerancias del proceso de fabricación, que no garantiza una homogeneidad perfecta entre celdas. Además, este método es sensible a errores acumulativos derivados de la integración numérica de la corriente. Por ello, es habitual complementar el coulomb counting con métodos adicionales, como la estimación del SoC a partir del OCV, con el fin de corregir desviaciones y mejorar la precisión de la estimación del SoC.

- Medición del OCV

El método basado en el OCV se fundamenta en la relación característica entre el tensión de la batería en estado de reposo y el estado de carga. Cuando la batería está en equilibrio, es decir, sin carga ni descarga durante un tiempo suficiente para que las reacciones electroquímicas se estabilicen, la tensión medido refleja con precisión el SoC.

Este método utiliza curvas características OCV-SoC obtenidas experimentalmente para un tipo concreto de batería. Estas curvas muestran cómo varía la tensión en circuito abierto en función del SoC y son específicas para cada química y modelo de batería. La medición del OCV se realiza idealmente tras un periodo de reposo para eliminar efectos transitorios y obtener un valor representativo del estado real de la celda.

La principal ventaja del método OCV es su precisión para estimar el SoC sin acumular errores derivados de la integración de corriente como ocurre en el método de integración de corriente. Sin embargo, requiere que la batería esté en condiciones de reposo.

En la Figura 2.18 se muestra la curva típica de SoC frente al OCV, así como la relación con la tensión bajo carga para un modelo concreto de batería, ilustrando cómo se puede interpolar el SoC a partir de una medición de la tensión en condiciones ideales.

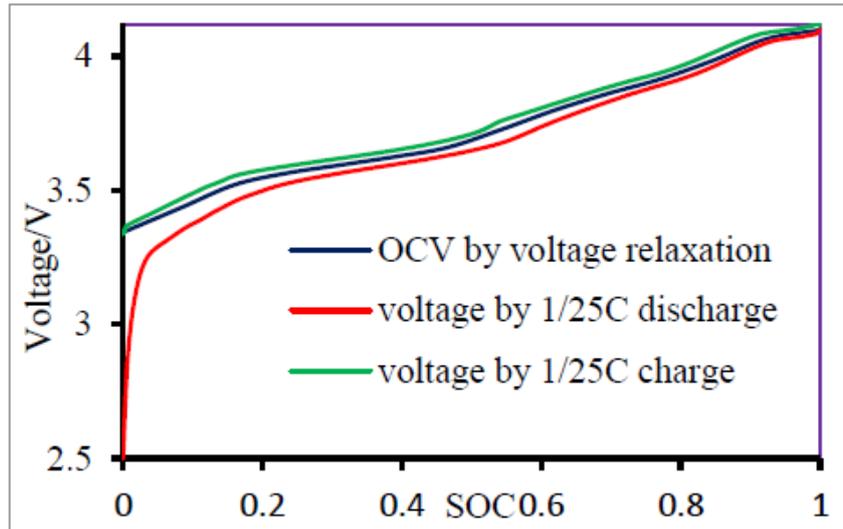


Figura 2.18. Relación entre el SoC, la tensión en circuito abierto (OCV) y la tensión bajo carga para un modelo específico de batería [27].

## 2.7. Modelado de las pérdidas instantáneas

En el modelo Shepherd modificado utilizado en este proyecto, las pérdidas se pueden expresar en función de la diferencia entre la tensión ideal y la tensión real de la batería multiplicada por la corriente que circula por ella.

Matemáticamente, las pérdidas instantáneas se pueden definir como:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{pérdidas}}(t) = & (E_0 - V_{\text{bat}}) I(t) \underbrace{R \cdot I(t)^2}_{\text{Término 1}} + \underbrace{R_{\text{pol}} \cdot I^*(t) \cdot I(t)}_{\text{Término 2}} \\
 & + K \underbrace{\frac{Q_m}{Q_m - I(t)t} I(t)t \cdot I(t)}_{\text{Término 3}} - \underbrace{Ae^{-B I(t)t} \cdot I(t)}_{\text{Término 4}}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Siendo el término 2 el añadido a la resistencia de polarización para corrientes filtradas.

Para simplificar el análisis, en este trabajo se consideran únicamente los términos 1 y 2 para modelar las pérdidas instantáneas [25] dado que el resto de términos son de un orden mucho menor. Quedando las siguientes ecuaciones:

$$P_{\text{pérdidas}}(t) = R \cdot I(t)^2 + R_{\text{pol}} \cdot I^*(t) \cdot I(t) \quad (2.23)$$

Tomando en cuenta las ecuaciones (2.19), (2.21) y (2.23), las expresiones para las pérdidas durante la descarga y la carga pueden aproximarse respectivamente como:

$$P_{\text{disc, loss}}(t) = 10^{-3} (R + K \cdot \text{SoC}(t)) I(t)^2 \quad (2.24)$$

$$P_{\text{char, loss}}(t) = 10^{-3} (R + K \cdot (1,1 - \text{SoC}(t))) I(t)^2 \quad (2.25)$$

### 3 Metodología

Para analizar de forma experimental las pérdidas instantáneas en baterías de ion-litio, es necesario disponer de un banco de pruebas que permita controlar las condiciones de carga y descarga, así como medir en tiempo real parámetros eléctricos como la corriente, tensión y temperatura de las celdas.

En la actualidad, este tipo de experimentación se lleva a cabo utilizando equipos profesionales de caracterización de baterías, como los sistemas de testeo de fabricantes especializados como por ejemplo, Arbin Instruments, MACCOR, Neware, BioLogic, entre otros. Sin embargo, debido al elevado coste de estos equipos y al alcance académico de este proyecto, se ha optado por diseñar y construir un banco de pruebas experimental de bajo coste, orientado a validar el modelo matemático y calcular las pérdidas instantáneas.



Figura 3.1. Testador de celdas Arbin [28].

El objetivo de este montaje es permitir el ensayo de una celda de ion-litio bajo diferentes perfiles de corriente, tanto de carga como de descarga, y registrar con la mayor precisión posible las magnitudes eléctricas necesarias para aplicar el modelo matemático de pérdidas planteado en el Capítulo 2.

### 3.1. Variables necesarias a medir para los ensayos

La caracterización completa del comportamiento termodinámico y electroquímico de una celda de ion-litio implicaría la medición directa de las reacciones químicas internas, los flujos de calor generados y las variaciones de entropía a lo largo del proceso de carga y descarga. Sin embargo, este tipo de mediciones requiere equipamiento de laboratorio altamente especializado, como calorímetros isoperibólicos, espectroscopía de impedancia, celdas de referencia o técnicas de análisis químico, que están fuera del alcance técnico y económico de este proyecto.

Por tanto, se opta por una estrategia mucho más accesible desde el punto de vista experimental: la monitorización precisa de las magnitudes eléctricas de la celda. Esta alternativa, aunque indirecta, permite inferir los fenómenos energéticos internos, ya que las pérdidas por efecto Joule y polarización quedan reflejadas en la tensión y la corriente suministradas.

El objetivo es registrar con alta resolución las siguientes variables durante los ensayos:

- Corriente instantánea  $I(t)$ : tanto en carga como en descarga, mediante sensores de efecto Hall o shunt de alta precisión.
- Tensión de la celda  $V_{bat}(t)$ : directamente medida con un ADC de alta resolución.
- Tiempo transcurrido: para poder calcular integrales de energía y estimar el estado de carga por métodos como Coulomb Counting.
- Opcionalmente la temperatura superficial de la celda: para asegurar el funcionamiento seguro de la misma en todo momento durante los ensayos.

## 3.2. Diseño del circuito eléctrico para el ensayo de celdas de ion-litio

Para poder evaluar de forma experimental las pérdidas instantáneas en una celda de ion-litio, es necesario medir con precisión las variables eléctricas de tensión, corriente y tiempo. Estas mediciones junto con otras variables, junto con las que se derivan de ellas y la caracterización experimental del modelo físico, permiten computar la función de pérdidas eléctricas en la celda mediante la siguiente expresión:

$$P_{\text{loss}}(t) = R \cdot I^2(t) + R_{\text{pol}}(t) \cdot I^2(t) \quad (3.1)$$

Para implementar este sistema de adquisición, se emplearán microcontroladores de bajo coste, de fácil manejo y alta disponibilidad, como Arduino o ESP32, junto con herramientas de adquisición y procesamiento de datos como MATLAB o Python para su posterior análisis. Esta arquitectura ofrece una solución económica, flexible y suficientemente precisa para los fines experimentales y académicos de este proyecto.

Además, dado que se trabaja con baterías de ion-litio, cuyo mal uso puede conllevar riesgos como incendios, emisión de gases tóxicos y elevadas temperaturas, es fundamental realizar los ensayos en un entorno controlado, siguiendo siempre las medidas de seguridad adecuadas.

Para ello, se ha diseñado un circuito capaz de medir tensión y corriente a modo de vatímetro. La tensión se medirá directamente en las bornas de la celda mediante un convertidor analógico-digital ADC, que transforma la señal analógica en un valor digital procesable. Por otro lado, la medición de corriente se realizará mediante un amperímetro conectado en serie, cuya señal también será digitalizada por un ADC con el mismo fin.

Aparte de esta protección pasiva, se implementará una medida de seguridad activa mediante una caja de aluminio, diseñada para soportar elevadas temperaturas en caso de que ocurra un fenómeno de thermal runaway. La celda estará alojada en todo momento en el interior de esta caja. A dicha carcasa se le acoplarán unas borneras en las que se realizarán las conexiones eléctricas entre la celda y el resto de los elementos del sistema. La figura 3.3, muestra el lugar donde se alojará la celda durante los experimentos.

La Figura 3.2 muestra un esquemático sencillo de configuración eléctrica elegida para el circuito eléctrico:

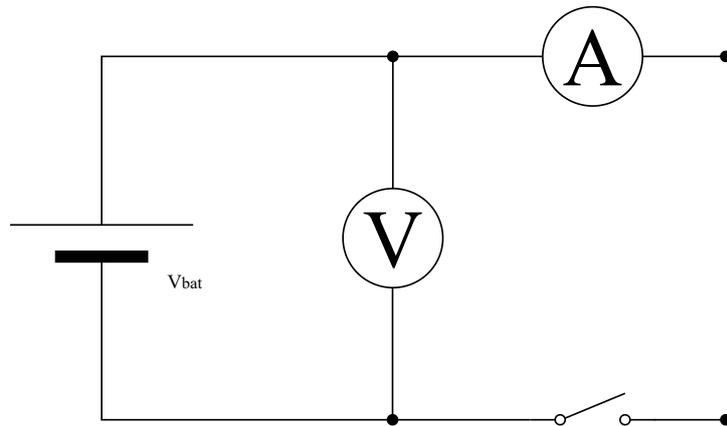


Figura 3.2. Esquema eléctrico elegido para el proyecto mediante el cual se obtendrán los datos necesarios de las variables eléctricas y además contará con un relé que abrirá el circuito cuando lo requiera el ensayo o por seguridad

Además, por razones de seguridad, como se ha mencionado anteriormente, será imprescindible contar con un sistema de protección que permita interrumpir la conexión eléctrica de la batería durante la carga o descarga ante cualquier valor anómalo de corriente, tensión o temperatura. Este sistema garantizará que la batería opere siempre dentro de los márgenes seguros, desconectándola automáticamente en caso contrario.

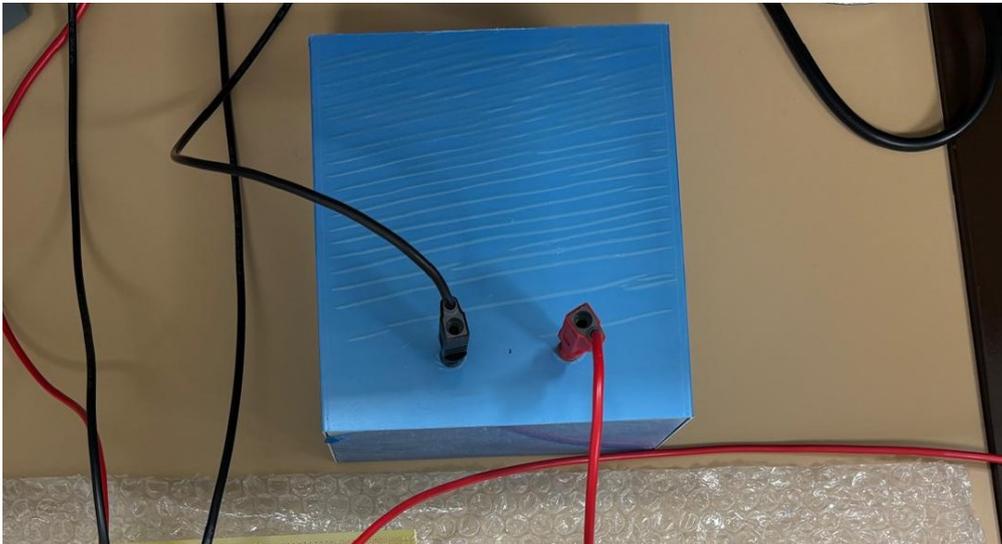


Figura 3.3. Caja de aluminio con bornes donde se aloja la celda en el interior

Finalmente, se requerirán dispositivos para cargar y descargar la batería. Para la carga, se empleará una fuente de tensión de laboratorio configurada como fuente de corriente, lo que permitirá realizar una carga controlada de la celda.



Figura 3.4. Fuente de tensión empleada para la carga y descarga controlada de la celda a corriente constante funcionando en modo control de corriente [29]

La Figura 3.5 muestra el esquema eléctrico de la configuración para la carga:

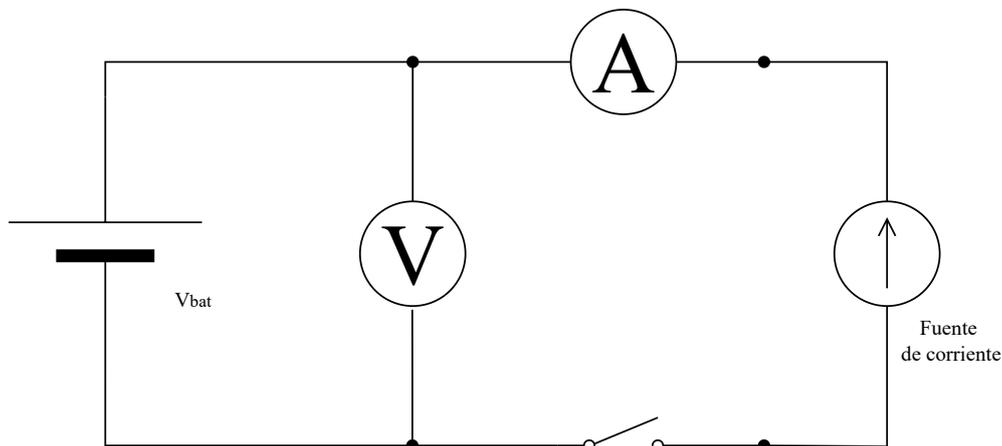


Figura 3.5. Esquema eléctrico para la carga a corriente continua usando la fuente de tensión del laboratorio en modo control de corriente constante.

Para el proceso de descarga de la celda de ion-litio se ha optado por el uso de una resistencia disipadora de potencia. Esta permitirá llevar a cabo una descarga controlada mediante el paso de corriente. Sin embargo, dado que la tensión de la celda disminuye progresivamente durante la descarga, mantener una corriente constante implica ajustar dinámicamente el valor de la resistencia según la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.2)$$

Donde:

- $I$  es la corriente (A)
- $V$  es la tensión en bornas de la celda (V)
- $R$  es la resistencia del elemento disipador ( $\Omega$ )

Esto implica que, a medida que  $V$  disminuye, también debería disminuir  $R$  para mantener constante la intensidad  $I$ . Sin embargo, esta solución no es viable ya que no se dispone en el laboratorio de resistencias de potencia variables en tiempo real mediante control electrónico capaces de soportar las potencias de estos ensayos.

Por tanto, se ha optado por una solución alternativa viable con los elementos disponibles en el laboratorio: acoplar la fuente de tensión del laboratorio en modo de control de corriente, conectada en serie con la celda y la resistencia de carga. De esta manera, la fuente irá ajustando automáticamente su tensión de salida a medida que la tensión de la celda disminuye, manteniendo constante el valor de la corriente de descarga.

$$V_{\text{fuente}} + V_{\text{celda}} = I \cdot R \quad (3.3)$$

Donde:

- $V_{\text{fuente}}$  es la tensión proporcionada por la fuente
- $V_{\text{celda}}$  es la tensión en bornas de la celda
- $I$  es la corriente constante deseada
- $R$  es la resistencia fija de descarga

La fuente ajustará  $V_{\text{fuente}}$  para compensar la caída de tensión de la celda y de la resistencia, garantizando así que la corriente  $I$  se mantenga constante.

A continuación, se muestra el esquema eléctrico de la configuración utilizada para la descarga 3.6:

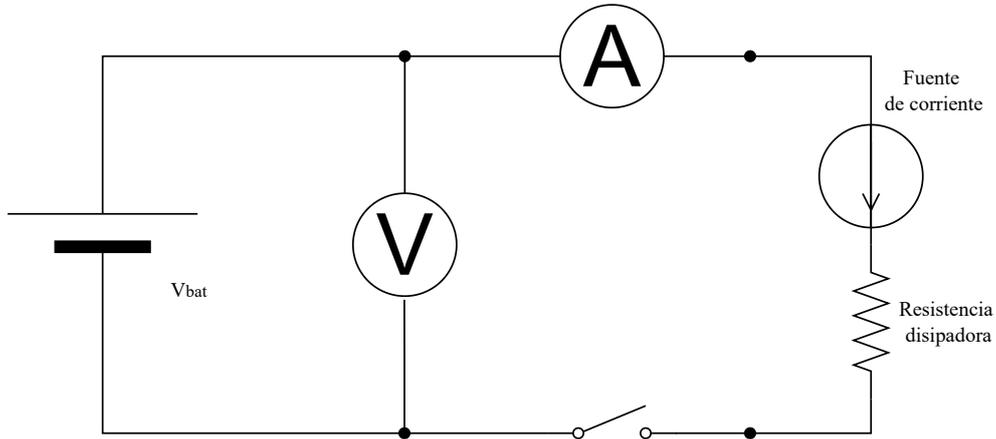


Figura 3.6. Esquema para la descarga de la celda a corriente constante mediante una fuente de tensión en modo control de corriente que aporta el voltaje necesario para que la suma de  $V_{\text{celda}}$  y  $V_{\text{fuente}}$  sea constante en todo momento

El esquema final del circuito elegido será tal como se muestra a continuación:

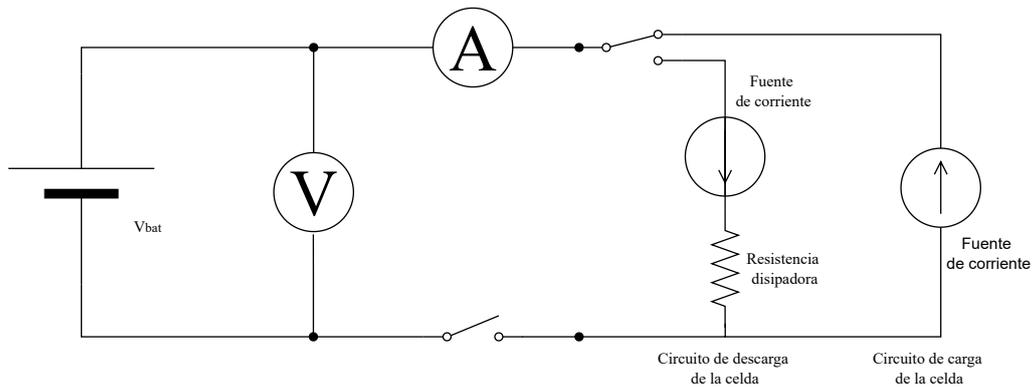


Figura 3.7. Circuito eléctrico completo para la carga y descarga constante con fuentes de tensión del laboratorio usadas en modo fuentes de corriente y con resistencia disipadora

## 4 Desarrollo y prototipo

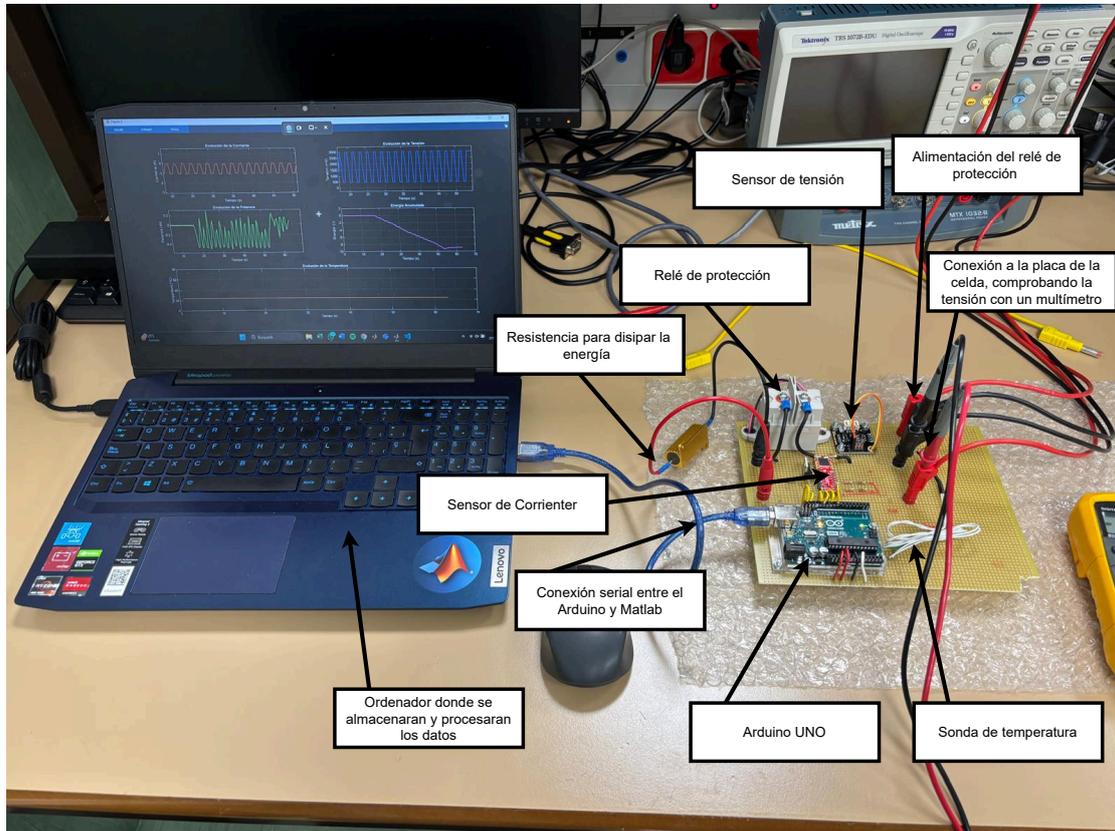


Figura 4.1. Configuración del ensayo a realizar

### 4.1. Selección del microcontrolador y sistema de adquisición de datos

Con el fin de analizar las variables eléctricas que intervienen en el comportamiento dinámico de una celda de ion-litio durante los procesos de carga y descarga, se ha diseñado un sistema de adquisición de datos en tiempo real basado en un microcontrolador y un entorno de procesamiento externo. Para el tratamiento, visualización y almacenamiento de los datos, se utilizará el software Matlab<sup>®</sup>, dada su gran versatilidad, potencia de cálculo, y capacidad de integración con sistemas embebidos mediante comunicación serie.

Durante el ensayo, los valores de tensión y corriente serán enviados desde el microcontrolador a Matlab<sup>®</sup> por el puerto serie UART, con una frecuencia de muestreo de 500 milisegundos. Esta cadencia de envío se considera adecuada, ya que los procesos de carga y descarga tienen una duración del orden de 2 horas, por lo que no se requiere una frecuencia de adquisición alta para registrar adecuadamente la evolución de las variables. Además, esta frecuencia permite minimizar el uso de recursos en el microcontrolador y asegurar una transmisión fiable y estable hacia el entorno Matlab<sup>®</sup>, donde los datos serán almacenados en tiempo real para su posterior análisis.

Para llevar a cabo esta tarea, se ha seleccionado la placa Arduino Uno R3, basada en el microcontrolador ATmega328P. Esta elección se justifica por varios motivos clave:

- **Compatibilidad y ecosistema:** La placa Arduino Uno dispone de una amplia comunidad de usuarios, abundante documentación y gran número de librerías de código abierto. Esto facilita considerablemente el desarrollo y la integración con diferentes módulos. Además, resulta compatible con sensores y dispositivos de comunicación habituales (I2C, SPI), lo cual simplifica la conexión con el resto del sistema.
- **Facilidad de uso:** Aunque el entorno oficial Arduino IDE es suficiente para programar y realizar pruebas iniciales, en este proyecto se opta por utilizar Visual Studio Code junto con la extensión PlatformIO. Esta combinación ofrece una organización más clara del proyecto, mejor gestión de dependencias, integración con control de versiones (Git) y un autocompletado más avanzado. Estas características son especialmente útiles en trabajos que requieren mantener un código ordenado y escalable a medida que aumenta la complejidad.
- **Adecuación a los requisitos:** El Arduino Uno no es la placa más potente de la familia, pero resulta suficiente para los objetivos planteados. En este caso, únicamente se requiere la adquisición de dos señales analógicas (tensión y corriente) y su posterior transmisión por UART. Por este motivo, no se considera necesario recurrir a placas de mayor capacidad, como Arduino Mega, ya que sus recursos adicionales no aportarían ventajas relevantes en el desarrollo.



Figura 4.2. Placa Arduino Uno R3 utilizada como unidad de control y adquisición del sistema [30]

Se ha considerado también la posibilidad de emplear microcontroladores de prestaciones superiores, como los basados en la familia STM32. Estos ofrecen velocidades de procesamiento más altas, mayor cantidad de pines y capacidades avanzadas de comunicación y periféricos. No obstante, estas ventajas no compensan el mayor esfuerzo de configuración, la complejidad del entorno de desarrollo (STM32CubeIDE) y la menor cantidad de librerías de alto nivel disponibles en comparación con el ecosistema Arduino. Además, el tiempo de desarrollo y depuración aumenta considerablemente en proyectos que no requieren dicha capacidad de cómputo.

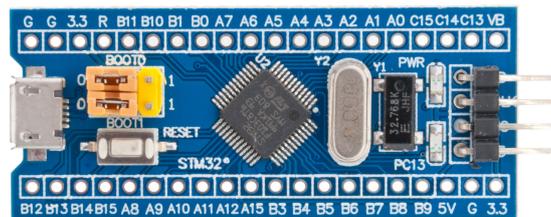


Figura 4.3. Placa STM32 “Blue Pill”, alternativa considerada para el sistema [31]

Por lo tanto, el uso de Arduino Uno supone un equilibrio óptimo entre simpli-

ciudad, fiabilidad, documentación y rapidez de implementación, lo que lo convierte en una plataforma ideal para sistemas de adquisición de datos en entornos experimentales como el presente.

## 4.2. Elección de los sensores de corriente y de tensión

Para realizar una caracterización precisa de los procesos de carga y descarga de la celda de ion-litio, es fundamental contar con sensores que permitan medir de forma fiable y continua las dos variables eléctricas clave: la tensión en bornas de la celda y la corriente que circula por el circuito. Estas magnitudes permitirán calcular la potencia disipada en cada instante y, en consecuencia, la función de pérdidas eléctricas de la celda.

### 4.2.1. Sensor de corriente: Infineon TLI4970-D050T4

Existen diferentes tecnologías y dispositivos disponibles para la medida de corriente, como por ejemplo:

- Sensores basados en efecto Hall con salida analógica, como el ACS712 o el ACS758. Estos requieren una etapa adicional de conversión analógica-digital, son más susceptibles al ruido y presentan un mayor offset y deriva térmica.
- Sensores de derivación shunt, que consisten en una resistencia de muy bajo valor en serie con la carga. Aunque son muy precisos, implican una caída de tensión directa y un cierto grado de disipación térmica, además de requerir amplificadores diferenciales para acondicionar la señal.
- Transformadores de corriente, útiles solo para corriente alterna, por lo que no son adecuados para esta aplicación de corriente continua.

Finalmente, el sensor seleccionado para la medida de corriente es el TLI4970-D050T4 del fabricante Infineon. Este dispositivo está basado en el principio del efecto Hall y ofrece una lectura directa de la corriente sin necesidad de utilizar resistencias de derivación shunt, lo que permite realizar mediciones sin provocar caídas de tensión adicionales ni pérdidas térmicas. Además, cuenta con un diseño completamente digital, con salida de datos a través de una interfaz SPI, lo que

simplifica su integración con el microcontrolador Arduino y proporciona una alta inmunidad al ruido en entornos eléctricos exigentes.

Uno de los aspectos más destacables de este sensor es que presenta un offset de corriente prácticamente nulo y una deriva térmica mínima, lo que mejora considerablemente la precisión a largo plazo en comparación con otras tecnologías. Además, no requiere calibración previa y proporciona valores en tiempo real con una resolución adecuada para las necesidades del presente proyecto.

Cabe destacar también que este tipo de sensores se encuentra ya embebido en algunas placas de desarrollo específicas, lo cual facilita aún más su implementación al no ser necesario diseñar ni fabricar una PCB dedicada para el encapsulado SMD del sensor, reduciendo así tanto los costes como el tiempo de integración del sistema.

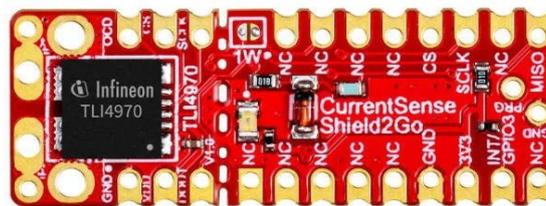


Figura 4.4. Sensor de corriente elegido para los ensayos Infineon TLI4970 con la placa de desarrollo S2GOCURSENSETLI4970TOBO1 [32]

La elección del TLI4970-D050T4 se basa en su facilidad de implementación, su excelente integración con sistemas digitales mediante SPI, su precisión sin necesidad de calibración, y su inmunidad a factores externos, lo que lo convierte en una opción muy adecuada para entornos de ensayo como el presente.

#### 4.2.2. Sensor de tensión: módulo ADC de 16 bits I2C

Para la medición de la tensión en bornas de la celda de ion-litio, se ha utilizado un módulo convertidor analógico-digital ADC de 16 bits con comunicación I2C, concretamente el módulo Gravity: I2C V1.0 del fabricante DFRobot. Este módulo permite digitalizar señales de hasta 5 V con una resolución muy superior a la que proporciona el ADC interno del Arduino Uno.

La elección de un ADC externo se debe a que el conversor integrado en el Arduino tiene una resolución de tan solo 10 bits, lo que implica una cuantización de la señal que puede no ser suficiente para detectar pequeñas variaciones de

tensión durante la carga o descarga. Esto es especialmente importante en este proyecto, ya que se trabaja con celdas de ion-litio cuya tensión varía en un rango de aproximadamente 2.5 V a 4.1 V, dentro del límite de entrada del ADC, pero con cambios muy progresivos que deben registrarse con la mayor fidelidad posible.

La resolución del ADC interno del Arduino es:

$$\Delta V_{\text{Arduino}} = \frac{V_{\text{ref}}}{2^{10}} = \frac{5 \text{ V}}{1024} \approx 4,88 \text{ mV} \quad (4.1)$$

Mientras que la resolución del ADC externo de 16 bits es:

$$\Delta V_{\text{ADC}} = \frac{V_{\text{ref}}}{2^{16}} = \frac{5 \text{ V}}{65536} \approx 76,3 \mu\text{V} \quad (4.2)$$

Como puede observarse, la diferencia es significativa: el ADC externo permite detectar variaciones más de 60 veces menores que el integrado en el Arduino, lo cual es especialmente útil para estimar con precisión el valor instantáneo de la tensión y, por tanto, el cálculo de potencia y pérdidas eléctricas.

Además, el módulo Gravity está diseñado para una integración sencilla con plataformas como Arduino, y cuenta con librerías ya disponibles para facilitar su implementación. La comunicación I2C empleada por este sensor permite conectarlo fácilmente al bus del microcontrolador sin necesidad de muchas líneas adicionales, y además permite coexistir con otros dispositivos en el mismo bus de datos.

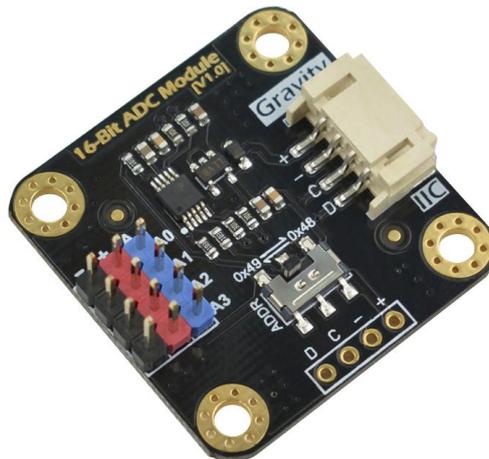


Figura 4.5. Módulo ADC de 16 bits Gravity I2C utilizado para la adquisición de la tensión de la celda [33]

Aunque en este proyecto ambos convertidores, tanto el integrado en la placa Arduino como el ADC externo, serían válidos desde el punto de vista del rango de tensión manejado, la mayor resolución del ADC externo justifica ampliamente su elección, especialmente en ensayos donde es necesario registrar con precisión pequeñas variaciones de tensión a lo largo del tiempo.

### 4.3. Conexionado de los componentes a la placa controladora

Una vez seleccionados los sensores y dispositivos que componen el sistema de medida y control, es necesario establecer el conexionado de todos ellos a la placa controladora, en este caso, un Arduino Uno.

La placa Arduino actuará como núcleo del sistema de control de 5 V, encargándose de gestionar la lectura de los sensores, el control del proceso de carga y descarga de la celda, y la transmisión de los datos adquiridos al entorno Matlab<sup>®</sup> a través de comunicación serie UART.

El sensor de corriente TLI4970 se conecta al Arduino mediante la interfaz SPI. Aunque el protocolo SPI estándar contempla cuatro líneas: MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out), SCK (Serial Clock) y CS (Chip Select), en este caso solo se utilizan tres: MISO, SCK y CS, ya que el sensor de corriente únicamente transmite datos y no necesita recibir ninguna instrucción. Es un dispositivo que, una vez inicializado, comienza a emitir de forma continua las muestras de corriente sin necesidad de comandos externos.

Las conexiones realizadas son las siguientes:

- MISO → pin digital 12 del Arduino
- SCK → pin digital 13 del Arduino
- CS → pin digital 10 del Arduino

Dado que el sensor opera a 3,3 V y el Arduino Uno trabaja con niveles lógicos de 5 V, es necesario proteger las entradas del sensor. Las líneas SCK y CS, que son generadas por el Arduino, se deben adaptar mediante divisores de tensión para reducir los 5 V a los 3,3 V que soporta el sensor de corriente. Para ello se emplea un divisor resistivo con resistencias de 2 k $\Omega$  y 1 k $\Omega$ , que entrega aproximadamente 3,3 V al sensor. La alimentación del TLI4970 se realiza a partir del pin de 3,3 V

que proporciona directamente la placa Arduino Uno, lo que permite alimentar el sensor sin necesidad de reguladores externos.

En cambio, la línea MISO, que transmite datos desde el sensor hacia el Arduino, no requiere ningún tratamiento. El nivel alto de salida del sensor es de 3,3 V, lo cual es perfectamente reconocido por el Arduino Uno como un valor lógico alto, ya que su umbral de detección para nivel alto suele estar en torno a 3 V.

En cuanto a la recepción de datos, línea MISO, que transmite datos desde el sensor hacia el Arduino, puede conectarse directamente sin necesidad de adaptación. Esto es posible porque el nivel alto de salida del sensor es de 3,3 voltios, valor que el Arduino Uno reconoce correctamente como un nivel lógico alto. El umbral de reconocimiento para un valor lógico alto en las entradas digitales del Arduino se sitúa por debajo de 3 voltios, por lo que una señal de 3,3 voltios es interpretada sin problemas como un uno lógico.

El conexionado es el siguiente:

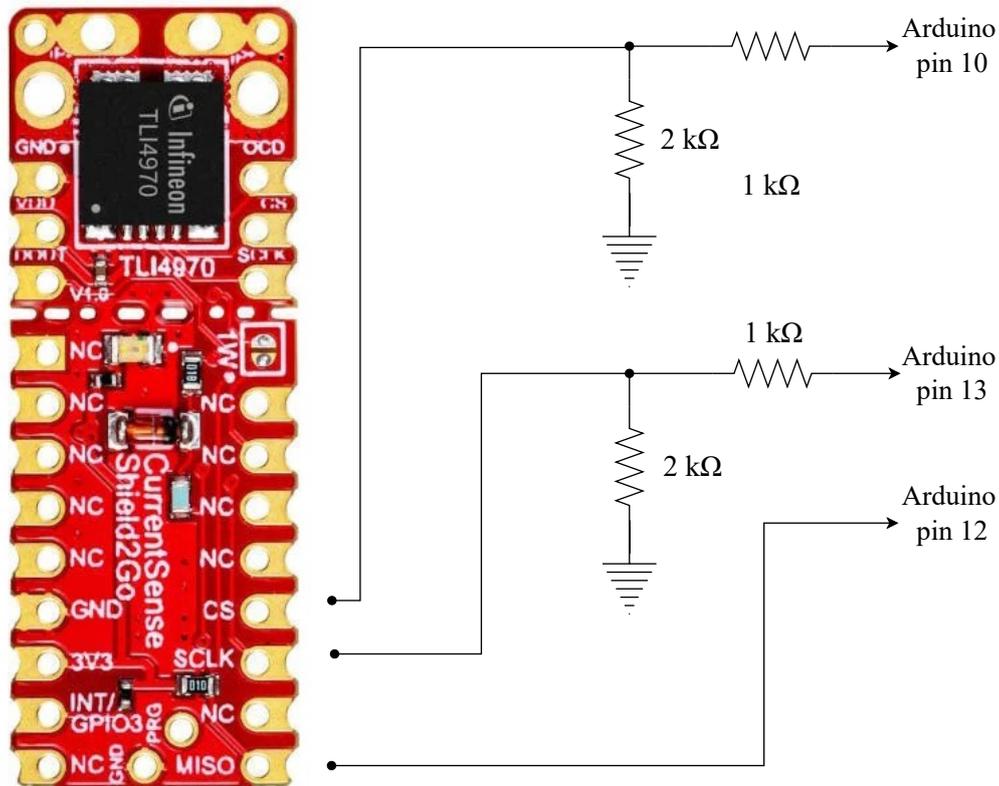


Figura 4.6. Conexión del sensor de corriente TLI4970 al microcontrolador Arduino Uno, incluyendo los divisores de tensión en las líneas SCK y CS para la adaptación de niveles lógicos.

Por otro lado, el sensor de tensión empleado, un módulo ADC de 16 bits con interfaz I2C, opera directamente a 5 V, por lo que puede conectarse sin ningún tipo de adaptación. Las conexiones se realizan de la siguiente manera:

- SDA → pin analógico A4 del Arduino siendo la línea de datos
- SCL → pin analógico A5 del Arduino siendo la línea de reloj

La alimentación del módulo ADC se conecta a los pines de 5 V y GND del Arduino Uno, de forma directa.

En cuanto a los elementos de control de potencia, el transistor MOSFET IRFZ46N, encargado de cerrar o abrir el circuito de descarga, se activa mediante una señal

digital enviada desde el pin 7 del Arduino. Del mismo modo, el relé de tipo TE Connectivity ECP40BAAAAA, utilizado para abrir el circuito de carga, es activado desde el pin 6.

A continuación, se muestra el pinout completo de la placa Arduino Uno, con el que se puede identificar visualmente cada una de las conexiones mencionadas:

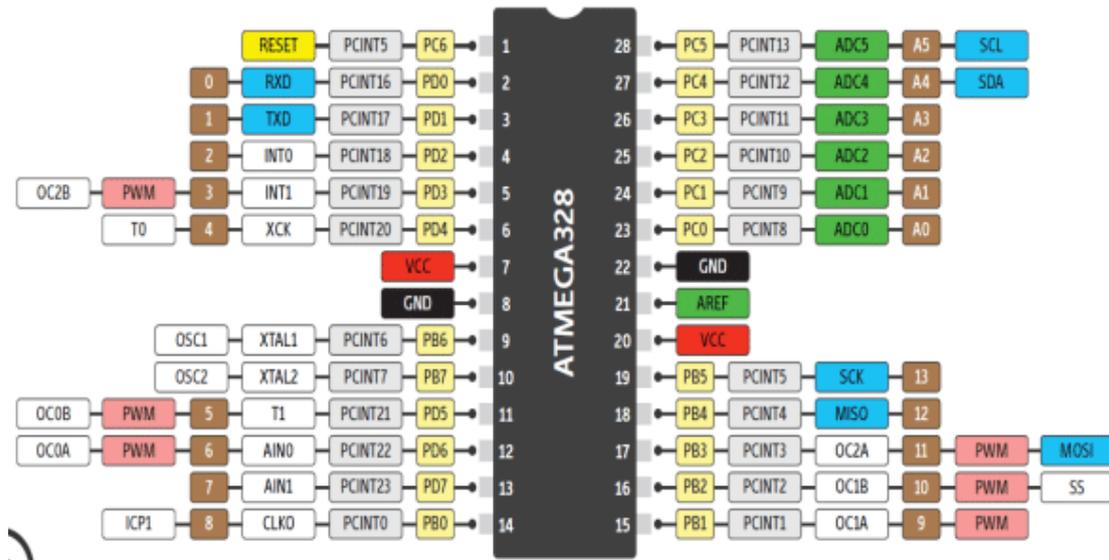


Figura 4.7. Distribución de pines de la placa Arduino Uno utilizada en el sistema [34]

A continuación, se muestran los esquemas eléctricos que resumen las conexiones entre la celda, los sensores, el Arduino Uno y los componentes de potencia, tanto para el modo de carga como para el modo de descarga:

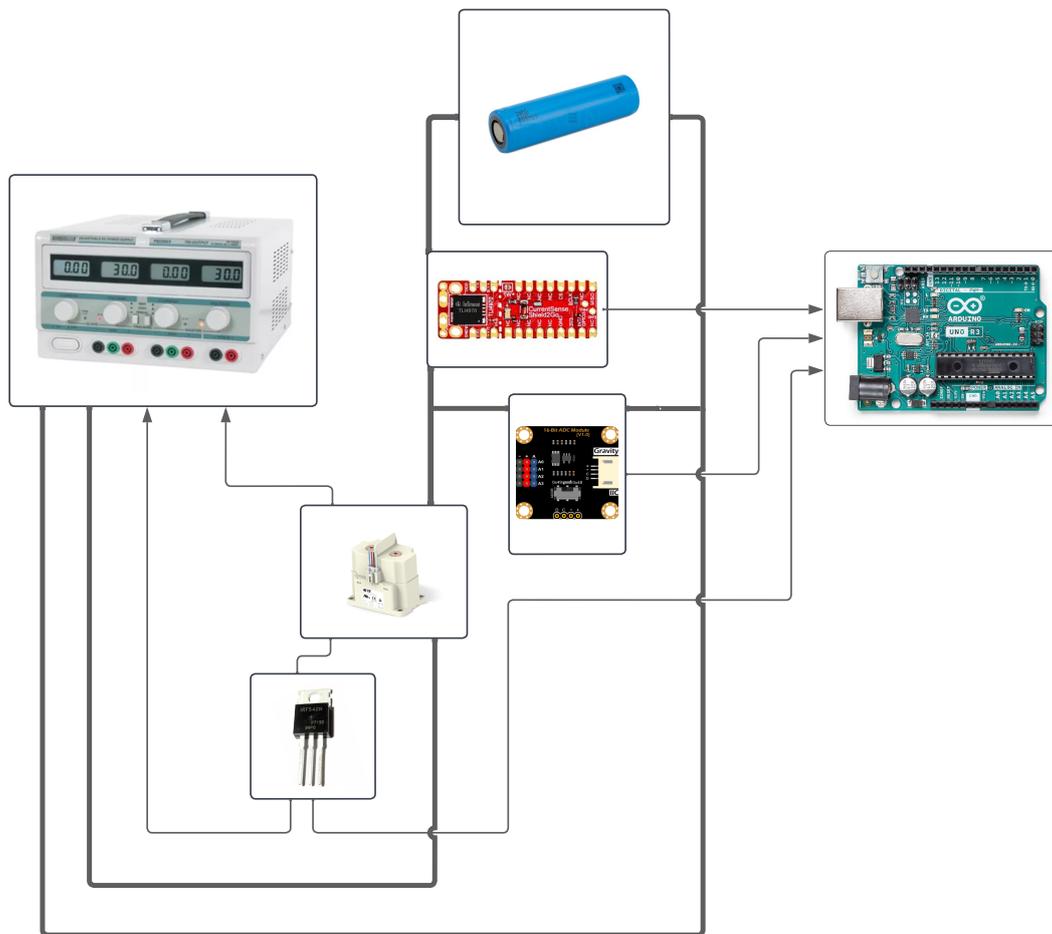


Figura 4.8. Esquema de conexión del sistema durante el proceso de carga. Se observa la conexión de la fuente de tensión, el relé de control, los sensores de medida y su interfaz con la placa Arduino.

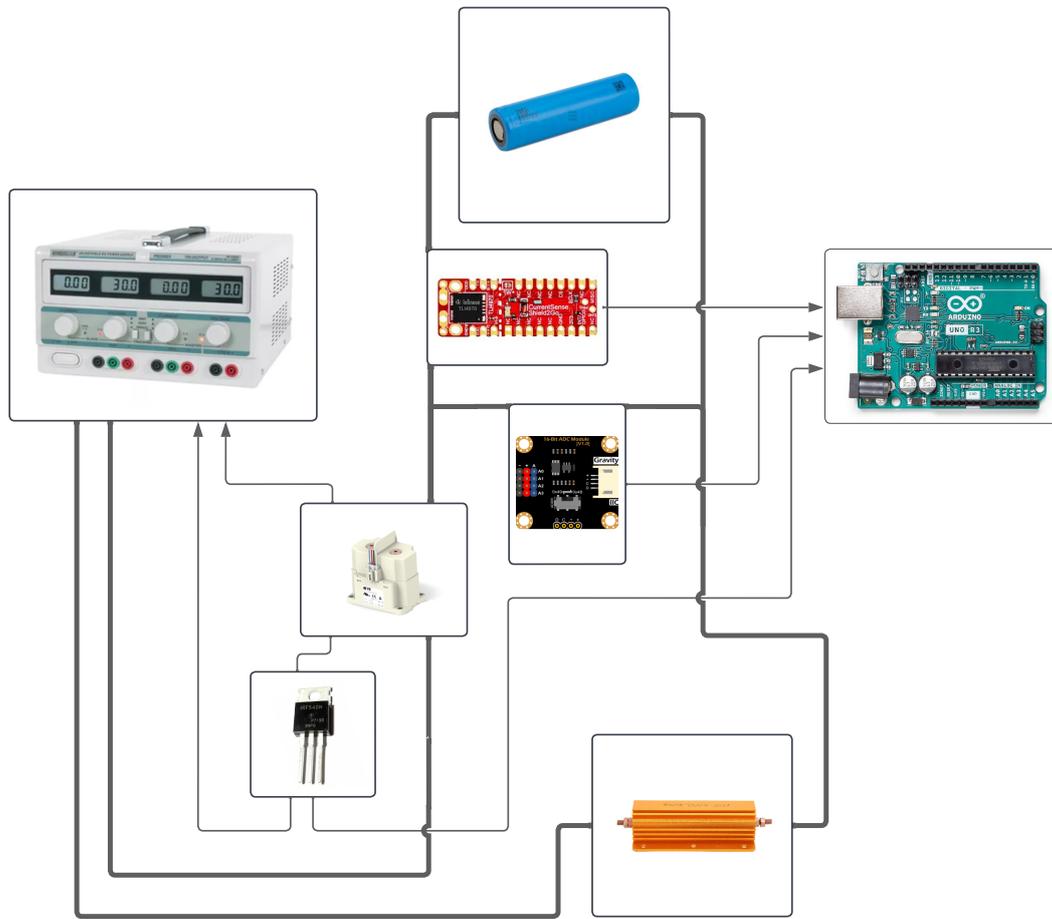


Figura 4.9. Esquema de conexionado del sistema durante el proceso de descarga. Se observa la conexión de la fuente de tensión, el relé de control, los sensores de medida y su interfaz con la placa Arduino.

Como puede observarse, la estructura del sistema se adapta solo en la parte de disipación de la energía en la resistencia de potencia y la fuente de tensión en función de la fase del ensayo carga-descarga, manteniendo siempre conectados los sensores al microcontrolador y asegurando una monitorización continua de las variables eléctricas. Esta configuración permite automatizar el proceso de adquisición de datos y aplicar criterios de seguridad en tiempo real mediante programación.

## 4.4. Programación de la placa controladora

La programación de la placa Arduino Uno ha sido desarrollada en lenguaje C++ utilizando el entorno de desarrollo PlatformIO sobre Visual Studio Code. El código implementado tiene como objetivo adquirir las variables eléctricas del sistema corriente, tensión y temperatura, procesarlas, transmitir las por UART a Matlab<sup>®</sup> y realizar acciones de control y protección sobre la celda de ion-litio.

### 4.4.1. Estructura general del código

El programa se estructura en dos bloques principales: `setup()` y `loop()`. En el bloque `setup()`, se inicializan los periféricos: el sensor de corriente TLI4970 SPI, el ADC de 16 bits I2C, y el termistor conectado al sistema. También se configuran los pines digitales del Arduino correspondientes a la activación del circuito de descarga pin 8, el LED de fallo pin 4, y la señal de reset pin 7.

En el bloque `loop()`, se ejecuta de forma periódica la adquisición de datos, con una frecuencia de muestreo de 500 milisegundos. Este valor se ha elegido porque permite registrar adecuadamente los procesos de carga y descarga de la celda, que tienen duraciones del orden de 2 horas. Además, esta frecuencia no sobrecarga la interfaz UART, asegurando una transmisión robusta de datos hacia Matlab<sup>®</sup> para su almacenamiento y análisis en tiempo real.

### 4.4.2. Adquisición de variables eléctricas

La lectura de tensión se realiza a través del convertidor analógico-digital ADS1115, configurado para funcionar en modo continuo con autorango y resolución de 16 bits. Se emplea una media móvil de 10 muestras para reducir el ruido y obtener un valor más estable:

$$V_{\text{celda}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (4.3)$$

donde  $V_i$  son las muestras adquiridas en milivoltios y  $n = 10$ .

La corriente es medida mediante el sensor TLI4970 de Infineon, el cual entrega directamente el valor digital leído por SPI sin necesidad de calibración ni conversión

adicional. La temperatura es adquirida a partir de un termistor NTC mediante una función externa para obtener la temperatura en grados Celsius.

### 4.4.3. Transmisión de datos y supervisión

Los datos adquiridos se envían por puerto serie mediante el protocolo UART, con una velocidad de transmisión de 9600 baudios. El formato de envío es compacto y estructurado, incluyendo el tiempo en milisegundos desde el inicio, la tensión, la corriente, la temperatura y un flag de seguridad:

T:tiempo V:voltaje C:corriente T:temperatura F:flag

Este paquete es leído por Matlab<sup>®</sup> para representar y almacenar la evolución de las variables del sistema durante el ensayo.

### 4.4.4. Control de seguridad

El sistema implementa varias condiciones de protección para evitar operar la celda fuera de sus límites seguros:

- Si la tensión supera los 3600 mV o desciende por debajo de 2500 mV.
- Si la corriente absoluta excede los 30 A.
- Si la temperatura supera los 60 °C.

En cualquiera de estos casos, se activa una señal digital que desactiva el pin 8 (conectado al MOSFET de descarga), se activa el LED de fallo (pin 4) y se eleva un flag lógico. Esta lógica de protección evita daños a la celda y permite la intervención manual para el reinicio del sistema mediante el pin de reset.

## 4.5. Montaje final

Una vez definidos y ensamblados todos los componentes electrónicos del sistema, así como programada la lógica de control, se ha procedido al montaje físico final del prototipo. Este montaje incluye la conexión de los sensores de corriente y tensión

al microcontrolador Arduino Uno, el cableado hacia los actuadores de carga y descarga (MOSFET y relé), y la disposición estructurada de todo el conjunto sobre una base aislada para facilitar su manipulación y visualización durante los ensayos.

A continuación se muestran dos imágenes representativas del montaje final del sistema:

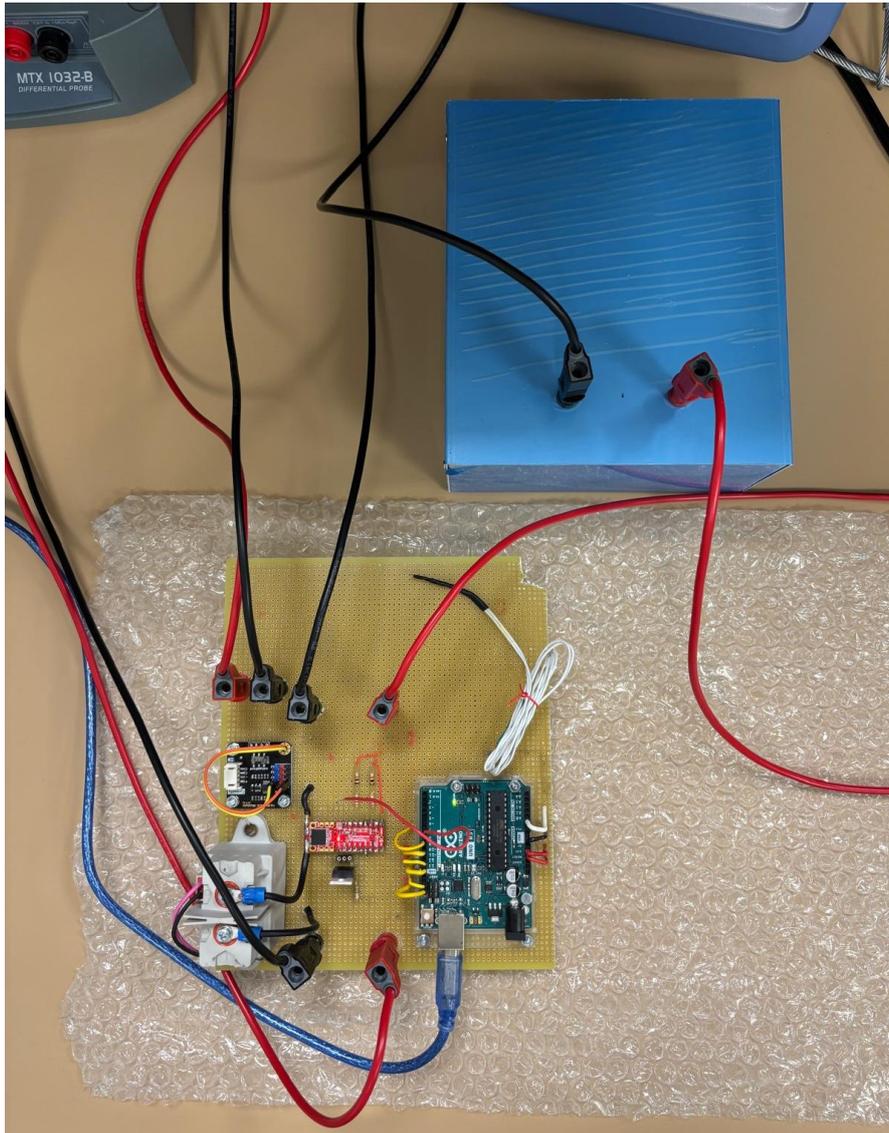


Figura 4.10. Vista general del sistema de adquisición montado con el Arduino Uno y sensores conectados

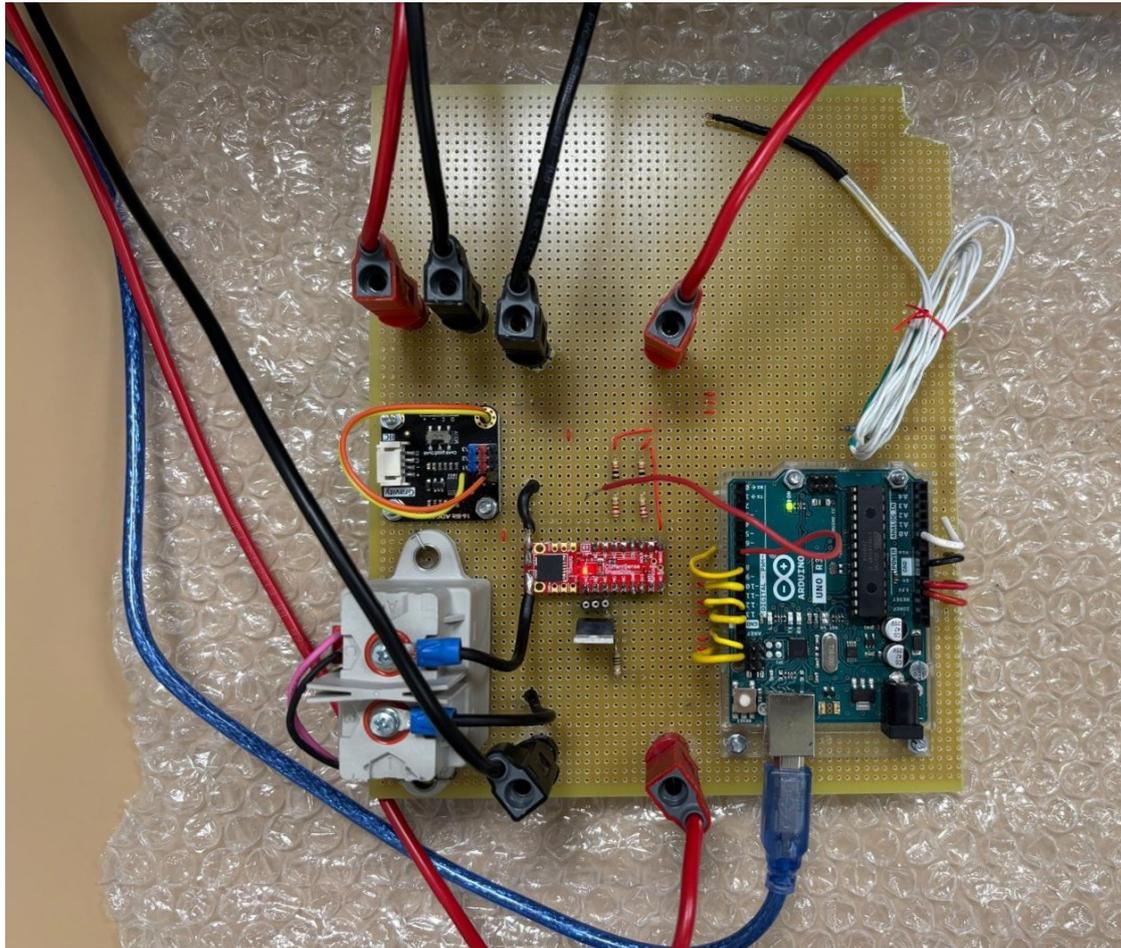


Figura 4.11. Detalle del conexionado entre la placa controladora y los sensores de corriente y tensión

## 4.6. Monitorización durante el experimento

Una vez programada la placa de control y conectado todo el sistema, se ha desarrollado un script en Matlab<sup>®</sup> para realizar la adquisición y visualización en tiempo real de los datos enviados desde el Arduino. Este sistema de monitorización permite observar en vivo las variables eléctricas y térmicas más relevantes durante los procesos de carga y descarga de la celda.

Cada 500 milisegundos, el Arduino transmite una línea de texto con los valores de tiempo, tensión, corriente, temperatura y el estado del flag OCV, que toma un valor lógico 1 si el relé está abierto, y, por lo tanto, la tensión medida es la de vacío

con corriente nula, o un 0 en el caso en el que el relé esté cerrado y por lo tanto la lectura de la tensión no es la de OCV.

En Matlab<sup>®</sup>, los datos se procesan en tiempo real para calcular magnitudes adicionales como la potencia instantánea, la energía acumulada y la capacidad entregada en (mAh), utilizando las siguientes expresiones:

$$P(t) = V(t) \cdot I(t) \quad (4.4)$$

$$E(t) = \int_0^t P(t) dt \approx \sum \left( \frac{P_i + P_{i-1}}{2} \right) \Delta t \quad (4.5)$$

$$Q(t) = \int_0^t I(t) dt \approx \sum I_i \cdot \frac{\Delta t}{3600} \cdot 1000 \quad (4.6)$$

La Figura 4.12 muestra la interfaz en Matlab<sup>®</sup> donde se representan en vivo seis subgráficas: tensión, corriente, potencia, energía, capacidad acumulada y estado del flag OCV. Las etiquetas laterales se actualizan dinámicamente para mostrar los valores instantáneos con mayor claridad, permitiendo así una supervisión detallada del comportamiento de la celda.

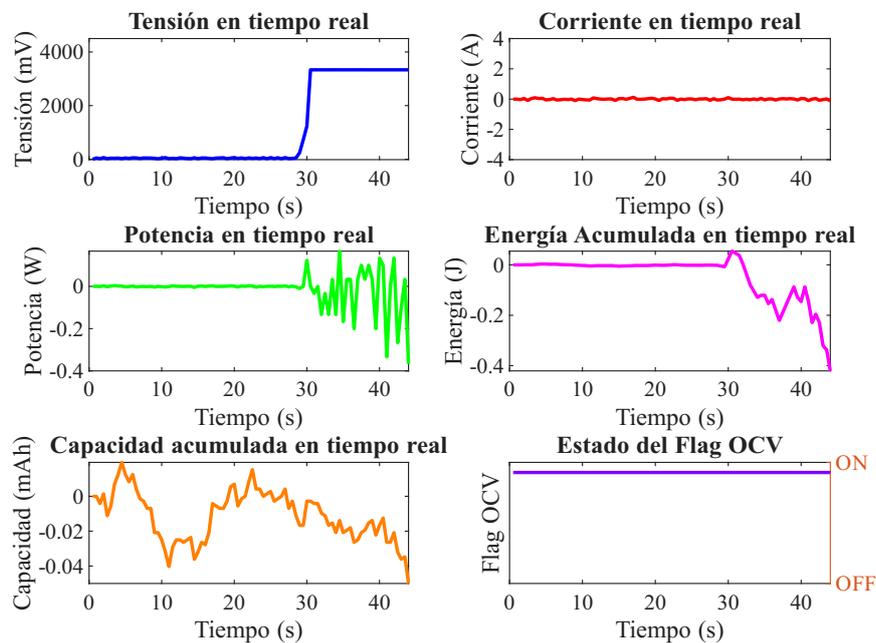


Figura 4.12. Interfaz de Matlab<sup>®</sup> utilizada para la adquisición y monitorización en tiempo real del experimento

Cuando se presiona la tecla **q**, la adquisición se detiene y todos los datos recopilados se almacenan en una estructura Matlab<sup>®</sup> para su análisis posterior, incluyendo tiempo, tensión, corriente, energía, temperatura y capacidad acumulada.

Se observa en este ejemplo, en el que las mediciones se realizan en vacío, cómo hay cierto ruido en las señales, propio del comportamiento de sensores reales que no miden con total precisión. Este ruido será mitigado posteriormente mediante la aplicación de técnicas de filtrado, en particular a través de medias móviles, que permiten suavizar las señales y mejorar la interpretación de los datos registrados.

# 5 Ensayos

Para comenzar con los ensayos experimentales, se utilizarán inicialmente las celdas de tipo  $LiFePO_4$ , debido a que presentan un mayor nivel de seguridad en comparación con otras químicas de litio. En caso de que ocurra algún fallo durante el procedimiento, estas celdas no emiten fuego en ningún momento, lo que las convierte en una opción más estable para las primeras pruebas. Esta característica es especialmente relevante en entornos de laboratorio no dedicados exclusivamente a pruebas electroquímicas, donde las medidas de contención pueden ser más limitadas.

## 5.1. Ensayo de carga y descarga profunda

Con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del sistema de adquisición, caracterizar los parámetros eléctricos de la celda y obtener una estimación precisa de la relación entre el estado de carga SoC y la tensión terminal, se llevó a cabo un ensayo de carga y descarga profunda. Esta prueba inicial también se empleó como fase de validación del montaje experimental, permitiendo confirmar que todas las magnitudes relevantes (tensión, corriente y temperatura) eran registradas correctamente y con la resolución temporal requerida.

Durante el ensayo se obtuvieron las curvas de tensión correspondientes a los procesos de descarga y carga, ambos realizados bajo condiciones de corriente constante. La información recopilada se utilizará posteriormente para validar un modelo electroquímico de tipo Shepherd extendido y para estimar los parámetros característicos de la celda mediante técnicas de ajuste no lineal.

Los ensayos se efectuaron aplicando distintas tasas de corriente, expresadas en función de la tasa C. Esta unidad, ampliamente utilizada en la caracterización de baterías, se define como la corriente que permitiría una carga o descarga completa en una hora. Así, una tasa de 1 C implica una corriente igual a la capacidad nominal de la celda (en amperios), mientras que tasas de 0,5 C o 1,5 C corresponden, respectivamente, a descargar la celda al 50 % o al 150 % de la corriente nominal.

La relación entre la tasa C y la corriente aplicada se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\text{Corriente de carga o descarga (mA)}}{\text{Capacidad nominal de la batería (mAh)}} \quad (5.1)$$

A continuación, se muestran las tres tasas de descarga elegidas de forma arbitraria que se encuentran dentro de los límites de corriente capaces de suministrar por las fuentes de tensión del laboratorio a las que se han realizado los ensayos de carga y descarga.

Tasa C	Q nominal (mAh)	Corriente (mA)
0.5 C	1500	750
1.0 C	1500	1500
1.5 C	1500	2.25

Tabla 5.1: Corrientes aplicadas durante los ensayos en función de la tasa C, para celdas  $LiFePO_4$  con capacidad nominal de 1500 mAh.

A continuación, en la Figura 5.2 se presentan los resultados obtenidos para el proceso de carga:

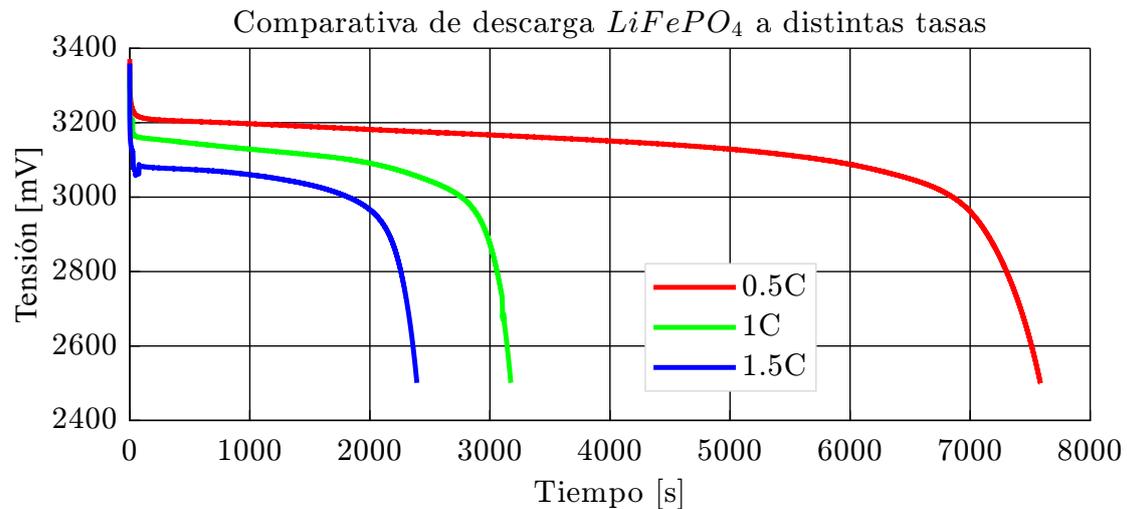


Figura 5.1. Curva de tensión registrada durante una descarga profunda de la celda  $LiFePO_4$ . Se aprecia la evolución característica de la tensión conforme el estado de carga (SoC) disminuye y la duración del ensayo a distintos ratios de descarga C.

Los resultados para la carga se muestran en la Figura 5.1:

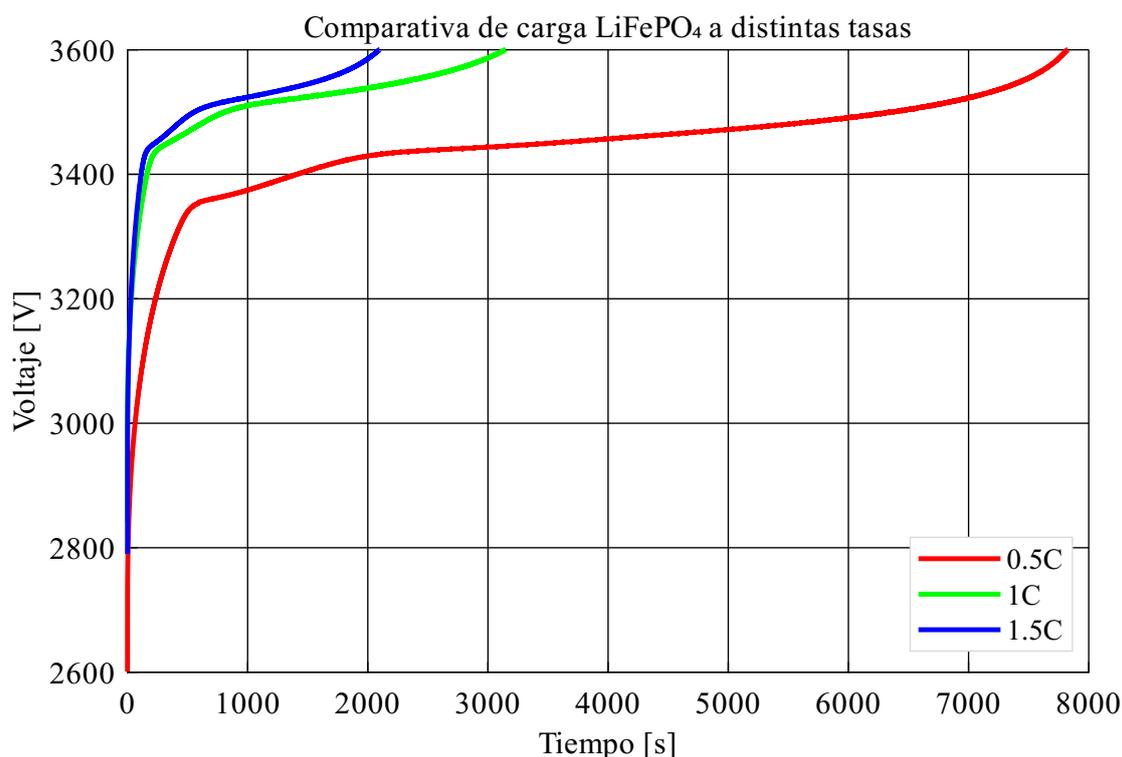


Figura 5.2. Curva de tensión registrada durante una carga profunda de la celda  $LiFePO_4$  a distintos ratios de carga C. Se aprecia la evolución característica de la tensión conforme el estado de carga (SoC) aumenta. La meseta central es indicativa del comportamiento típico de esta química.

Finalmente, se ha podido exportar con éxito la información obtenida durante los ensayos a un fichero de MATLAB en formato `.mat`. Este fichero almacena un `struct` que contiene las siguientes variables relevantes para el análisis posterior:

- **tiempo:** Vector columna que contiene los instantes de tiempo en segundos en los que se adquirieron las muestras.
- **voltaje:** Vector columna con las medidas de tensión de la celda en milivoltios en bornas a cada instante de tiempo.
- **corriente:** Vector columna con las medidas de corriente en amperios, positiva para carga y negativa para descarga.
- **potencia:** Vector columna con las medidas de potencia instantánea en vatios entregada o absorbida por la celda.

- **energía:** Vector columna con las medidas de energía extraída o inyectada en la celda en julios.
- **temperatura:** Vector columna que almacena la temperatura registrada en grados Celsius durante el ensayo.
- **OCV:** Vector columna con la variable binaria que indica 1 si el circuito está abierto y 0 si está en carga.
- **mAh:** Vector columna con la estimación del estado de carga calculada mediante integración de la corriente.

A continuación, se detallan los métodos empleados para calcular cada una de estas variables a partir de las mediciones obtenidas durante los ensayos:

- **Tiempo ( $\tau$ ):** Se obtiene directamente de los datos adquiridos, expresado en segundos, mediante la conversión de la unidad original de milisegundos a segundos.
- **Tensión ( $V$ ):** Valor instantáneo medido en milivoltios directamente en los bornes de la celda.
- **Corriente ( $I$ ):** Valor instantáneo de la corriente en amperios, con signo positivo para carga y negativo para descarga.
- **Potencia ( $P$ ):** Calculada instantáneamente como el producto del voltaje (en voltios) por la corriente (en amperios), es decir,  $P = V \times I$ .
- **Energía ( $J$ ):** Determinada mediante integración numérica trapezoidal de la potencia respecto al tiempo, expresando la energía acumulada en julios:

$$J_k = J_{k-1} + \frac{(P_k + P_{k-1})}{2} \times (t_k - t_{k-1})$$

- **Temperatura ( $T$ ):** Medida directa en grados Celsius obtenidos directamente del sensor.
- **Flag de circuito abierto (OCV):** Variable binaria que indica si el transistor está abierto (1) o si está cerrado(0).
- **Capacidad acumulada (mAh):** Estimación del estado de carga obtenida mediante integración numérica de la corriente sobre el tiempo, convertida a miliamperios-hora (mAh):

$$Q_k = Q_{k-1} + I_k \times \frac{\Delta t}{3600} \times 1000$$

donde  $I_k$  es la corriente en amperios y  $\Delta t$  el intervalo de tiempo en segundos.

## 5.2. Capacidad acumulada durante la carga y descarga

La capacidad de una celda, expresada en mAh o Ah, es una magnitud fundamental en su caracterización. Esta se obtiene mediante la integración de la corriente suministrada durante el proceso de descarga, según la siguiente expresión:

$$Q = \int_{t_0}^{t_f} I(t) dt \quad (5.2)$$

Se procedió a comprobar la capacidad real de la celda, dado que es habitual la existencia de variaciones entre unidades debido a tolerancias en los procesos de fabricación. Además, este análisis permitió verificar la precisión y fiabilidad del método de *Coulomb Counting* para la estimación del estado de carga (SoC) en condiciones prácticas.

Con el fin de cuantificar esta magnitud, se emplearon los datos de descarga y carga obtenidos en el apartado anterior para diferentes tasas de corriente, obteniéndose los resultados mostrados a continuación.

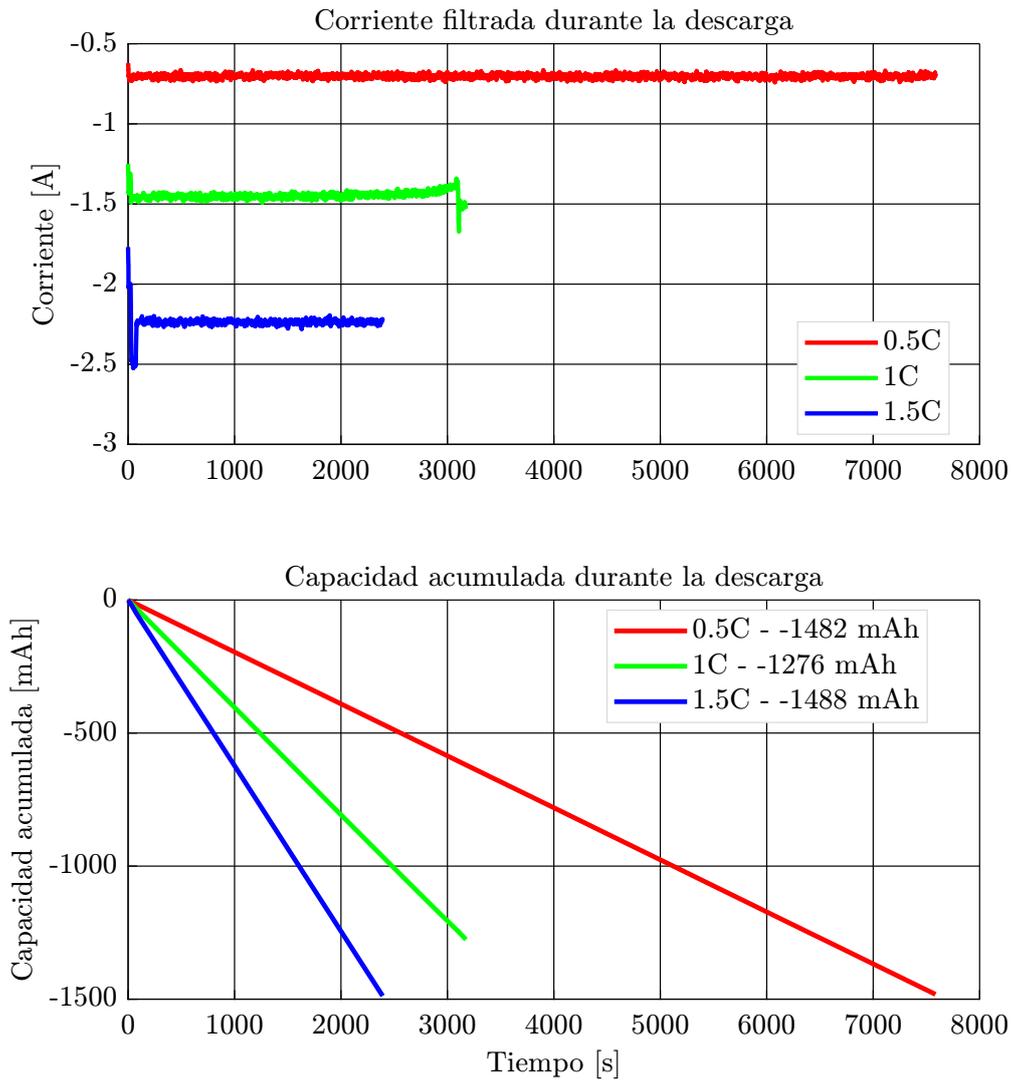


Figura 5.3. Capacidad acumulada durante las descargas realizadas a distintas tasas de corriente. Se observa una ligera reducción de la capacidad efectiva conforme aumenta la corriente, atribuible a la caída de tensión interna y a los efectos de polarización.

Los resultados reflejan una tendencia decreciente de la capacidad útil al incrementar la tasa de descarga. Este comportamiento resulta coherente con el modelo electroquímico, ya que a mayores corrientes se producen mayores caídas de tensión debidas a la resistencia interna, lo que provoca la activación prematura del límite inferior de tensión y, por tanto, una extracción parcial de la carga total almacenada.

Del mismo modo, se llevaron a cabo los ensayos correspondientes para el proceso de carga profunda bajo las mismas condiciones de corriente. La Figura 5.4 representa la capacidad acumulada registrada durante la carga.

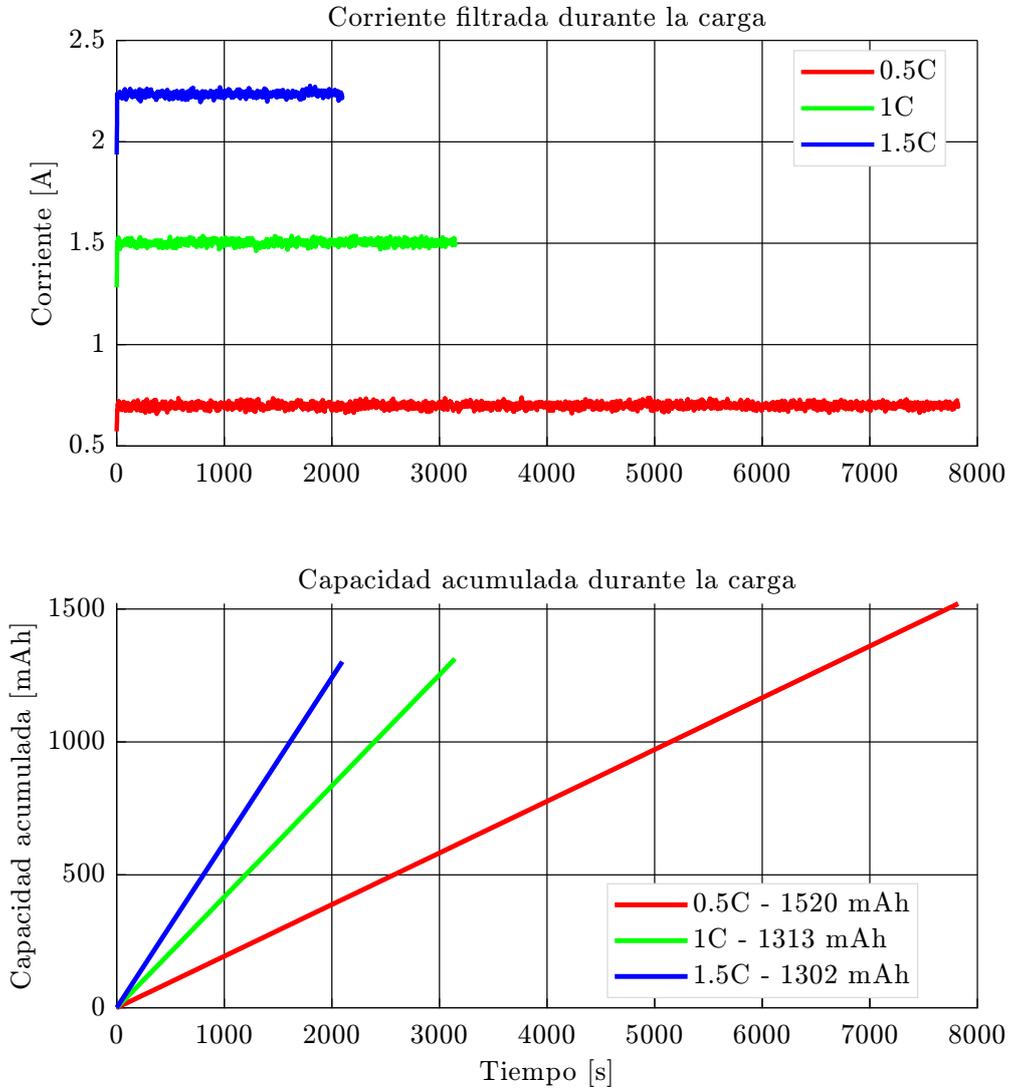


Figura 5.4. Capacidad acumulada durante los procesos de carga realizados a distintas tasas de corriente. La linealidad de las curvas y la coincidencia en los valores finales validan la fiabilidad del procedimiento de integración.

En ambos casos, los valores alcanzados se encuentran próximos a la capacidad nominal indicada por el fabricante, 1500 mAh, lo que permite validar tanto el sistema de adquisición como la metodología de integración empleada.

Por otro lado, debe destacarse que, en celdas de tipo  $LiFePO_4$ , la curva de tensión se mantiene prácticamente constante durante gran parte del intervalo operativo. Esta meseta de tensión dificulta la estimación del estado de carga a partir de mediciones de voltaje, dado que pequeñas variaciones en la tensión no se traducen en cambios representativos en el SoC.

En este contexto, el método de Coulomb Counting, basado en la integración de la corriente, se posiciona como la técnica más adecuada para el seguimiento del SoC. La precisión observada en los valores de capacidad acumulada respalda esta afirmación, tal y como se recoge también en la bibliografía especializada.

### 5.3. Caracterización de los parámetros de la celda

La caracterización de los parámetros eléctricos de la celda se realiza empleando el modelo Shepherd con término exponencial. Este modelo permite representar la tensión en bornas  $V(t)$  como una función de la corriente instantánea, la capacidad acumulada y un conjunto de parámetros eléctricos característicos de la celda.

Para la identificación de dichos parámetros, se utilizan los datos experimentales obtenidos en los ensayos realizados a diferentes tasas de descarga (0.5 C, 1 C y 1.5 C), correspondientes a tres conjuntos de datos independientes. Además, como se menciona en la literatura [26], estos parámetros se obtienen de la descarga de estas celdas a diferentes tasas de corriente.

El modelo Shepherd para la descarga empleado se expresa matemáticamente como:

$$V_{bat}(t) = E_0 - R \cdot i(t) - K \frac{Q}{Q - it} (i^*(t) + i(t)) + A \cdot e^{-B \cdot i(t)} \quad (5.3)$$

donde:

- $i^*(t)$  es la corriente filtrada mediante media móvil con una ventana de 10 muestras,
- $i(t)$  es integral de corriente extraída de la celda a lo largo del tiempo medida en Ah,

El ajuste de los parámetros  $R, K, A, B, E_0$  se lleva a cabo mediante un método de mínimos cuadrados no lineales, utilizando la función `lsqnonlin` de Matlab<sup>®</sup>,

con el objetivo de minimizar la diferencia cuadrática media entre el voltaje medido y el simulado por el modelo para cada conjunto de datos.

Inicialmente, se realiza un ajuste de parámetros para cada curva de descarga de forma independiente, obteniéndose parámetros específicos y distintos para cada curva, lo cual es consistente dado que cada ensayo constituye una aproximación particular a la respuesta real de la celda bajo condiciones ligeramente diferentes.

Los resultados son los siguientes:

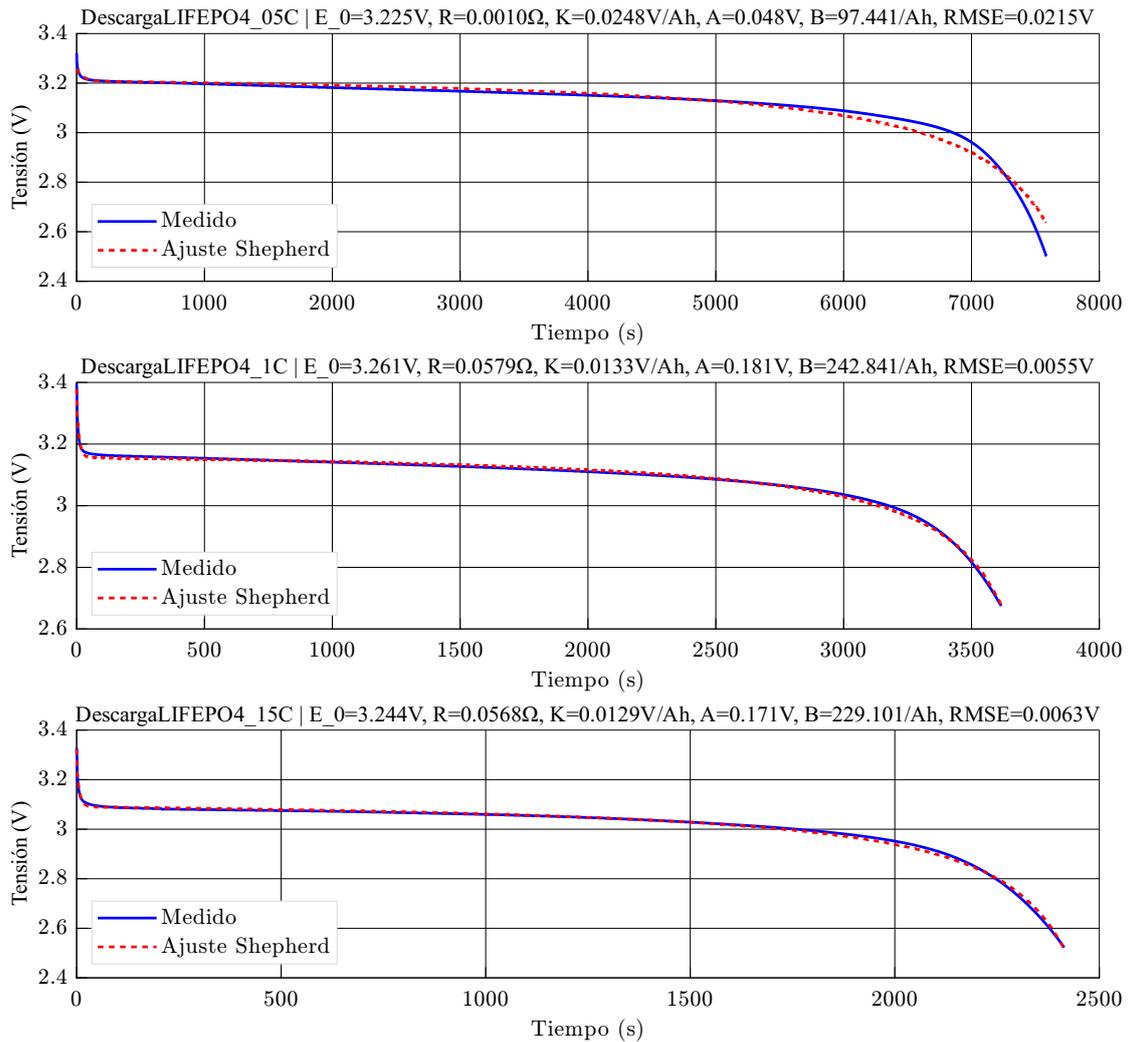


Figura 5.5. Ajuste del modelo de Shepherd con término exponencial para cada una de las curvas de descarga individualmente. Se observa una buena concordancia entre la tensión medida y la estimada para todos los regímenes de corriente.

Los parámetros obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 5.2: Parámetros del modelo de Shepherd ajustados para cada curva de descarga.

Régimen	$E_0$ [V]	$R$ [ $\Omega$ ]	$K$ [V/Ah]	$A$ [V]	$B$ [1/Ah]	RMSE [V]
0.5C	3.225	0.0010	0.0248	0.048	97.441	0.0215
1C	3.261	0.0579	0.0133	0.181	242.841	0.0055
1.5C	3.244	0.0568	0.0129	0.171	229.101	0.0063

Además, se muestra el valor y la influencia que tiene sobre el voltaje en bornas de la celda cada término de la ecuación, a continuación:

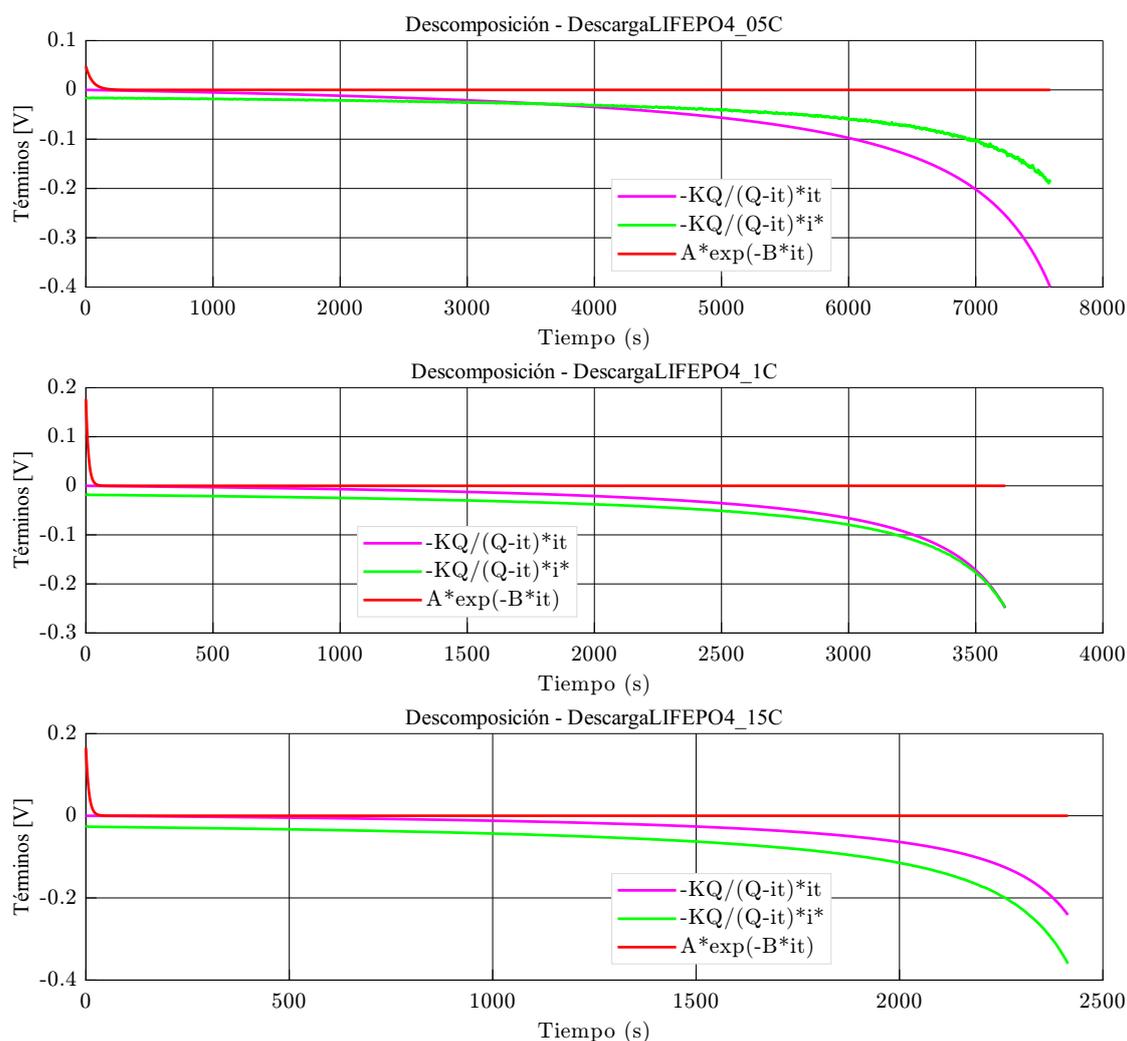


Figura 5.6. Descomposición de los términos que forman el modelo de Shepherd ajustado individualmente. Se representa la contribución de los terminos de (5.3) a la tensión  $V_{bat}(t)$  de la celda a lo largo del tiempo.

Por esta razón, se decide obtener un único conjunto de parámetros para la celda que se ajuste de la mejor forma posible a las diferentes curvas de descarga. El conjunto de parámetros obtenido en la optimización global sobre los tres datasets representa una estimación genérica y válida para modelar el comportamiento general de la celda en el rango de condiciones analizado.

Se obtiene un ajuste global al dataset de tres descargas a 0.5 C, 1 C y 1.5 C de la siguiente forma:

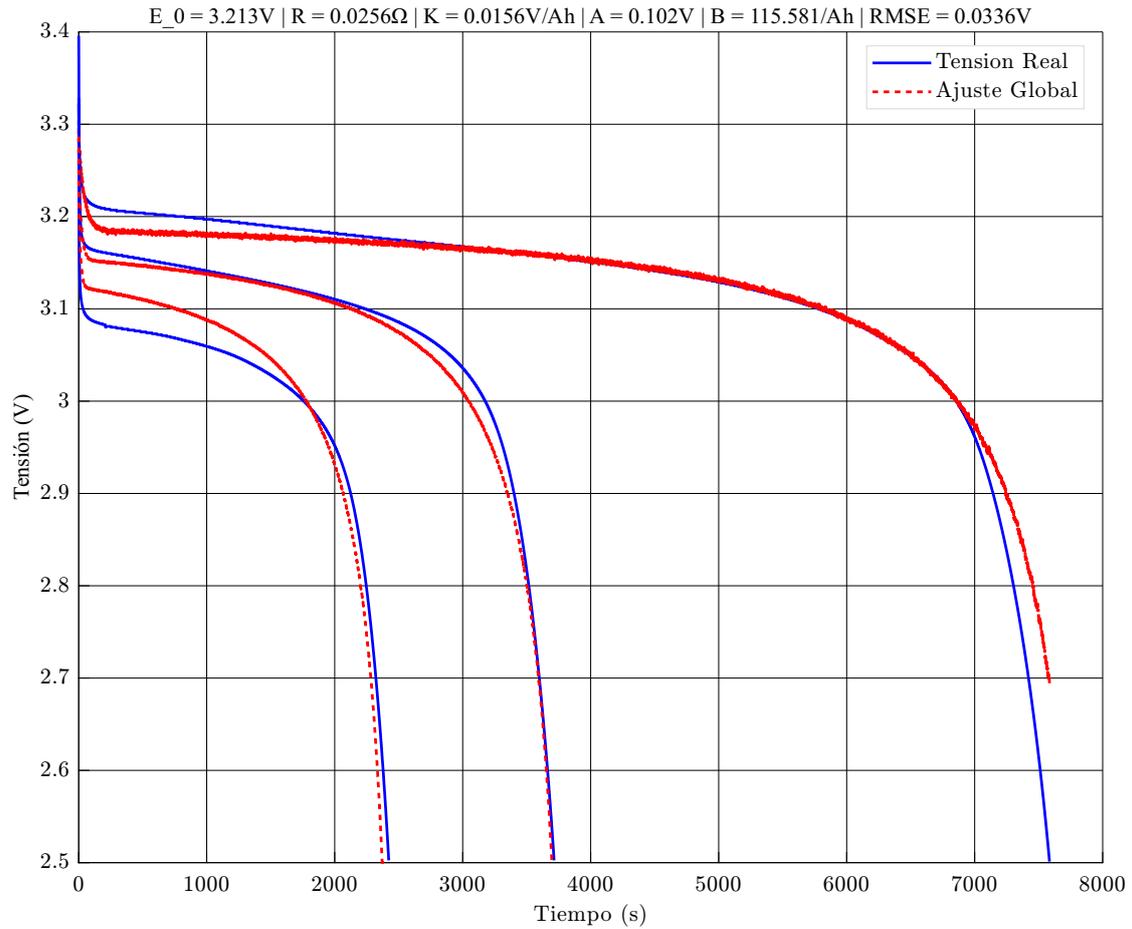


Figura 5.7. Comparación entre el voltaje medido experimentalmente y el voltaje estimado mediante el modelo Shepherd ajustado globalmente a los tres datasets de descarga a diferentes corrientes (0.5 C, 1 C y 1.5 C).

Se observa un buen ajuste en todo el rango de operación, lo que confirma la validez del modelo para capturar el comportamiento dinámico de la celda.

Los parámetros obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 5.3: Parámetros del modelo de Shepherd ajustados de forma global para los tres regímenes de descarga.

$E_0$ [V]	$R$ [ $\Omega$ ]	$K$ [V/Ah]	$A$ [V]	$B$ [1/Ah]	RMSE [V]
3.213	0.0256	0.0156	0.102	115.581	0.0336

Mostrando también la influencia **de cada término**:

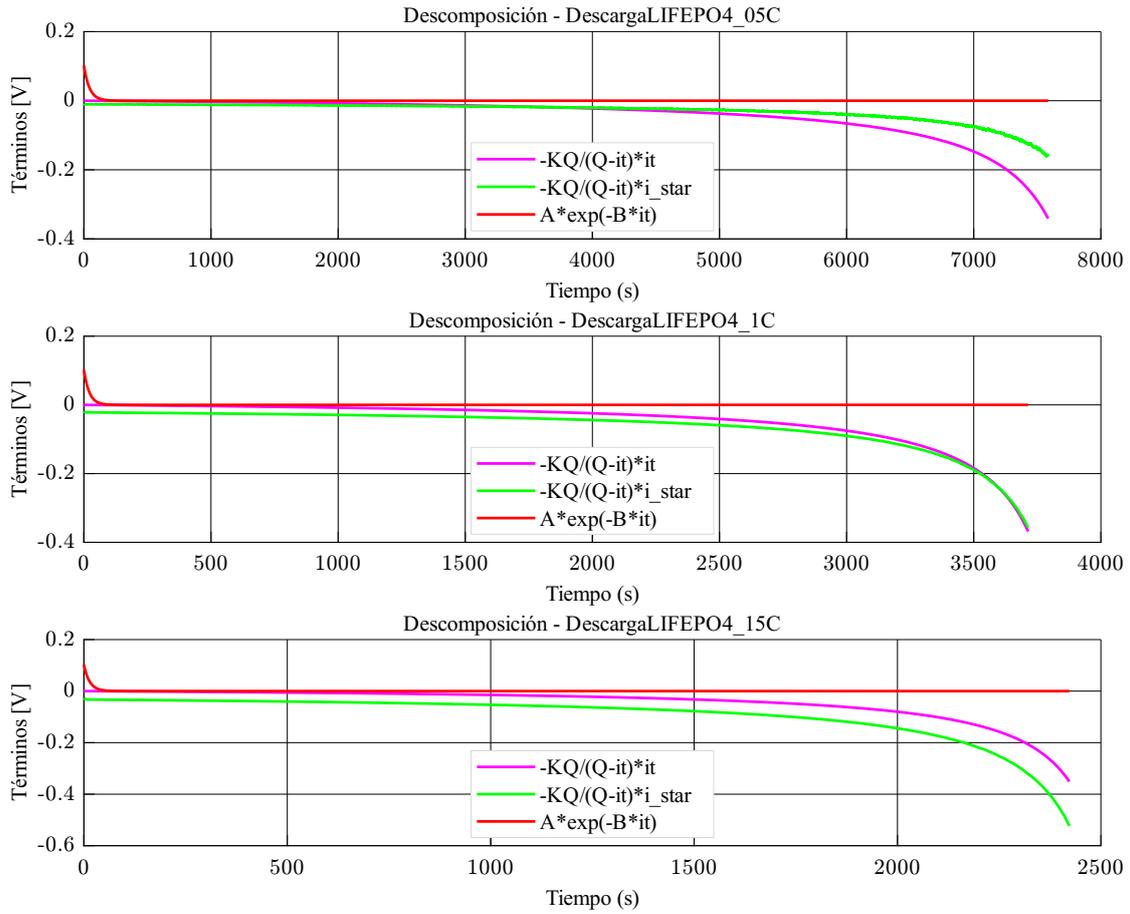


Figura 5.8. Descomposición de los términos que conforman el modelo Shepherd para cada dataset de descarga. Se visualiza la contribución de la resistencia interna, la dependencia con la capacidad residual, y el término exponencial asociado a la dinámica transitoria, evidenciando su impacto diferencial en la tensión estimada.

Este procedimiento confirma que el modelo Shepherd es una aproximación a un sistema electroquímico altamente complejo, que no siempre muestra una exactitud total con el voltaje real. No obstante, los valores de RMSE obtenidos en los ajustes pueden considerarse relativamente bajos, por lo que se puede afirmar que es un ajuste considerablemente aceptable para la caracterización eléctrica de la celda.

Tras la realización de los diferentes ajustes, el modelo concreto de la celda  $LiFePO_4$  queda de la siguiente forma:

$$V(t)_{\text{bat}} = 3,213 - 0,0256 \cdot i(t) - 0,0156 \cdot \frac{1,5}{1,5 - it} (i^*(t) + it) + 0,102 \cdot e^{-115,581 \cdot it} \quad (5.4)$$

## 5.4. Ensayos de carga y descarga a distintos tramos del SoC

Una vez fijados los parámetros de la celda, la función de pérdidas propuesta en este proyecto para la celda  $\text{LiFePO}_4$  toma la siguiente forma tomando en cuenta las ecuaciones (2.23) y (2.18) :

$$P_{\text{pérdidas}} = (E_0 - V_{\text{bat}}) \cdot I = \underbrace{R \cdot I^2}_{\text{Término 1}} + \underbrace{R_{\text{pol}} \cdot I^* \cdot I}_{\text{Término 2}} \quad (5.5)$$

Esta función, caracterizada para la celda  $\text{LiFePO}_4$ , se expresa específicamente como:

$$P_{\text{pérdidas}} = 0,0256 \cdot I^2 + R_{\text{pol}} \cdot I^* \cdot I \quad (5.6)$$

donde

$$R_{\text{pol}}(I) = \begin{cases} 0,0156 \cdot \frac{1,5}{1,5 - It} & \text{si } I > 0 \\ 0,0156 \cdot \frac{1,5}{It + 0,15} & \text{si } I \leq 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

Así, la función de pérdidas para la carga queda:

$$P_{\text{pérdidas}} = 0,0256 \cdot I^2 + 0,0156 \cdot \frac{1,5}{It + 0,15} \cdot I^* \cdot I \quad (5.8)$$

y la función de pérdidas para la descarga es:

$$P_{\text{pérdidas}} = 0,0256 \cdot I^2 + 0,0156 \cdot \frac{1,5}{1,5 - It} \cdot I^* \cdot I \quad (5.9)$$

Como se mencionó anteriormente, con esta caracterización matemática de la celda de litio es posible obtener una función teórica de pérdidas; no obstante,

debido a la complejidad de medir la función de pérdidas instantáneas de la celda, en este proyecto se opta por una estrategia diferente. Esta consiste en realizar cargas y descargas con perfiles de corriente variables, partiendo y finalizando siempre en el mismo punto SoC. De este modo, se evalúa la energía eléctrica total extraída o introducida en la celda.

Este balance energético resulta de la integración de las pérdidas instantáneas, por lo que para validar el modelo no es posible comparar directamente una función con el resultado de su integral, ya que múltiples funciones distintas pueden producir el mismo valor integral. Como se muestra en la siguiente figura 5.9, la integral de dos funciones diferentes puede dar como resultado el mismo valor escalar.

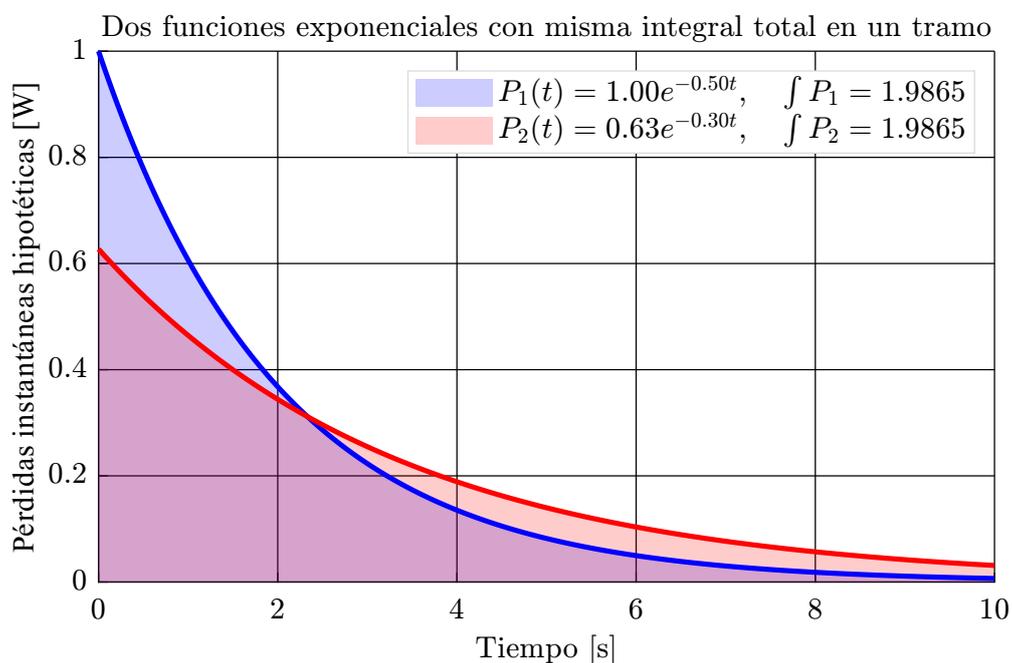


Figura 5.9. Dos funciones exponenciales con misma integral total

Para evitar esta ambigüedad, en este proyecto se evaluará la integral de la función de pérdidas instantáneas en distintos tramos del SoC y se comparará en todo momento con el balance energético total. De esta forma, se asegura realizar la mayor aproximación posible entre la hipótesis inicial y las mediciones reales obtenidas en el laboratorio con la instrumentación disponible.

### 5.4.1. Descarga y carga simétrica a 0,5C

Una vez obtenido el modelo con los parámetros específicos para la celda de ensayo, se procede al estudio del balance energético por tramos del SoC.

Para ello, se analiza la función de potencia instantánea durante la carga y la descarga:

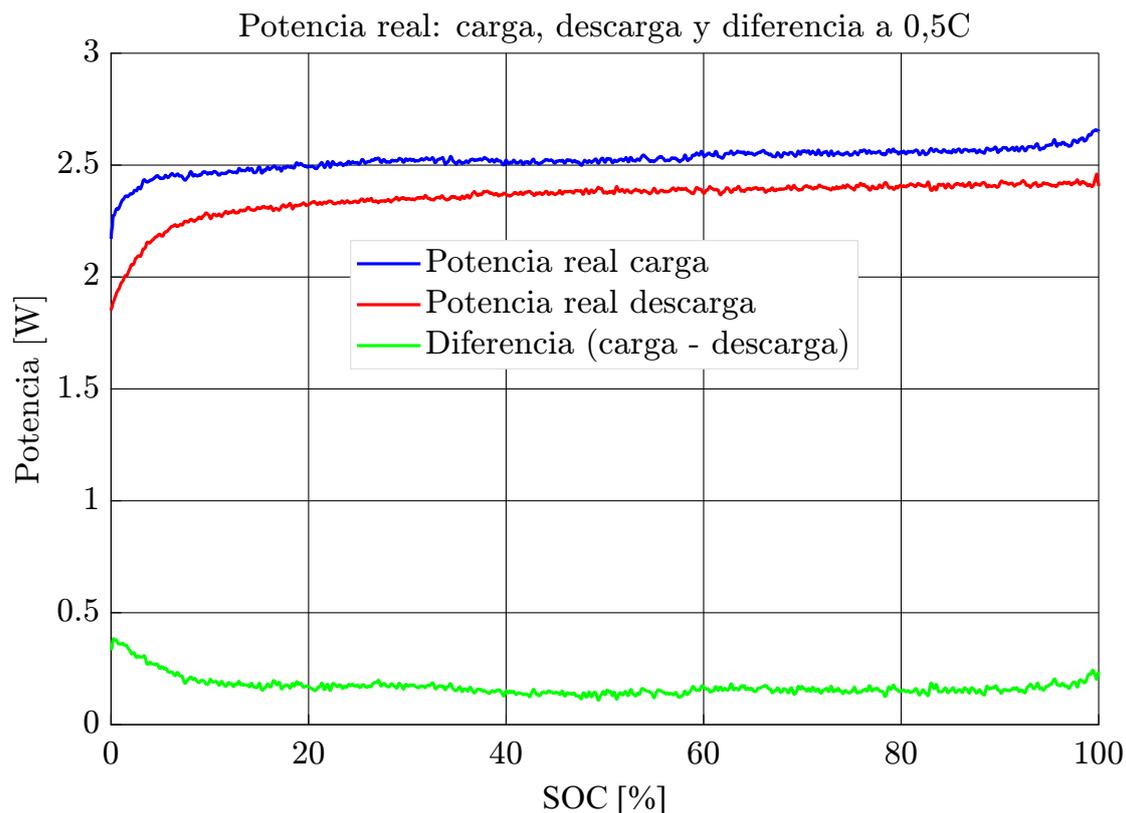


Figura 5.10. Potencia real durante carga y descarga, y su diferencia a lo largo del SoC

En esta figura se observa que la curva de potencia durante la carga es superior a la de la descarga, lo cual indica que el sistema presenta pérdidas energéticas: se introduce más energía de la que posteriormente se puede extraer, como es lógico debido a las pérdidas internas.

Además, se puede afirmar que las pérdidas en cada tramo del SoC corresponden a la diferencia entre las áreas bajo las curvas de potencia de carga y descarga. Es decir, la energía introducida menos la energía extraída, ambas expresadas en julios.

Por tanto, el área encerrada por la curva de la diferencia entre ambas potencias representa la energía disipada o pérdida neta en cada tramo del SoC. Una vez obtenido el valor escalar de la energía disipada en cada tramo mediante datos reales (integrando la diferencia de potencia en el tiempo), se compara con la energía estimada a partir del modelo teórico de pérdidas, basado en los parámetros ajustados de la celda.

La potencia de pérdidas teórica tiene la siguiente forma para una carga y descarga simétrica a 0,5C:

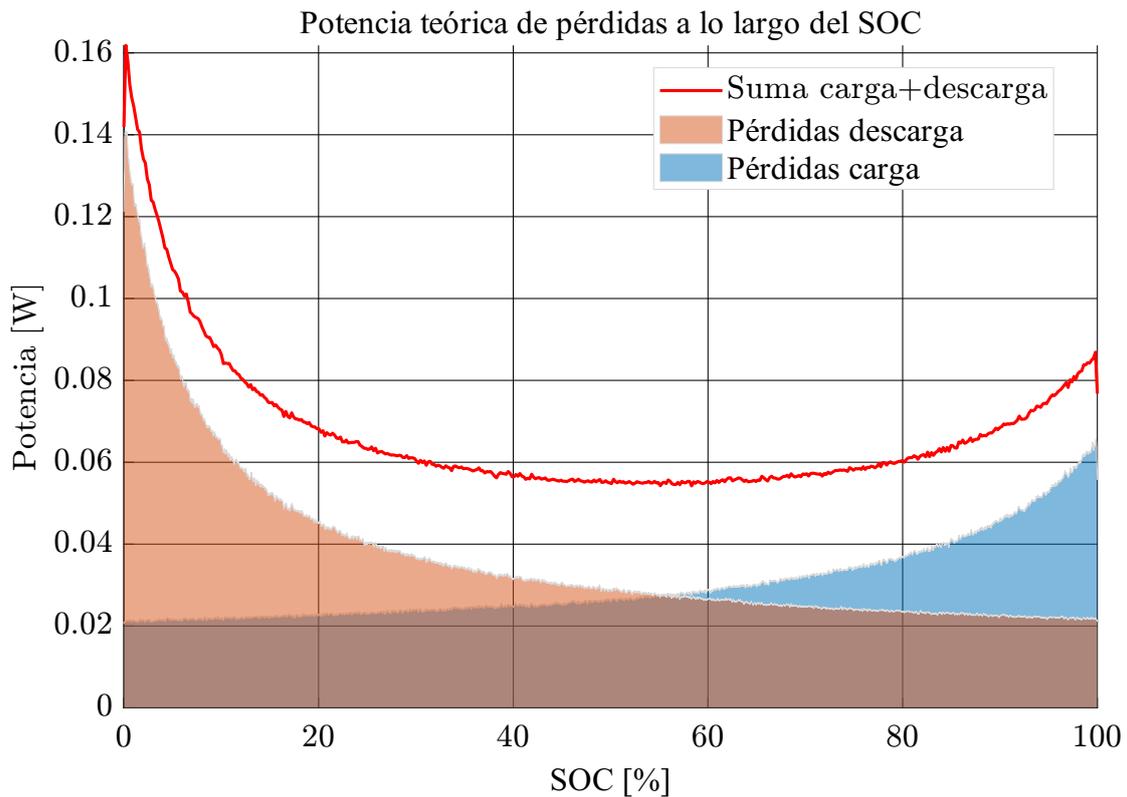


Figura 5.11. Potencia de pérdidas teóricas durante carga y descarga del modelo.

El área en rojo representa los julios perdidos durante la descarga y el área en azul representa los julios perdidos durante la carga

La forma obtenida para la potencia de pérdidas teóricas presenta coherencia física. Durante la carga, las pérdidas aumentan notablemente en los tramos cercanos al 100% de SoC, debido al aumento del voltaje y resistencia de polarización, ya que los iones de litio tienen más dificultad para infiltrarse en las capas de grafito del ánodo, las cuales se encuentran casi llenas, lo que incrementa la oposición al

paso de corriente.

De manera análoga, durante la descarga se observa un aumento de las pérdidas en tramos cercanos al 0% de SoC, causado por la dificultad de los iones de litio para acoplarse nuevamente al cátodo que se encuentra casi saturado de iones de litio, generando también mayor voltaje y resistencia de polarización, traduciéndose en un aumento de pérdidas energéticas.

Asimismo, se aprecia una componente casi constante de pérdidas a lo largo del proceso que se atribuye a la resistencia interna de la celda, pérdidas por efecto Joule, la cual no depende directamente del estado de carga.

Con estos datos, se procede a realizar la comparación energética por tramos del SoC, obteniendo los siguientes resultados:

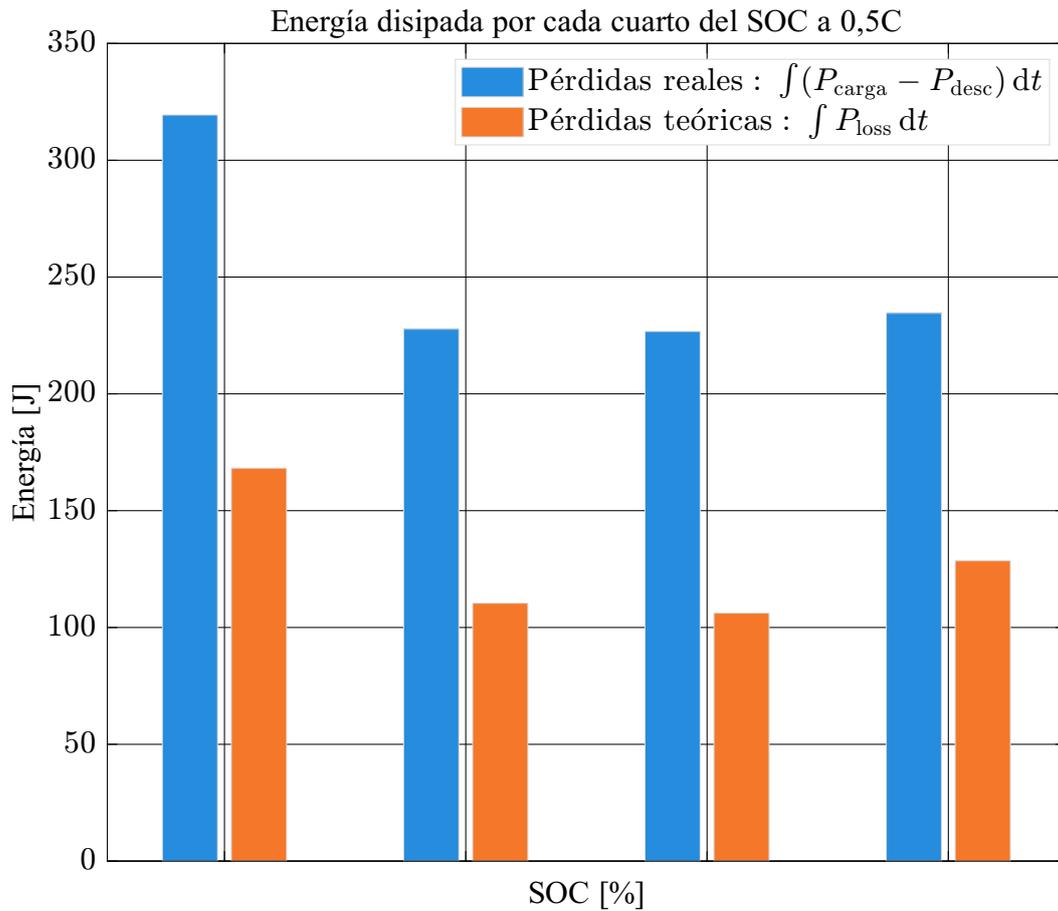


Figura 5.12. Comparación de las pérdidas energéticas reales y teóricas por tramos del SoC a una tasa de descarga de 0,5C. En azul se representa la energía disipada real, obtenida como la diferencia entre las áreas bajo las curvas de potencia absorbida durante la carga y la descarga. En amarillo se muestra la energía disipada teóricamente, calculada mediante la integración de la función de pérdidas instantáneas del modelo.

## 6 Resultados y Conclusiones

A continuación se detallan los resultados del estudio de pérdidas energéticas en celdas de ion-litio con química  $\text{LiFePO}_4$ , realizado mediante ensayos experimentales controlados. Se analiza de forma conjunta el comportamiento durante los procesos de carga y descarga a diferentes ratios de corriente.

### 6.1. Gráficas finales a corrientes de descarga constantes

A continuación se presenta la repetición del cálculo de pérdidas energéticas, esta vez separando por tramos del SOC, para diferentes tasas de corriente 0,5C, 1C y 1,5C. Se consideran tanto las pérdidas reales, calculadas como diferencia entre potencia absorbida en carga y potencia entregada en descarga, como las pérdidas teóricas estimadas mediante el modelo.

La primera figura 6.1 muestra la evolución de la diferencia de potencias reales en función del SOC para los tres casos. El área bajo estas curvas representa directamente la potencia neta disipada, donde se observa cómo esta varía a lo largo del SOC y según la tasa de corriente aplicada. A mayor corriente, la curva de diferencia se incrementa, evidenciando que las pérdidas energéticas aumentan con el aumento de corriente.

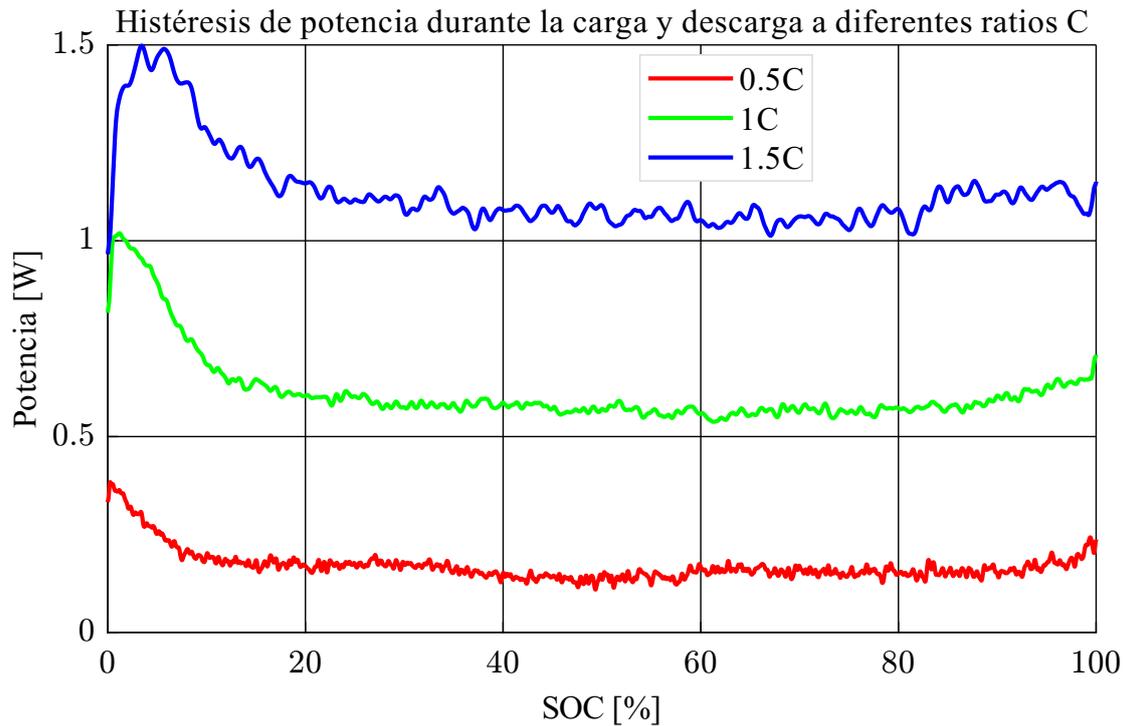


Figura 6.1. Curvas de potencia disipada neta ( $P_{\text{carga}} - P_{\text{descarga}}$ ) en función del SOC, para distintos C 0,5C, 1C y 1,5C. A mayor tasa de corriente, mayor es la histéresis de potencia debida a pérdidas internas.

En la segunda figura 6.2 se representa la suma de las potencias de pérdida teóricas durante la carga y la descarga. Este gráfico permite visualizar cómo el modelo predice una mayor concentración de pérdidas en los extremos del SOC cercanos a 0% y 100%, coherente con el comportamiento electroquímico de la celda. La cantidad de pérdidas se acentúa al aumentar la corriente y de nuevo, en la realidad, la mayor parte de las pérdidas se concentran en tramos cercanos a cero del SoC.

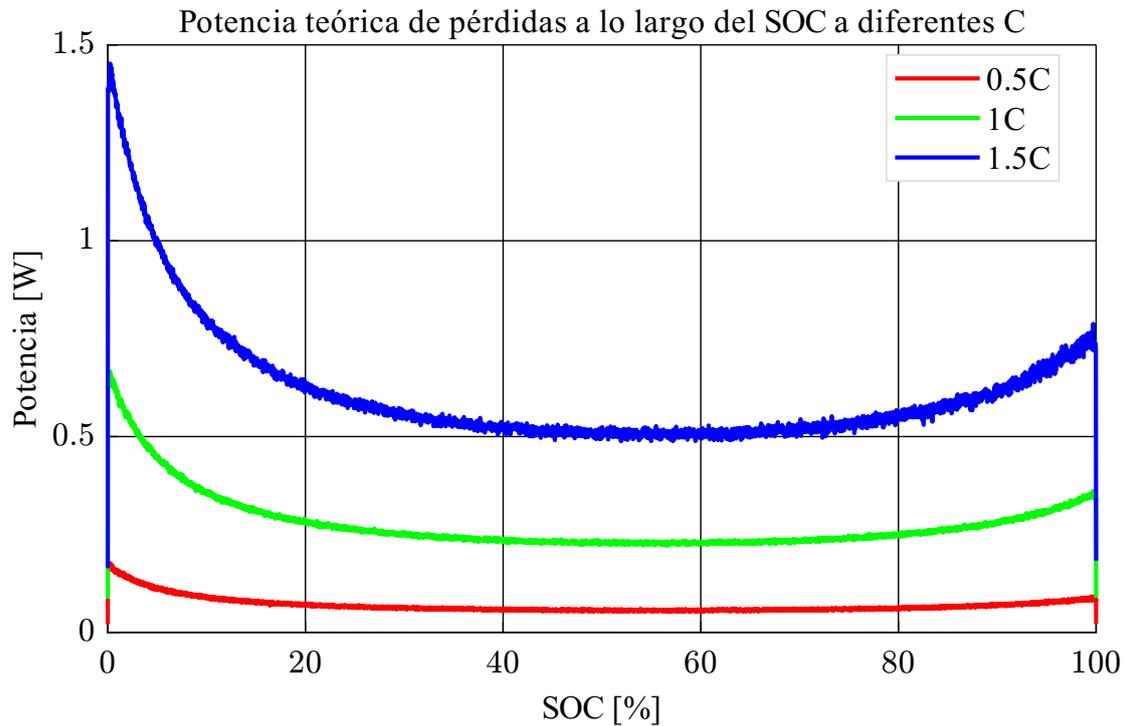


Figura 6.2. Suma teórica de las potencias de pérdida ( $P_{\text{loss}}^{\text{carga}} + P_{\text{loss}}^{\text{descarga}}$ ) para distintas tasas de corriente a cada tramo del SoC.

Finalmente, se presenta la energía total disipada, integrada por tramos del SOC en la Figura 6.3. Se comparan las pérdidas energéticas reales con las teóricas estimadas a partir del modelo. La energía real se calcula como el área bajo la curva de potencia diferencial entre la carga y la descarga en cada tramo, mientras que la teórica se obtiene integrando la función de pérdidas instantáneas. En todos los casos se mantiene una coherencia entre ambas, validando la capacidad predictiva del modelo propuesto, especialmente para tramos intermedios del SOC.

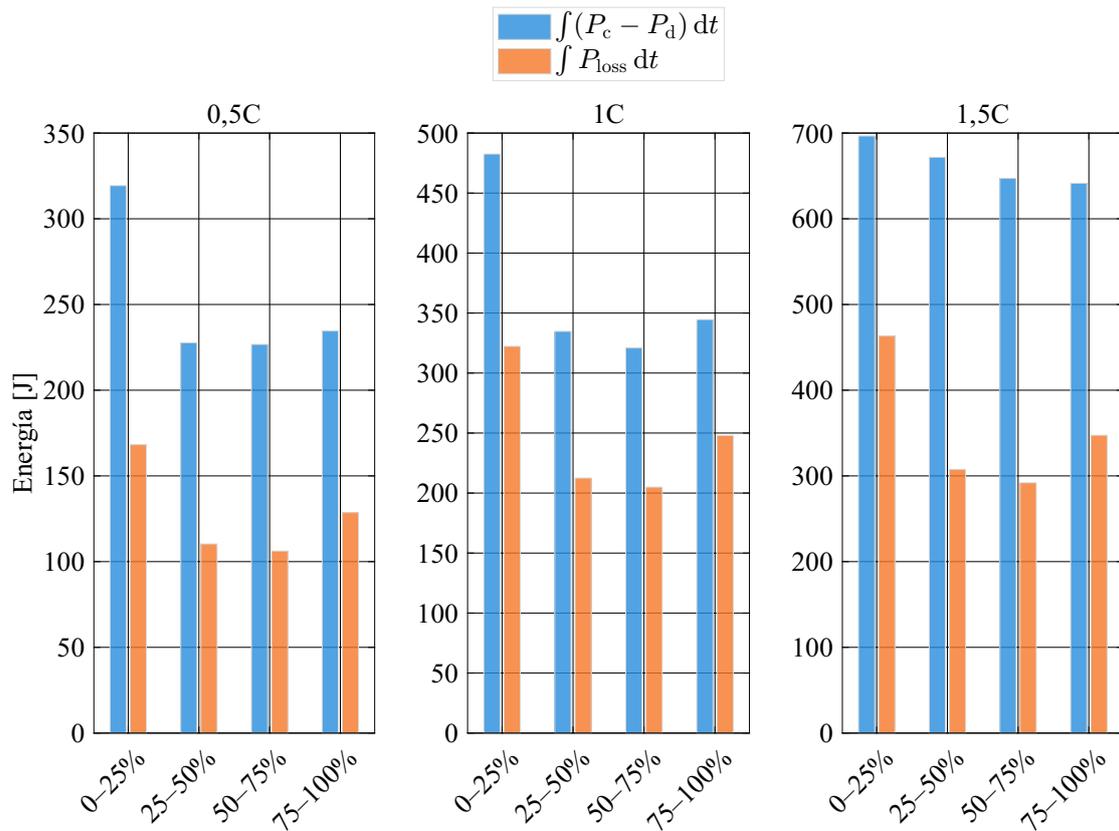


Figura 6.3. Comparación de la energía disipada por tramos del SOC para distintos C-rates. En azul se representa la energía disipada real (potencia neta), y en amarillo la energía teórica estimada mediante el modelo.

A grandes rasgos, se puede observar que la energía disipada según el modelo de pérdidas teórico, desarrollado en el artículo base de este proyecto, difiere notablemente de la energía real. En particular, las pérdidas totales reales son significativamente mayores que las teóricas. No obstante, las pérdidas teóricas siguen la misma tendencia general que las pérdidas reales, acentuándose especialmente en los extremos del SOC, sobre todo a niveles bajos.

Además, a continuación se presenta el balance absoluto de pérdidas reales, calculado como la diferencia entre la energía bruta introducida durante la carga y la energía extraída durante la descarga, tomando como pérdidas la diferencia absoluta entre ambas. Se comparan dichas pérdidas con las pérdidas teóricas computadas, mostrando también su error.

En la Figura 6.4 se puede apreciar dicho gráfico de barras:

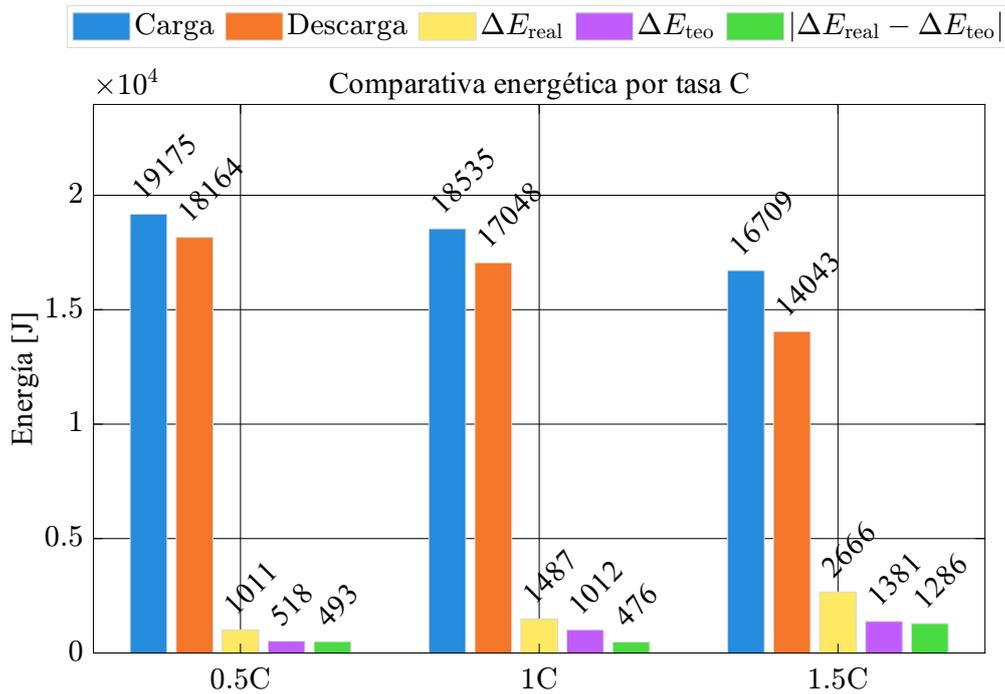


Figura 6.4. Comparativa de energía disipada por tasa C. Se muestran las pérdidas reales y teóricas, así como la diferencia entre ambas.

Se puede calcular el balance absoluto de pérdidas reales como la diferencia entre la energía introducida durante la carga y la energía extraída durante la descarga. Comparando con las pérdidas teóricas, el error porcentual se obtiene como:

$$\text{Error [\%]} = \frac{|E_{\text{real}} - E_{\text{teo}}|}{E_{\text{teo}}} \cdot 100$$

Para los datos de la Figura 6.4:

$$\text{Tasa 0.5C: } \frac{|1011 - 518|}{518} \cdot 100 \approx 96,7\%,$$

$$\text{Tasa 1C: } \frac{|1487 - 1012|}{1012} \cdot 100 \approx 46,9\%,$$

$$\text{Tasa 1.5C: } \frac{|2666 - 1381|}{1381} \cdot 100 = 93,0\%$$

A continuación, se presenta la tabla con las pérdidas reales, teóricas y el error calculado:

Tabla 6.1: Pérdidas reales vs. teóricas y porcentaje de error.

Tasa C	Pérdidas reales [J]	Pérdidas teóricas [J]	Error [%]
0.5C	1019	518	96,7
1C	1485	1011	46,9
1.5C	2666	1381	93,0

Podemos concluir que el modelo teórico no se ajusta completamente al comportamiento real de la celda. En las siguientes secciones se plantearán hipótesis sobre las posibles causas de estas diferencias.

## 6.2. Modelo Shepherd con término de intensidad filtrada

A lo largo de este estudio se ha llegado a la conclusión de que el término de corriente filtrada, tal y como se presenta en el artículo científico que estudia la función de pérdidas instantáneas, supone un problema a la hora de ajustar los parámetros teóricos al modelo real. Esta afirmación se corrobora mediante el análisis comparativo entre los ajustes realizados con y sin dicho término en la resistencia de polarización.

La comparación se realiza entre el modelo de Shepherd planteado en dicho artículo que incluye el término de corriente filtrada y el modelo de Shepherd tradicional, que prescinde de este término. Las expresiones de ambos modelos se presentan a continuación:

$$V_{\text{bat}}(t) = E_0 - R \cdot I(t) - R_{\text{pol}}(I) \cdot I^* - K \frac{Q_m}{Q_m - It} \cdot It + A \cdot e^{-B \cdot It} \quad (6.1)$$

$$V_{\text{bat}}(t) = E_0 - R \cdot I(t) - K \frac{Q_m}{Q_m - It} \cdot It + A \cdot e^{-B \cdot It} \quad (6.2)$$

En la primera ecuación,  $I^*$  representa la corriente filtrada, aplicada sobre la resistencia de polarización  $R_{\text{pol}}$ . En la segunda, se elimina dicho término, lo que permite observar con claridad su influencia en la precisión del modelo.

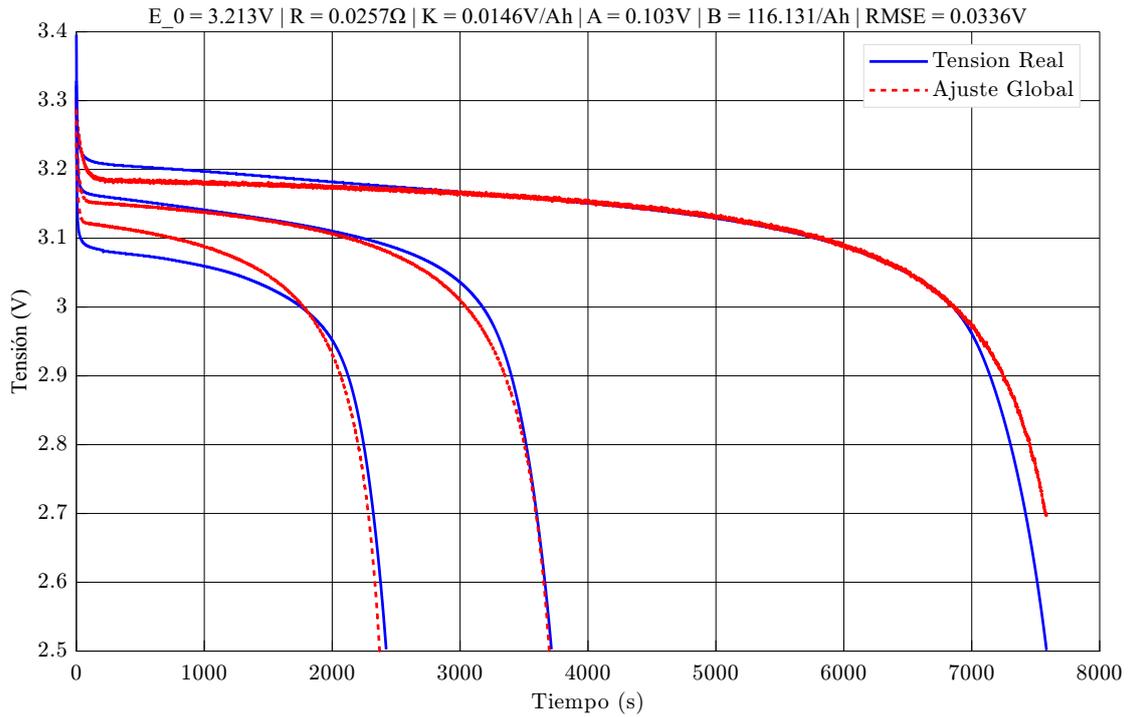


Figura 6.5. Modelo de Shepherd ajustado a tres curvas de descarga con diferentes tasas C. Se observa que, en descargas a 0,5C y 1,5C, el desajuste causado por el parámetro  $I^*$  es más acusado, evidenciando que este término distorsiona el ajuste de los parámetros del modelo.

Por otra parte, si se elimina este término, se observa que el RMSE es significativamente menor y que el ajuste mejora, obteniéndose una diferencia más reducida entre la función teórica y los datos experimentales.

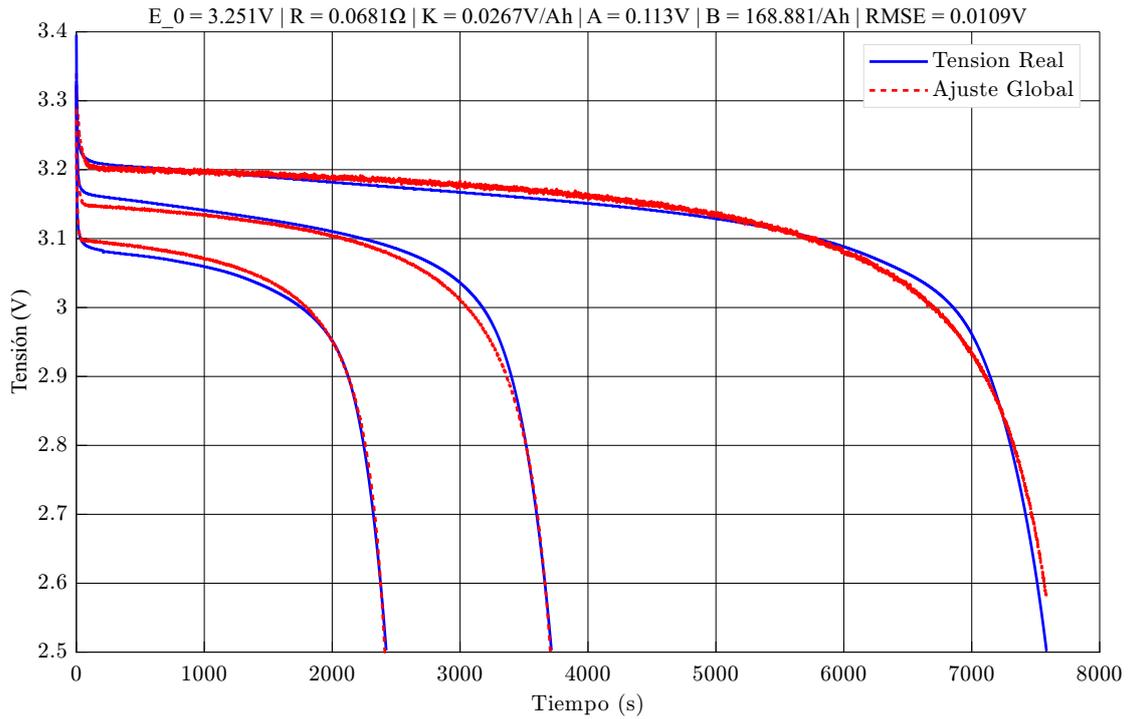


Figura 6.6. Ajuste del modelo de Shepherd sin el término  $I^*$ , en el que se aprecia una mayor precisión en la estimación de los parámetros.

Podemos concluir, a partir del análisis del RMSE, que el modelo de Shepherd ofrece un mejor ajuste cuando se omite el término de corriente filtrada.

Tabla 6.2: Comparación del error cuadrático medio entre variantes del modelo de Shepherd

Modelo	Incluye corriente filtrada	RMSE
Shepherd básico	No	0,0109
Shepherd con término de corriente filtrada	Sí	0,0336

## 7 Trabajos futuros

Como continuación de este proyecto, existe un amplio margen para profundizar en la parametrización ideal de celdas de litio. Aunque en este trabajo se ha desarrollado un modelo detallado y ajustado para una celda específica, sería necesario realizar un análisis exhaustivo que identifique con precisión qué términos del modelo se asemejan realmente al comportamiento de celdas comerciales bajo distintas condiciones de operación. Este estudio permitiría refinar los parámetros del modelo, mejorar la predicción de pérdidas y aumentar la fiabilidad de las simulaciones.

Además, podría ampliarse el estudio a diferentes químicas de celdas, evaluando si el modelo y los ajustes propuestos son igualmente válidos para otras configuraciones electroquímicas. Esto permitiría establecer criterios más generales de parametrización y optimización de modelos de baterías.

Otro aspecto relevante a investigar es la escalabilidad de las propiedades y parámetros del modelo a nivel de battery pack (conjunto de baterías). Hasta ahora, el estudio se ha centrado en celdas individuales, pero no está claro si las cualidades observadas y los parámetros ajustados son directamente aplicables cuando las celdas se ensamblan en serie o en paralelo, formando packs completos. El análisis de baterías grandes requiere equipos de testeo de baterías de alta potencia y un montaje mucho más avanzado que el utilizado en este proyecto, con instrumentación profesional para medir corrientes y tensiones en múltiples celdas simultáneamente. Esta línea de trabajo permitiría validar si los modelos de celda son escalables o si es necesario parametrizar el conjunto completo de manera independiente.

En conjunto, estos trabajos futuros aportarían una visión más completa y robusta del modelado de baterías de litio, acercando los resultados a aplicaciones reales y a la optimización de sistemas de almacenamiento a gran escala.

# 8 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

El presente Trabajo de Fin de Grado contribuye de forma activa a varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la Agenda 2030 de las Naciones Unidas. Estos objetivos representan un marco global para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos, y la ingeniería desempeña un papel clave en su consecución. La caracterización experimental de las pérdidas energéticas en baterías de ion-litio, desarrollada en este proyecto, aporta valor tanto desde el punto de vista técnico como desde una perspectiva de sostenibilidad y transición energética.

A continuación, se detallan los principales ODS con los que se alinea este trabajo:

- **ODS 7 – Energía asequible y no contaminante:** Este trabajo promueve el uso de tecnologías de almacenamiento energético basadas en baterías de ion-litio, fundamentales para maximizar el aprovechamiento de fuentes renovables como la solar y la eólica. La validación de modelos más precisos de pérdidas energéticas permite una integración más eficiente de estas baterías en el sistema eléctrico, optimizando su operación y reduciendo pérdidas. Esto facilita una energía más limpia, accesible y con menor impacto ambiental.
- **ODS 9 – Industria, innovación e infraestructura:** El proyecto incluye el diseño y montaje de un banco de ensayos específico para la caracterización de celdas Li-ion, junto con el desarrollo de software de adquisición y tratamiento de datos. Esta infraestructura experimental permite avanzar en la innovación en el modelado de sistemas de almacenamiento energético, promoviendo así el desarrollo de soluciones más eficientes y sostenibles en el ámbito industrial y energético. Además, los modelos refinados pueden ser utilizados en sistemas de gestión de baterías (BMS) más inteligentes.
- **ODS 12 – Producción y consumo responsables:** La mejora en el conocimiento de las pérdidas energéticas contribuye a un uso más racional de los recursos materiales y energéticos. Al optimizar el rendimiento y la vida útil de las baterías, se minimizan residuos electrónicos y se reduce la necesidad de extracción de materiales críticos como el litio o el cobalto. Esto está directamente alineado con los principios de economía circular y consumo responsable.

- **ODS 13 – Acción por el clima:** La electrificación de la demanda energética y el almacenamiento eficiente de energía renovable son herramientas esenciales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Este trabajo apoya estos objetivos al proponer herramientas de modelado que permiten una operación más eficiente de las baterías en microrredes o instalaciones fotovoltaicas, facilitando así la descarbonización progresiva del sistema eléctrico.

Este proyecto, por tanto, no solo aporta resultados técnicos relevantes en el ámbito del almacenamiento energético, sino que también responde a la necesidad urgente de avanzar hacia un modelo energético más sostenible, justo y resiliente. La contribución de la ingeniería, mediante proyectos como este, es clave para afrontar los retos climáticos, energéticos y sociales del siglo XXI.

# Bibliografía

- [1] *Transición energética: Qué es y cuál es su importancia*. Nedgia. 5 de dic. de 2023. URL: <https://www.nedgia.es/blog-gas-natural/que-es-transicion-energetica/> (visitado 29-05-2025).
- [2] Alessandro Volta. «On the Electricity Excited by the Mere Contact of Conducting Substances of Different Kinds». En: *Philosophical Transactions* 90 (1800). Traducción y análisis modernos disponibles, págs. 403-431.
- [3] IBERDROLA CORPORATIVA. *Núñez de Balboa, la mayor planta fotovoltaica de Europa*. <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-solar-fotovoltaica/planta-fotovoltaica-nunez-de-balboa>.
- [4] *Endesa pone en servicio la mayor instalación europea de almacenamiento de flujo de vanadio en una planta solar*. Endesa. 16 de jul. de 2025. URL: <https://www.endesa.com/es/prensa/sala-de-prensa/noticias/eficiencia-energetica/mayor-instalacion-europea-almacenamiento-flujo-vanadio-planta-solar> (visitado 30-07-2025).
- [5] Ghassan Zubi et al. «The Lithium-Ion Battery: State of the Art and Future Perspectives». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89 (jun. de 2018), págs. 292-308. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.002. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118300728>.
- [6] *¿Qué Es Una Batería de Plomo Abierto AGM?* URL: <https://www.all-batteries.es/que-es-una-bateria-plomo-agm>.
- [7] Annie. *Baterías de níquel-cadmio: ventajas, desventajas y aplicaciones*. SHIELDEN Solar Company: Produces Inverters/Batteries/Energy Storage/Solar Systems. 29 de feb. de 2024. URL: <https://es.shieldenchannel.com/blogs/portable-power-station/nickel-cadmium-battery>.
- [8] *Noticias - Baterías Recargables de Níquel-Hidruro Metálico (NiMH): Ventajas y Diversas Aplicaciones*. URL: <https://www.gmcellgroup.com/es/news/nickel-metal-hydride-nimh-rechargeable-batteries-unveiling-the-advantages-and-diverse-applications/>.

- [9] S. O. S. electronic. *INR 18650-25R | SAMSUNG*. URL: <https://www.soselectronic.com/es-es/products/samsung/inr-18650-25r-287549>.
- [10] ¿SABÍAS CÓMO... Funciona Una Celda De Una Batería De Ion-litio? 10 de oct. de 2023. URL: <https://www.arnion.es/sabias-como-funciona-una-celda-de-una-bateria-de-ion-litio/>.
- [11] *Fig. 7. Schematic Diagram Showing the Intercalation of Graphite With...* ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-showing-the-intercalation-of-graphite-with-lithium\\_fig7\\_221913662](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-showing-the-intercalation-of-graphite-with-lithium_fig7_221913662).
- [12] Augusto Rodríguez. «Baterías de ion litio: presente y futuro». En: ().
- [13] lminucio. *6 maneiras de aumentar o tempo de voo do seu Drone*. Futuriste Drones. 17 de abr. de 2018. URL: <https://futuriste.com.br/blog/6-manieras-de-aumentar-o-tempo-de-voo-do-seu-drone>.
- [14] «(PDF) Data-Driven Prognosis of Multiscale and Multiphysics Complex System Anomalies: Its Application to Lithium-ion Batteries Failure Detection». En: *ResearchGate* (10 de dic. de 2024). ISSN: 1945-7111. URL: [https://www.researchgate.net/publication/370570551\\_Data-Driven\\_Prognosis\\_of\\_Multiscale\\_and\\_Multiphysics\\_Complex\\_System\\_Anomalies\\_Its\\_Application\\_to\\_Lithium-ion\\_Batteries\\_Failure\\_Detection](https://www.researchgate.net/publication/370570551_Data-Driven_Prognosis_of_Multiscale_and_Multiphysics_Complex_System_Anomalies_Its_Application_to_Lithium-ion_Batteries_Failure_Detection).
- [15] *Separator - TA Instruments*. URL: <https://www.tainstruments.com/applications/battery-material-testing/separator/?lang=es>.
- [16] Kang Xu. «Nonaqueous Liquid Electrolytes for Lithium-Based Rechargeable Batteries». En: *Chemical Reviews* 104.10 (1 de oct. de 2004), págs. 4303-4418. ISSN: 0009-2665. DOI: 10.1021/cr030203g. URL: <https://doi.org/10.1021/cr030203g>.
- [17] *Baterías para autoconsumo: Funcionamiento y tipos*. EDP Blog. 16 de jun. de 2025. URL: <https://www.edpenergia.es/es/blog/energia-fotovoltaica/baterias-para-autoconsumo-funcionamiento-y-tipos/> (visitado 16-06-2025).
- [18] Claudio Tapia et al. «Premio nobel de química 2019: baterías Ion-Li». En: *Educación química* 31.1 (2020), págs. 12-22. ISSN: 0187-893X. DOI: 10.22201/fq.18708404e.2020.1.72730. URL: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0187-893X2020000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-893X2020000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es).

- [19] Edmund J. F. Dickinson y Andrew J. Wain. «The Butler-Volmer Equation in Electrochemical Theory: Origins, Value, and Practical Application». En: *Journal of Electroanalytical Chemistry*. Dr. Richard Compton 65th Birthday Special Issue 872 (1 de sep. de 2020), pág. 114145. ISSN: 1572-6657. DOI: 10.1016/j.jelechem.2020.114145. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1572665720303283>.
- [20] Songrui Wang. «Entropy and Heat Generation of Lithium Cells/Batteries». En: *Chinese Physics B* 25.1 (nov. de 2015), pág. 010509. DOI: 10.1088/1674-1056/25/1/010509. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1674-1056/25/1/010509>.
- [21] «(PDF) Probing the Thermal Implications in Mechanical Degradation of Lithium-Ion Battery Electrodes». En: *ResearchGate* (). DOI: 10.1149/2.069406jes. URL: [https://www.researchgate.net/publication/270033552\\_Probing\\_the\\_Thermal\\_Implications\\_in\\_Mechanical\\_Degradation\\_of\\_Lithium-Ion\\_Battery\\_Electrodes](https://www.researchgate.net/publication/270033552_Probing_the_Thermal_Implications_in_Mechanical_Degradation_of_Lithium-Ion_Battery_Electrodes).
- [22] Fabián Gutiérrez-Castillo et al. «Parametrización de modelo de circuito equivalente de polarización dual de una celda de ion litio utilizando la técnica de optimización por enjambre de partículas modificada». En: *Ingeniería* 28.1 (2023). URL: <https://www.redalyc.org/journal/4988/498875016010/html/>.
- [23] Diego Barros. *Soporte para hacer test de celdas 18650*. ElectroTinker. 14 de mar. de 2020. URL: <https://electrotinker.com/es/componentes/soporte-test-celdas-18650/> (visitado 17-06-2025).
- [24] C. M. Shepherd. «Design of Primary and Secondary Cells: II . An Equation Describing Battery Discharge». En: *Journal of The Electrochemical Society* 112.7 (1 de jul. de 1965), pág. 657. ISSN: 1945-7111. DOI: 10.1149/1.2423659. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2423659/meta> (visitado 17-06-2025).
- [25] Javier García-González y Salvador Guerrero. «Optimal Management of a Microgrid Li-Ion Battery Considering Non-Linear Losses Using the Integer Zig-Zag Formulation». En: *Electric Power Systems Research* 235 (oct. de 2024), pág. 110776. ISSN: 03787796. DOI: 10.1016/j.epsr.2024.110776. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877962400662X> (visitado 16-05-2025).
- [26] Olivier Tremblay y Louis-A. Dessaint. «Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications». En: *World Electric Vehicle Journal* 3.2 (26 de jun. de 2009), págs. 289-298. ISSN: 2032-6653. DOI: 10.3390/wevj3020289. URL: <https://www.mdpi.com/2032-6653/3/2/289> (visitado 17-06-2025).

- [27] *¿Cómo Hacer La Prueba SOC-OCV Para Baterías de Litio?* URL: [https://es.everexceed.com/blog/how-to-do-the-soc-ocv-test-for-lithium-batteries-\\_b254](https://es.everexceed.com/blog/how-to-do-the-soc-ocv-test-for-lithium-batteries-_b254).
- [28] *High Precision Battery Test Equipment | Arbin Instruments*. URL: <https://www.arbin.com/> (visitado 18-08-2025).
- [29] *Fuentes de Alimentación | Categorías del producto | Kaise Instrumentación*. URL: <https://kaiseinstrumentacion.com/categoria-producto/laboratorio-educacion/fuentes-de-alimentacion/> (visitado 24-06-2025).
- [30] *Arduino - Home*. URL: <https://www.arduino.cc/> (visitado 25-06-2025).
- [31] *STMicroelectronics: Our Technology Starts with You*. URL: [https://www.st.com/content/st\\_com/en.html](https://www.st.com/content/st_com/en.html) (visitado 25-06-2025).
- [32] Infineon Technologies AG. *Semiconductor & System Solutions - Infineon Technologies*. URL: <https://www.infineon.com/cms/en/> (visitado 26-06-2025).
- [33] *DFRobot Open-Source Hardware Electronics and Kits*. URL: <https://www.dfrobot.com/> (visitado 26-06-2025).
- [34] Krishna Ojha. *Programming ATmega328P with Arduino*. Medium. 17 de abr. de 2020. URL: <https://medium.com/@drkaojha/programming-atmega328p-with-arduino-ce579b2d9315>.