



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Modelado y simulación de un sistema de baterías con tecnología
LiFePO₄*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Javier Bethencourt Ballesteros

DIRECTOR: Víctor Ángel Alfonsín Pérez

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Modelado y simulación de un sistema de baterías con tecnología
LiFePO₄*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

La preocupación por la contaminación atmosférica ha provocado una tendencia creciente por la movilidad sostenible. Las políticas internacionales están cada vez más enfocadas en la sustitución de los automóviles de combustión por los eléctricos. Esto ha llevado a una fuerte inversión para la creación de nuevos sistemas de almacenamiento energético para alimentar los sistemas de tracción. Motivados por esta problemática, aparece un interés por nuevas tecnologías de baterías. Comprender su funcionamiento bajo diferentes condiciones de uso, se hace imprescindible a la hora de definir posibles autonomías. Una herramienta para predecir dicho comportamiento es mediante la simulación con software matemático. En este Trabajo Fin de Grado se propone la realización de un modelo de batería de Litio, concretamente de tecnología Litio Ferrofosfato (LiFePO_4). Para su elaboración se ha asemejado el comportamiento de la batería al de un circuito equivalente simple. Para dicho circuito se han definido los parámetros de resistencia interna, tensión de circuito abierto e intensidad a partir de ensayos experimentales con un cargador/descargador de baterías. Finalmente, y una vez desarrollado el modelo, adaptándolo a la tecnología propuesta, se han realizado diferentes simulaciones con varios modelos de baterías, con el objetivo de validar dicho modelo o establecer sus limitaciones.

PALABRAS CLAVE

Tensión de circuito abierto (OCV), Estado de carga (SoC), Modelo de Thévenin, Coeficiente de Peukert, Voltaje.

AGRADECIMIENTOS

A mis queridos padres y hermanos, expresarles mi más profundo agradecimiento por su apoyo incondicional y comprensión durante todo el proceso. Su apoyo ha sido un pilar fundamental.

A mi tutor, mi más sincera gratitud por su orientación, paciencia y dedicación al proyecto.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y Objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Objetivos	8
2 Estado del Arte	9
2.1 Introducción	9
2.2 Clasificación y tipos de baterías.....	9
2.2.1 Celdas primarias	9
2.2.2 Celdas secundarias.....	11
2.3 Baterías de Litio	12
2.3.1 Introducción	12
2.3.2 Baterías de Litio-ion	13
2.3.3 Baterías de LiFePO_4	13
2.4 Baterías de plomo-ácido.....	14
2.4.1 Introducción	14
2.4.2 Funcionamiento	14
2.4.3 Características.....	14
2.5 Principios básicos. Ejemplo de una celda Zn/Cl_2	15
2.5.1 Proceso de descarga	15
2.5.2 Proceso de carga	16
2.6 Principios electroquímicos y reacciones	16
2.6.1 Reacciones termodinámicas.....	17
2.7 Factores que afectan al rendimiento de la batería	18
2.7.1 Nivel de voltaje.....	18
2.7.2 Flujo de corriente de descarga	18
2.7.3 Temperatura de la celda.....	19
2.7.4 Edad de la batería.....	19
2.7.5 Auto-descarga	19
2.7.6 Estado de salud (SOH).....	20
2.7.7 Estado de carga (SoC)	20
2.8 Modelos de batería	21
2.8.1 Modelos electroquímicos.....	21

2.8.2 Modelos basados en circuitos equivalentes	22
3 Modelado de la Batería.....	24
3.1 Introducción	24
3.2 Circuito equivalente de la batería.....	24
3.3 Tensión de circuito abierto.....	25
3.3.1 Tipos de curvas OCV.....	25
3.3.2 Modelado OCV.....	26
3.4 Intensidad	27
3.5 Capacidad de Peukert.....	28
3.6 Carga eliminada y suministrada	29
3.7 Estado de carga	30
3.8 Modelado de la resistencia interna.....	30
3.9 Modelo global de la batería.....	31
4 Ensayos experimentales	34
4.1 Introducción	34
4.2 Baterías y equipo de ensayos	34
4.2.1 Batería de Li-ion Panasonic.....	34
4.2.2 Batería de litio-ion Lithium Werks.....	35
4.2.3 Batería de litio PFS Energy	36
4.3 Cargador /descargador de baterías y software	37
4.3.1 Montaje experimental	38
4.4 Ensayos	38
4.4.1 Carga CC-CV.....	39
4.4.2 Descarga C-CC	40
4.4.3 Reposo	40
4.5 Cálculo de la resistencia interna.....	41
4.5.1 Introducción	41
4.5.2 Fundamento teórico	41
4.5.3 Proceso de carga	41
4.5.4 Proceso de descarga	42
4.6 Obtención de los coeficientes de Peukert	43
4.7 Cálculo de la curva OCV	45
4.7.1 Curva OCV de carga.....	45
4.7.2 Curva OCV de descarga	48
4.8 Simulaciones del modelo	50
4.8.1 Simulaciones batería PFS Energy.....	50

4.8.2 Simulaciones batería Litio-ion Lithium Werks	52
4.8.3 Simulaciones batería de Li-ion Panasonic	53
5 Conclusiones	55
5.1 Introducción	55
5.2 Conclusiones	55
5.3 Líneas futuras	56
6 Bibliografía.....	58
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	60
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	61
Anexo III: Código de Matlab	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Comparación de baterías primarias [3].....	10
Figura 2-2. Evolución en el uso de baterías [3].....	12
Figura 2-3 Química interna de una batería [Fuente propia].	15
Figura 2-4 Proceso de descarga de una celda Zn/Cl ₂ [Fuente propia].	16
Figura 2-5 Proceso de carga de una celda Zn/Cl ₂ [Fuente propia].....	16
Figura 2-6 Proceso de descarga de una celda Zn/Cl ₂ [3].....	17
Figura 2-7. Comportamiento de una batería frente a diferentes intensidades de descarga [3].....	18
Figura 2-8. Efecto de la temperatura en la capacidad [3].....	19
Figura 2-9. Modelo de Thévenin [Fuente propia].	23
Figura 2-10. Modelo de Thévenin simplificado [Fuente propia].	23
Figura 3-1. Circuito equivalente de la batería [Fuente propia].	25
Figura 3-2. Curvas OCV de diferentes baterías [3].....	26
Figura 3-3 Bloque de cálculo de la tensión de circuito abierto (OCV) [Fuente propia].	26
Figura 3-4. Bloque del cálculo de la intensidad [Fuente propia].	27
Figura 3-5. Bloque de cálculo de la capacidad de Peukert [Fuente propia].	28
Figura 3-6. Bloque de cálculo del coeficiente de Peukert [Fuente propia].	29
Figura 3-7. Bloque de cálculo de CRCS [Fuente propia].....	29
Figura 3-8. Bloque de cálculo del estado de carga (SoC) [Fuente propia].....	30
Figura 3-9. Bloque de cálculo de la resistencia interna [Fuente propia].	31
Figura 3-10. Módulo de la batería [Fuente propia].	32
Figura 3-11. Bloques de carga y descarga de la batería [Fuente propia].	32
Figura 3-12. Módulo de carga/descarga de la batería [Fuente propia].....	33
Figura 4-1. Interfaz de programación de las cargas y descargas [Fuente propia].	37
Figura 4-2. Representación de los datos de voltaje e intensidad en una carga [Fuente propia].	38
Figura 4-3. Montaje de los ensayos [Fuente propia].	38
Figura 4-4. Carga CC-CV [Fuente propia].....	39
Figura 4-5. Descarga D-CC [Fuente propia].	40
Figura 4-6 Variación de la resistencia interna en el proceso de carga [Fuente propia].....	42
Figura 4-7. Variación de la resistencia interna en el proceso de descarga [Fuente propia].	43
Figura 4-8. Curva de carga OCV. [Fuente propia].	45
Figura 4-9. Ajuste del polinomio de la curva OCV de carga [Fuente propia].	46
Figura 4-10 Ajuste del polinomio de la curva OCV de carga entre el 0 y el 15 % [Fuente propia].	47
Figura 4-11. Simulación de curva la OCV de carga en Simulink [Fuente propia].	48

Figura 4-12. Curva de descarga OCV [Fuente propia].....	49
Figura 4-13. Ajuste del polinomio para la curva OCV de descarga [Fuente propia].....	49
Figura 4-14. Simulación de curva la OCV de descarga en Simulink [Fuente propia].	50
Figura 4-15. Simulación de carga PFS Energy a 5 A [Fuente propia].	50
Figura 4-16. Simulación de descarga PFS Energy a 5 A [Fuente propia].....	51
Figura 4-17. Simulación de descarga a 20 A [Fuente propia].	51
Figura 4-18. Simulación de carga Batería Lithium Werks a 5 A [Fuente propia].	52
Figura 4-19. Simulación de descarga batería Lithium Werks a 0,5 A [Fuente propia].....	52
Figura 4-20. Simulación de descarga batería Lithium Werks a 10 A.	53
Figura 4-21. Simulación de carga batería Panasonic a 1,5 A.	53
Figura 4-22. Simulación de descarga batería Panasonic a 1 A.	54
Figura 4-23. Simulación de descarga batería Panasonic a 10 A.	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Características batería de Li-ion Panasonic NCR18650GA.	35
Tabla 4-2. Características batería de litio-ion Lithium Werks ANR26650M1-B.	36
Tabla 4-3. Características batería de litio PFS Energy 32140FS.	36
Tabla 4-4. Características del cargador/descargador.	37
Tabla 4-5 Valores de la resistencia interna en el proceso de carga.	42
Tabla 4-6. Valores de la resistencia interna en el proceso de descarga.	43
Tabla 4-7. Descargas de la batería Panasonic.	44
Tabla 4-8. Descargas de la batería Lithium Werks.	44
Tabla 4-9. Descargas de la batería PFS Energy.	44
Tabla 4-10. Polinomio de ajuste para la curva OCV de carga.	46
Tabla 4-11. Polinomio de ajuste para la curva OCV de carga entre el 0 y el 15%.	47
Tabla 4-12. Polinomio de ajuste para la curva OCV de carga entre el 85 y el 100%.	48
Tabla 4-13. Polinomio de ajuste para la curva OCV de descarga.	49

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Desde los inicios del siglo XXI, la contaminación ambiental y la búsqueda de una transición hacia fuentes de energía renovables, han marcado la mayoría de los debates en el panorama internacional. Reducir el consumo de los combustibles fósiles al igual que las emisiones de los gases contaminantes provocados por estos, se ha convertido en uno de los problemas más recurrentes y preocupantes a nivel internacional. La progresiva eliminación de combustibles fósiles como fuentes de energía, ha provocado una tendencia creciente hacia tecnologías que no dependan de estas fuentes de energía. Factores como los gases de efecto invernadero, la polución atmosférica y la escasez de recursos fósiles combinados con el aumento del precio de estos, han encaminado a Europa hacia una dependencia sin precedentes de países exportadores de combustibles fósiles.

Ante este panorama, el futuro de la producción de electricidad se inclina cada vez más, hacia sistemas capaces de producir energía de forma limpia, libres de agentes contaminantes, que contribuyan a preservar el planeta. Al igual que en la industria automovilística, uno de los sectores más maltratado por estas medidas, especialmente en los países desarrollados donde cada vez se sugiere de forma más enérgica, la inminente sustitución de motores de combustión interna por alternativas eléctricas.

Dadas estas circunstancias, las empresas que invierten en esta transformación energética, enfrentan desafíos significativos, estrechamente relacionados con la capacidad para almacenar esa energía, ya sea para su uso en automoción o para salvaguardar la energía producida por un panel fotovoltaico. Por sus altos costes de fabricación y su tecnología todavía en vías de desarrollo, los dispositivos capaces de almacenar energía, comúnmente denominados como baterías, son un medio material indispensable para continuar con el desarrollo sostenible del planeta.

Esta necesidad ha provocado una creciente demanda de sistemas de almacenamiento energéticos tanto eficientes como sostenibles, para ello es necesario conocer en profundidad los procesos internos y el comportamiento de las baterías, de forma que se pueda maximizar su rendimiento, prolongar su vida útil y garantizar su seguridad. En vista de esta problemática, el modelado de baterías emerge como una urgencia práctica para minimizar lo máximo posible los costes asociados con el desarrollo y las pruebas experimentales.

Con estas consideraciones, en el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se desarrollará un modelo de baterías utilizando herramientas para la simulación numérica y análisis de datos, capaz de replicar el comportamiento de una de las tecnologías, considerada como una de las más avanzadas en el panorama actual, las celdas de Litio, especialmente aquellas que utilizan la tecnología LiFePO_4 o baterías de litio

ferrofosfato. Se pretende emular el comportamiento de tres baterías, dos de LiFePO_4 y una de Iones de Litio, bajo diferentes situaciones de funcionamiento. Además de ello, se enfoca en determinar los parámetros claves, mediante métodos experimentales, para su implementación en el modelo matemático diseñado para modelar el comportamiento de una batería.

Esta metodología permitirá combinar un enfoque teórico-práctico que garantice no solo el conocimiento teórico y las reacciones básicas de una celda de batería, sino también, la aplicación práctica tanto mediante ensayos en el laboratorio como con simulación mediante lenguaje matemático.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado consiste en:

- Realizar un modelo de batería de tecnología LiFePO_4 mediante el software matemático Matlab que permita realizar simulaciones de estas bajo diferentes condiciones de cargas y descargas.

Para obtener este objetivo principal, se han planteado los siguientes objetivos secundarios:

- Desarrollar ecuaciones que permitan el modelado de los diferentes componentes del circuito eléctrico equivalente (OCV, CRCS, SoC).
- Determinar experimentalmente mediante ensayos los parámetros que caracterizan el comportamiento de las baterías (R_{int}).
- Realizar simulaciones de las baterías LiFePO_4 de estudio y comparar los resultados con los obtenidos del cargador/descargador.
- Validar que el modelo pueda funcionar para tecnologías diferentes al Litio Ferrofosfato.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En este capítulo se dará una visión de las nuevas tecnologías que están emergiendo en la actualidad, a causa de la necesidad de tener cada vez dispositivos capaces de almacenar más energía en dimensiones más reducidas. Se explicarán también el funcionamiento de las antiguas tecnologías y porque hoy en día siguen utilizándose en algunas aplicaciones.

Este estado del arte también abarcará los avances en el diseño y rendimiento de las nuevas tecnologías, centrándose en la comprensión de los procesos electroquímicos internos, así como los nuevos procedimientos para el modelado de baterías.

En este contexto, se explicarán los mecanismos básicos para contextualizar el posterior desarrollo de este trabajo, las reacciones generales que tienen lugar en una celda de batería y cada una de las tecnologías empleadas en detalle.

2.2 Clasificación y tipos de baterías

La clasificación de las baterías se puede realizar en función a diversos criterios, como son la capacidad química, la capacidad de recarga, el tamaño y el propósito de su uso [1]. Este apartado se centrará en clasificarlas en función de su capacidad de recarga: 1. Primarias y 2. Secundarias; y en función de su composición interna.

2.2.1 Celdas primarias

Son baterías diseñadas para ser utilizadas hasta que se agote la carga eléctrica de su interior y luego tener que ser desechadas, no están diseñadas para ser recargadas. Son fuentes de energía confiables para un periodo de tiempo determinado o para dispositivos que no tienen un excesivo consumo de energía.

Por lo general este tipo de celdas tienen las siguientes características:

- Voltaje estable, durante la mayor parte de su vida útil
- Vida útil, especialmente las de litio tienen una larga vida útil que les permite poder almacenarse durante largos periodos de tiempo
- Seguridad, aunque deben utilizarse con cuidado por las sustancias químicas peligrosas que llevan en su interior, generalmente son seguras para su uso cotidiano.

Un aspecto que hay tener en cuenta en su impacto ambiental, ya que estas generan residuos y contienen materiales que pueden ser muy nocivos para el medio ambiente, de ahí la importancia en que sean recicladas correctamente [2].

La siguiente Figura 2-1 que se muestra, corresponde con una tabla de las celdas primarias que más se han utilizado a lo largo del tiempo desde su creación. Hay que tener en cuenta en la siguiente tabla que las comparaciones se basan en características de rendimiento que no son específicos para cada celda ni para sus condiciones específicas de uso [3].

Sistema	Voltaje	Energía Específica	Densidad de potencia	Perfil de descarga plana	Perfil de baja temperatura	Perfil de alta temperatura	Vida útil	Coste
Zinc/ Carbono	5	4	4	4	5	6	8	1
Zinc/ Alcalino /Dióxido de manganeso	5	3	2	3	4	4	7	2
Magnesio/ Dióxido de manganeso	3	3	2	2	4	3	4	3
Zinc/ Óxido de mercurio	5	3	2	2	5	3	5	5
Cadmio/ Óxido de mercurio	6	5	2	2	3	2	3	6
Zinc/ Óxido de plata	4	3	2	2	4	3	6	6
Zinc/ aire	5	2	3	2	5	5	-	3
Litio/ Cátodo soluble	1	1	1	1	1	2	2	6
Litio/ Cátodo sólido	1	1	2	2	2	3	2	4
Litio/ Electrolito sólido	2	1	5	2	6	1	1	7

Figura 2-1. Comparación de baterías primarias [3].

A continuación, se van a describir algunas de las baterías con mayores aplicaciones:

2.2.1.1 Baterías de zinc-carbono

La celda de zinc-carbono, también conocida como batería seca Leclanché se inventó hace más de 100 años siendo la más utilizada de todas las baterías de celda primaria debido a su bajo costo, su rendimiento relativamente bueno y su fácil disponibilidad. Una de sus grandes ventajas era la posibilidad de hacer celdas y baterías de muchas formas y características diferentes para satisfacer las necesidades de una amplia variedad de aplicaciones [3].

Se mejoraron considerablemente sus prestaciones entre los años 1945 y 1965 debido al uso de nuevos materiales como el dióxido de magnesio, y el electrolito de cloruro de zinc. Actualmente ha perdido importancia en el mercado, debido a la creación de nuevas baterías primarias con características de rendimiento superiores.

2.2.2.2 Baterías de óxido de zinc/mercurio

Esta batería fue desarrollada durante la Segunda Guerra Mundial para aplicaciones de comunicación militar, en parte, por su larga vida útil y su alta densidad energética. Posteriormente a la guerra se utilizó en pequeñas configuraciones como batería plana, cilíndrica o de botón como fuente de energía en relojes electrónicos, calculadoras, equipos fotográficos y aplicaciones similares que requerían de una fuente de energía de pequeñas dimensiones y con una tecnología confiable y de larga duración[3].

En las últimas décadas, el uso de la batería con la configuración de mercurio se ha prácticamente erradicado, debido a los problemas asociados al mercurio y su posible reemplazo por baterías de zinc o litio.

2.2.1.3 Baterías de magnesio

Aunque el magnesio tiene propiedades electroquímicas atractivas, ha habido relativamente poco interés comercial en las baterías primarias de magnesio, debido a la generación de gas de hidrógeno durante las descargas y la capacidad de almacenamiento escasa. Las baterías de magnesio se han utilizado con éxito en equipos de comunicaciones militares, aprovechando su larga vida útil incluso a altas temperaturas. El magnesio aún se utiliza como material de ánodo en algunas baterías[3].

2.2.1.4 Baterías de electrolito sólido

Este tipo de baterías se diferencian de otros sistemas de baterías en que la conductividad iónica se encuentra en estado sólido, de un compuesto electrónicamente no conductor, a diferencia de la utilización de una conductividad iónica de un electrolito líquido que utilizan por lo general las celdas. Las baterías que utilizan estos electrolitos sólidos son dispositivos de baja potencia, pero tienen una vida útil extremadamente larga y la capacidad para funcionar a un amplio rango de temperaturas, incluso a altas temperaturas. En la actualidad se utiliza el litio como ánodo para la mayoría de estas baterías, lo que ofrece las características anteriores, además, de un mayor voltaje y una densidad energética más elevada [3].

2.2.2 Celdas secundarias

Las baterías secundarias o recargables se definen como “dispositivos de almacenamiento de energía electroquímica diseñados para ser cargados y descargados en múltiples ciclos, comúnmente conocidas como baterías recargables”. A diferencia de las primarias, que se desechaban después de su uso, estas están construidas para que recuperen su capacidad mediante un proceso de recarga [4].

Este tipo de baterías, a pesar de su capacidad de recarga, tienen densidades de energía más bajas en comparación de las baterías primarias. No obstante, las tecnologías de iones de litio ofrecen mejoras significativas en densidad de energía.

En un principio su coste de fabricación es mayor que las primarias, que tienen un funcionamiento más simple, sin embargo, a largo plazo con la posibilidad de reutilización, son la única y mejor alternativa para la mayoría de las aplicaciones actuales. Sus características principales son las siguientes:

- Ciclo de vida, tienen un número limitado de ciclos de cargas y descargas antes de que su capacidad disminuya considerablemente.
- Versatilidad, adecuadas para una amplia gama de aplicaciones por su posible construcción de diferentes tamaños y formas
- Alta densidad energética
- Curvas de descargas planas y buen funcionamiento a bajas temperaturas

Las baterías objeto de estudio se encuentran enmarcadas dentro de las celdas secundarias por su capacidad para realizar ciclos de carga y descarga. Dentro de este grupo se van a estudiar dos tecnologías que se van a utilizar en el desarrollo del modelo, Litio-ion y LiFePO_4 .

A continuación, se detallará alguna información sobre las baterías secundarias convencionales más utilizadas:

2.2.2.1 Baterías de óxido de plata

- La batería de zinc-plata se caracteriza por su alta densidad energética y su baja resistencia interna que es especialmente beneficiosa para descarga a altas velocidades. Son baterías muy útiles para aplicaciones que tienen como requisito principal una densidad energética alta, como propulsión

de submarinos y aplicaciones militares especiales. No se utilizan para aplicaciones de almacenamiento a nivel cotidiano por su alto coste de fabricación, su vida útil reducida y su bajo rendimiento al estar sometida a bajas temperaturas [3].

2.2.2.2 Baterías de níquel-hierro

- Estas baterías cobraron significativa importancia desde su introducción en 1908 hasta la década de 1970 cuando se introdujo la batería industrial de plomo-ácido en el mercado. Las principales ventajas de la batería de níquel-hierro son su construcción extremadamente resistente, larga vida útil y durabilidad. Se utilizaban principalmente en los mismos ámbitos de aplicación en el que se acabaron utilizando las baterías de plomo-ácido, como son automóviles ferroviarios y camiones de manejo de materiales. El coste relativamente mayor de este tipo de baterías frente a las de plomo-ácido, provocó que se fuera disminuyendo su uso hasta su completa sustitución por las nuevas tecnologías [3].

2.2.2.3 Baterías de níquel-cadmio

La batería de níquel-cadmio es la batería secundaria más popular y debido a su popularidad, se pueden encontrar numerosas celdas de diferentes diseños y tamaños. Tienen una vida útil muy larga y requieren poco mantenimiento. Sus aplicaciones suelen ser para servicios industriales pesados, sistemas de arranques de motores de aviones y baterías de energía de emergencia, en general, su uso se extiende para las aplicaciones que requieren de un peso ligero y un rendimiento alto. Las celdas están disponibles en configuraciones prismáticas, de botón y cilíndricas [3].

2.3 Baterías de Litio

2.3.1 Introducción

Las investigaciones sobre el campo de baterías de litio comenzaron en 1912 por el fisicoquímico estadounidense Gilbert N. Lewis a través de sus estudios y su teoría del enlace químico, pero no fue hasta 1958, momento en el que se produjo el avance más significativo, cuando se comprobó la estabilidad del litio metálico en electrolitos no acuosos como sales fundidas, dióxido de azufre líquido o sales de litio, comprobando así la formación de una capa que previene la reacción química directa entre el litio metálico y el electrolito pero permite el transporte iónico. En la siguiente Figura 2-2 se observa la evolución de las baterías a lo largo de los años:

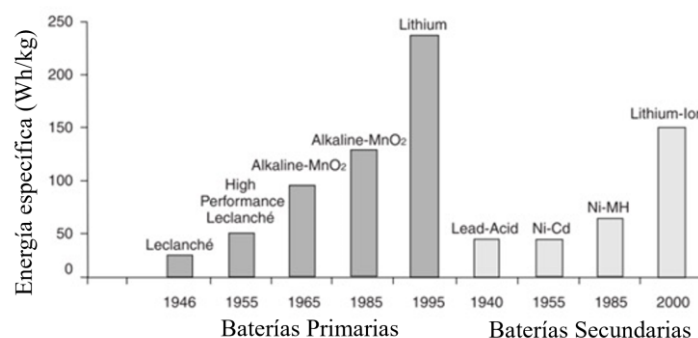


Figura 2-2. Evolución en el uso de baterías [3].

Estas investigaciones sentaron los primeros pasos para la fabricación y comercialización de diversas baterías de litio primarias, que fueron utilizadas desde entonces para numerosos ámbitos, como cámaras, dispositivos médicos, relojes y dispositivos militares, todo ello gracias a su altísima densidad energética que le permitía tener un tamaño muy reducido. Desde 1970 se estima que las baterías de litio han sido utilizadas para alimentar más de cuatro millones de marcapasos cardíacos, estableciendo un récord de confiabilidad y rendimiento sin precedentes por ninguna otra fuente de energía electroquímica [2].

2.3.2 Baterías de litio-ion

Las baterías de litio se han convertido en uno de los dispositivos de almacenamiento de energía más utilizado en la actualidad, debido a sus características que las hacen indispensables para dispositivos como teléfonos móviles, ordenadores y otros dispositivos electrónicos portátiles. La evolución de esta tecnología, cada vez con mayor capacidad de descarga en dispositivos de menor tamaño, que ofrecen una densidad energética no comparable con otras tecnologías, junto con la creciente demanda de vehículos eléctricos, han convertido a estas, en una tecnología fundamental para almacenar energía destinada a su utilización en vehículos, entre otras muchas aplicaciones [5].

Las baterías de ion litio se definen como “el dispositivo empleado para el almacenamiento de energía eléctrica, en el cual, iones de litio se desplazan del ánodo de la batería hacia el cátodo durante el proceso de descarga, a través de un electrolito que posee, de igual manera, iones de litio en su composición”. forman parte de uno de los tipos de baterías recargables más empleadas en la actualidad.

La tecnología de las baterías de litio-ion no han cesado de evolucionar desde su introducción inicial en 1991, impulsada por investigaciones que buscaban crear nuevos materiales para cátodos basados en óxidos de metales de transición. El funcionamiento de la batería se basa en la intercalación y desintercalación de iones de litio en la estructura del cátodo, durante los procesos de carga y descarga. El movimiento de estos iones y electrones a través del circuito externo es lo que genera la corriente eléctrica [6].

Los componentes principalmente usados en la producción suelen incluir una variedad de óxidos metálicos para el cátodo, compuestos de carbono como el grafito para el ánodo, y sales de litio disueltas en solventes orgánicos para el electrolito. Las baterías de Litio-ion pueden tener diferentes formas y geometrías, como cilíndricas, prismáticas o tipo botón, todas estas, encapsuladas en una cubierta de aluminio sellada.

2.3.3 Baterías de LiFePO_4

Las baterías de litio-ferrofosfato (LiFePO_4) son un tipo de batería recargable dentro de las baterías de Litio-ion diseñadas especialmente para aplicaciones que requieran de altas potencias. Este tipo de baterías destacan por su capacidad para soportar corrientes de descargas elevadas, su elevada seguridad de funcionamiento y su alta durabilidad, capaces de soportar numerosos ciclos de descarga [7].

Representan un enorme avance en comparación con otro tipo de baterías de Litio-ion en términos de peso, tamaño, capacidad, estabilidad y longevidad. Destacan también por ser las más seguras dentro de las baterías de litio, ya que no se sobrecalientan en exceso al ser sometidas a altas intensidades y en caso de perforación, no se inflaman. Además, el material del cátodo no presenta riesgos para la salud, no es tóxico ni contaminante para el medio ambiente. Por último, sus materiales de construcción al ser el hierro y el fosfato, por su disponibilidad y su bajo costo, hacen que las baterías sean considerablemente más económicas en comparación con otras baterías de polímeros de litio [8].

Las celdas de baterías de LiFePO_4 tienen un funcionamiento muy parecido a las celdas de Litio-ion, ambas tecnologías son recargables y usan la intercalación de iones de litio en su funcionamiento. Sus diferencias más notables residen en el material por el que está formado el cátodo de las baterías. Las celdas de LiFePO_4 tienen como material en el cátodo el litio ferrofosfato, que resulta ser más estable y

menos propenso a las sobrecargas e inflamación que los materiales que se utilizan en los cátodos de las baterías de Litio-ion convencionales. Sin embargo, por norma general, las baterías de litio-ion suelen tener más densidad energética que las de LiFePO_4 . No obstante, con el paso de los ciclos, al tener una vida útil más larga las baterías de LiFePO_4 , su densidad energética se suele equiparar incluso puede esta última acabar con mejores prestaciones, por lo general esto sucede a partir de los tres años.

2.4 Baterías de plomo-ácido

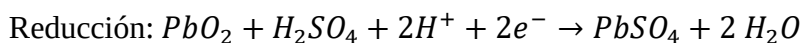
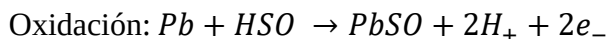
2.4.1 Introducción

La creación de las baterías de plomo-ácido se remontan al año 1859 por el físico francés Gastón Plante y después de más de 150 años, sigue siendo uno de los sistemas acumuladores de energía más utilizados en la actualidad. Esto se debe a su alta fiabilidad, su bajo costo en relación con otro tipo de tecnologías y su capacidad para proporcionar corrientes de alta intensidad [7]. Su uso se suele clasificar en tres grandes grupos, baterías estacionarias que son utilizadas para almacenamiento de energía como sistemas de emergencia, baterías de tracción para alimentar los motores eléctricos de vehículos (carretillas) y por último, baterías de arranque para iniciar vehículos de motor diésel o gasolina [9].

2.4.2 Funcionamiento

Este tipo de baterías están formadas por un material activo en el electrodo positivo, de dióxido de plomo (PbO_2) y en el electrodo negativo, por plomo metálico (Pb). Estos materiales se encuentran soportados por rejillas de una aleación de plomo que forman ambas placas, estas a su vez, están diluidas en un electrolito formado por una disolución de ácido sulfúrico que tiene las funciones de conductor iónico interviniendo en las reacciones de carga y descarga.

Las reacciones que se producen en el interior de la batería son las siguientes:



Durante el proceso de descarga, en el ánodo, el plomo (Pb) reacciona con el ácido sulfúrico (HSO) para dar lugar a la formación del sulfato de plomo (PbSO) y la liberación de electrones, mientras tanto, en el cátodo, el dióxido de plomo (PbO_2) reacciona con el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y los electrones dando lugar al sulfato de plomo (PbSO_4) y al agua.

La energía se produce por este movimiento de electrones en el interior de la batería. Para el proceso de carga, se aplica una corriente a la batería que hace que esos electrodos que se han desplazado en un principio en el proceso de descarga, se formen de nuevo y vuelva la batería [10].

2.4.3 Características

Debido a los compuestos internos por los que está formada la batería, estas resultan pesadas en comparación con otras tecnologías y provoca que la energía específica sea baja. Además, este tipo de baterías son susceptibles de sufrir sulfatación (acumulación de cristales de sulfato de plomo en las placas de la batería) por la química interna por la que están formadas, pudiéndose producir una considerable reducción de su capacidad y eficiencia a lo largo del tiempo.

Este tipo de baterías requieren de un buen mantenimiento, sin embargo, por su bajo coste y la capacidad de ser recicladas (bajo impacto medioambiental), siguen siendo utilizadas en la actualidad entre otros sectores, en la industria automovilística.

2.5 Principios básicos. Ejemplo de una celda Zn/Cl_2

Una batería consiste en un dispositivo capaz de convertir la energía química almacenada en los materiales por la que está formada, en energía eléctrica mediante una reacción electroquímica de oxidación-reducción. Aunque en ocasiones se mencione el término “batería” para nombrar a estos dispositivos, verdaderamente a lo que se está haciendo referencia se denomina “celda”. La batería consiste en la unión en serie o en paralelo de más de una de estas celdas, según las características que se necesiten [11].

En términos generales cada celda está formada por un ánodo, un cátodo y un electrolito:

- El ánodo o electrodo negativo, es donde se produce la oxidación por la cesión de electrones.
- El cátodo o electrodo positivo es el que acepta los electrones y se reduce en la reacción
- El electrolito es el conductor iónico que establece el medio para la transferencia de carga dentro de la celda entre el ánodo y el cátodo.

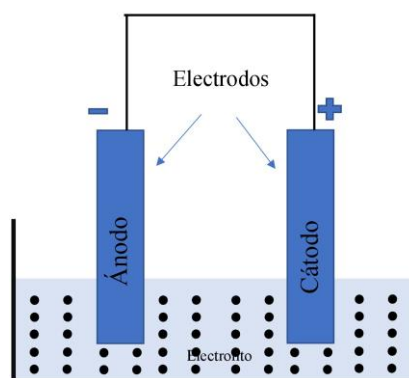


Figura 2-3 Química interna de una batería [Fuente propia].

Los electrodos de ánodo y cátodo se encuentran aislados mutuamente para evitar que se produzcan cortocircuitos internos, sin embargo, estos están rodeados por el tercer elemento, el electrolito. En ocasiones se suelen separar los dos primeros elementos mencionados mediante un material separador, permeable que proteja la batería de problemas internos, pero deje pasar el electrolito para que se produzcan las reacciones en esta.

2.5.1 Proceso de descarga

El proceso de descarga se produce cuando la celda está conectada a una carga externa, los electrones fluyen desde el ánodo, donde se produce la oxidación, a través de la carga externa hasta el cátodo, donde se produce la reducción. Para la explicación mediante ecuaciones se propone un metal (Zn) de ánodo y un material de cátodo como el cloro (Cl_2) [11].

- El electrodo negativo se oxida: $2\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2e$
- El electrodo positivo se reduce: $\text{Cl}_2 + 2e \rightarrow 2\text{Cl}^-$
- Reacción global de descarga: $\text{Zn} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{Cl}^- (\text{ZnCl}_2)$

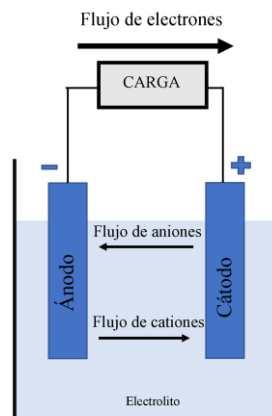


Figura 2-4 Proceso de descarga de una celda Zn/Cl₂ [Fuente propia].

2.5.2 Proceso de carga

Durante el proceso de recarga, el flujo de corriente se invierte y se produce la oxidación en el electrodo positivo y la reducción en el electrodo negativo.

- El electrodo negativo sufre una reacción catódica: $Zn^{2+} + 2e \rightarrow Zn$
- El electrodo positivo sufre una reacción anódica: $2Cl^- \rightarrow Cl_2 + 2e$
- Reacción global de recarga: $Zn^{2+} + 2Cl^- \rightarrow Zn + Cl_2$

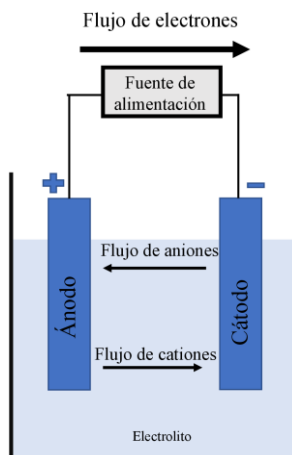


Figura 2-5 Proceso de carga de una celda Zn/Cl₂ [Fuente propia].

2.6 Principios electroquímicos y reacciones

Las celdas son dispositivos capaces de convertir la energía química de los procesos reducción y oxidación que tienen lugar en los electrodos en energía eléctrica. La máxima cantidad de energía eléctrica que producen los elementos químicos del interior de estas, dependen directamente del cambio de la energía libre de Gibbs $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ [11].

Lo ideal sería que toda la energía química pudiese aprovecharse de manera integral para producir energía eléctrica, sin embargo, se producen dos fenómenos que son los causantes de estas pérdidas de energía durante el proceso: Polarización de activación y Polarización de concentración de los reactivos y productos. Estos efectos consumen parte de la energía que se libera en forma de calor residual y provoca que no coincidan la energía teórica con la útil. En la teoría estas pérdidas se pueden calcular de manera

experimental, pero son difíciles de calcular en la práctica. En la Figura 2-6 se puede apreciar de manera visual la combinación de las pérdidas mencionadas:

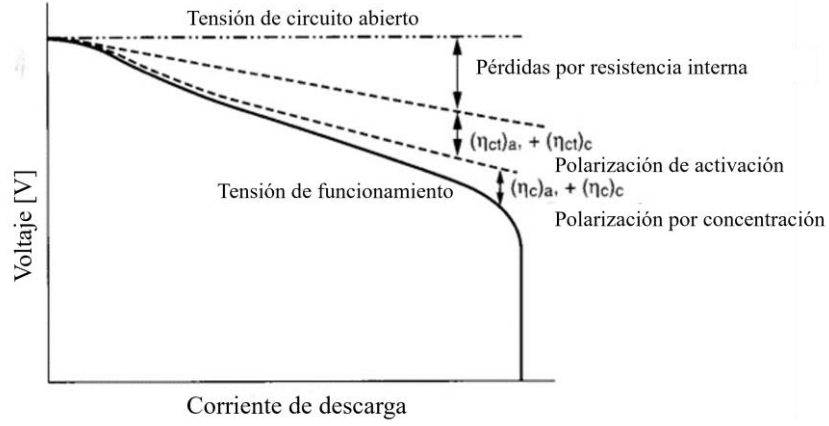


Figura 2-6 Proceso de descarga de una celda Zn/Cl_2 [3]

Otro factor condicionante que afecta considerablemente al rendimiento y capacidad de una celda es la impedancia interna, la cual provoca una caída de voltaje durante la operación que consume una parte de energía como calor residual. A esta caída de tensión se le denomina polarización óhmica y es proporcional a la corriente consumida de la celda. Uno de los objetivos secundarios de este TFG también se centra en calcular esa pérdida por resistencia interna de la celda para su posterior modelización.

2.6.1 Reacciones termodinámicas

En este apartado se explicará una de las reacciones básicas que tienen lugar en un electrodo y que se representará de la siguiente manera:

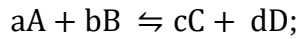
El primer electrodo que se encuentra en el cátodo, donde se produce el proceso de reducción:

$aA + ne \rightarrow cC$; donde a moléculas de A toman n electrones e para formar c moléculas de C .

En segundo electrodo que se encuentra el ánodo, donde se produce el proceso de oxidación:

$bB - ne \rightarrow dD$; donde b moléculas de B ceden n electrones e para formar d moléculas de D .

La reacción global de este suceso se puede representar como:



siendo la fuerza motriz resultante de este proceso:

$$\Delta G_r^\circ = \sum \Delta G_f^\circ (\text{productos}) - \sum \Delta G_f^\circ (\text{reactivos})$$

Para calcular la energía libre de Gibbs se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta G^\circ = -nFE^\circ$$

Donde F es la constante conocida como constante de Faraday (96,487 culombios) y E° es la fuerza electromotriz de los elementos en condiciones estándar.

Esta fuerza motriz es la que permite que una batería suministre energía eléctrica a un circuito extremo[3].

2.7 Factores que afectan al rendimiento de la batería

Existen numerosos factores que delimitan la capacidad y el rendimiento teórico proporcionado por el fabricante, en esta sección se discutirán cuáles son los más comunes de manera generalizada puesto que para una misma batería de similares características, habrá diferencias de rendimiento dependiendo del fabricante. También hay que tener en cuenta que habrá variaciones en el rendimiento dentro de un lote de producción, dependiendo de los controles del proceso [12].

2.7.1 Nivel de voltaje

Primero de todo definir las diferencias entre nomenclatura de los diferentes tipos de voltaje de una celda:

- Voltaje teórico: depende de los materiales del ánodo y cátodo, la composición del electrolito y la temperatura.
- Voltaje de circuito abierto: voltaje en condiciones de no carga con un valor aproximado al teórico.
- Voltaje circuito cerrado: voltaje bajo condiciones de carga.
- Voltaje nominal: es el voltaje operativo de la celda.
- Voltaje de trabajo: voltaje operativo real bajo condiciones de trabajo.
- Voltaje medio: voltaje central durante la descarga.
- Voltaje final o corte: voltaje por encima del cual se ha entregado la casi totalidad de la capacidad de la celda.

Al descargarse una celda, el voltaje es inferior al teórico, esto se debe a las pérdidas mencionadas anteriormente de resistencia interna y polarización de los materiales. Si no existiesen estas pérdidas la batería mantendría esa tensión teórica durante toda la descarga, sin embargo, el voltaje también se ve afectado en la descarga a medida que la resistencia interna de la celda aumenta por la acumulación de productos de descarga, activación, concentración, polarización y otros factores relacionados [3].

2.7.2 Flujo de corriente de descarga

Al aumentar el flujo de corriente de descarga, las pérdidas que se producen por la resistencia interna y los efectos de la polarización son mayores, reduciendo además considerablemente su vida útil. No obstante, si la corriente de descarga de la celda es excesivamente pequeña durante periodos muy largos de tiempo, la química interna se ve afectada deteriorándose y pudiéndose convertir en un factor que cause una disminución de la capacidad de esta. En la siguiente Figura 2-7 se puede observar cómo cambia la curva que realiza el voltaje de una misma celda a diferentes intensidades:

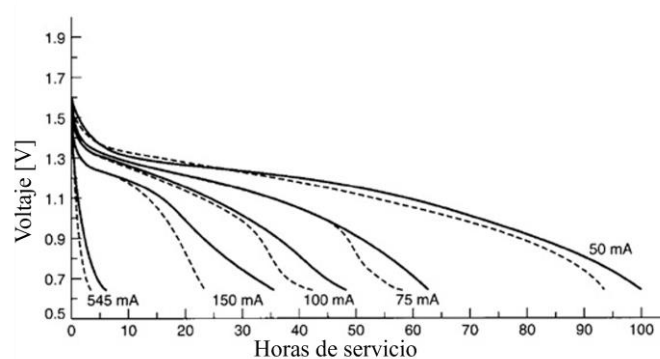


Figura 2-7. Comportamiento de una batería frente a diferentes intensidades de descarga [3].

2.7.3 Temperatura de la celda

La temperatura juega un papel fundamental en la vida útil de una batería. De igual manera que si esta excede demasiado como si desciende considerablemente. A temperaturas muy bajas la actividad química que se produce en la celda se reduce y provoca que la resistencia interna aumente, reduciendo la capacidad de almacenamiento de estas. Dependiendo de la tecnología, las características específicas y el perfil de la curva de descarga varían, siendo por lo general donde se obtiene un mejor rendimiento entre los 20°C y los 40°C . Si la temperatura excede demasiado puede provocar que la actividad química se acelere demasiado, apareciendo entonces el fenómeno de autodescarga (descarga de la batería incluso cuando no está suministrando energía), causando pérdidas en la capacidad neta [3]. En la Figura 2-8 se puede apreciar como varía la capacidad de la batería durante las descargas en función de la temperatura de estas:

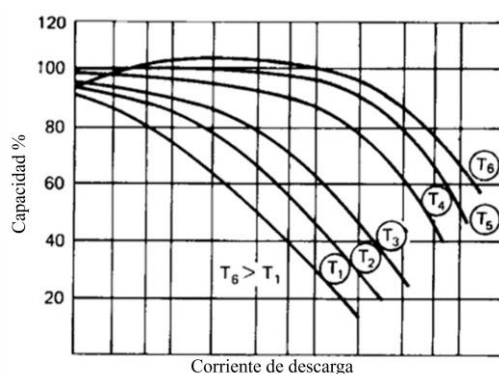


Figura 2-8. Efecto de la temperatura en la capacidad [3].

2.7.4 Edad de la batería

Independientemente de la tecnología de la que esté compuesta la batería, por norma general y con mayor o menor medida, estos productos son perecederos y se deterioran con el paso del tiempo debido a las acciones químicas que tienen lugar durante los procesos de carga y descargan, siendo el tipo de descarga uno de los mayores condicionantes en la vida útil de estas. En muchos casos se recomienda la refrigeración de las baterías dado que el fenómeno de autodescarga es directamente proporcional a la temperatura, sin embargo, las baterías refrigeradas suelen ser calentadas antes de la descarga para alcanzar la capacidad máxima [3].

Algunos sistemas implementan películas protectoras en las superficies del electrodo durante su almacenamiento, mejorando sustancialmente la vida útil de la batería. No obstante, este sistema produce un efecto conocido como “retraso de voltaje”, que se origina al principio de la descarga después de haber sido cargada, en el que el voltaje inicial suele ser menor hasta que se descomponga esa película protectora.

2.7.5 Auto-descarga

Una batería al no utilizarse durante un periodo de tiempo, dejando abierto su circuito externo, puede producir que el voltaje en sus terminales disminuya significativamente en comparación con su nivel previo. Este fenómeno se conoce como auto-descarga, un fenómeno normal en cualquier tipo de batería y que dependiendo de la tecnología puede ser más influyente, llegando al punto en que si esta descarga es demasiado intensa, puede convertirse en un problema, reduciendo la capacidad de la batería notablemente sin una posible causa aparente [3].

La auto-descarga ocurre principalmente mediante dos mecanismos: la auto-descarga superficial y la auto-descarga interna. La primera de toda se produce por la creación de una capa conductora altamente

resistiva creada por suciedad, agua u otros líquidos presentes en la batería. Por otro lado, la auto-descarga interna está asociada con las reacciones entre los electrodos y el electrolito. La velocidad de este fenómeno aumenta con la densidad del electrolito y la temperatura de almacenamiento de la batería.

Para el cálculo de la auto-descarga de manera cuantitativa, primero se mide la capacidad de la batería antes del almacenamiento, luego se espera un periodo de tiempo y finalmente se mide la capacidad de la batería al final del almacenamiento, pudiendo así calcular el porcentaje de autodescarga durante ese tiempo determinado.

Este efecto tiene mucho mayor impacto en baterías de plomo-ácido, donde su tasa de auto-descarga es relativamente alta, aproximadamente del 3-20% por mes, dependiendo de la temperatura y la calidad específica de la batería, sin embargo, para baterías de Litio, la tasa es mucho menor, generalmente de menos de un 5% por mes. Entre otras muchas causas, una de ellas es la temperatura, donde las baterías de Litio se ven menos afectadas, además las baterías de plomo-ácido se ven afectadas también por el efecto de sulfatación (creación de cristales de sulfato de plomo en las placas que pueden disminuir permanentemente la capacidad de la batería), el cual no existe en las baterías de Litio.

2.7.6 Estado de salud (SOH)

El estado de salud de las baterías es un factor fundamental para saber el estado de degradación de estas, no obstante, resulta complicada su obtención y medición directa. Las baterías de Litio-ion son ampliamente utilizadas por su alta densidad energética, sin embargo, el uso continuado de estas baterías provoca la degradación de sus componentes, especialmente en los electrodos y los separadores, experimentándose una pérdida de capacidad y de potencia. Sin embargo, es esencial tener un control preciso del estado de salud de las baterías que garantice su gestión eficiente y segura [3].

Para el cálculo del SOH se intenta medir cualquier parámetro que cambie significativamente con la edad, la conductividad o se pueda utilizar para proporcionar información relevante para la obtención del SOH. El estado de salud es relativo respecto a las condiciones iniciales de la celda, por lo que es importante llevar a cabo un registro inicial. Uno de los factores más condicionantes a la hora de saber el estado de una celda es la capacidad, es decir, llevar a cabo un registro de las capacidades de descargas obtenidas con el paso de los ciclos su uso y comprobar como disminuye con el paso de los ciclos. Algunas mediciones en ocasiones se centran únicamente en la impedancia interna, puesto que suele ser uno de los valores más importantes respecto al deterioro de la batería.

2.7.7 Estado de carga (SoC)

La estimación del estado de carga (State of Charge, SoC) de las baterías desempeña una importante función a la hora de analizar su rendimiento y su vida útil. La dificultad se encuentra en que estos dispositivos tienen un comportamiento dinámico que no es lineal en tiempo, por lo que averiguar la carga remanente en una batería es una tarea complicada.

El estado de carga se define como la capacidad total de almacenamiento disponible tras el consumo de parte de la energía almacenada en una batería. La estimación del SoC es esencial para manejar y llevar a cabo un control específico de las baterías, permitiendo realizar estrategias de cargas y descargas para maximizar el rendimiento.

Estimar de manera precisa el SoC sigue siendo una tarea complicada en gran medida también por la cantidad de variables que toman parte en la ecuación, como son los fenómenos de autodescarga, regeneración, histéresis, envejecimiento de la celda y la temperatura [13].

El SoC expresa la cantidad de carga instantánea restante en un dispositivo de almacenamiento de energía $SoC = \frac{Q_{disponible}}{Q_{nominal}}$, se representa como la relación de carga existente (Q disponible) y la capacidad total (Q nominal).

2.7.7.1 Estimación del SoC mediante el conteo de culombios (CC)

El método consiste en la integración de la corriente desde t_0 hasta t , y se describe con la siguiente ecuación, todo ello recogido en [13].

$$SOC_{(t)} = SOC_{(t_0)} - \frac{1}{AHC} \int_{t_0}^t i_{(t)} dt$$

Siendo:

$SOC_{(t)}$: El estado de carga para un instante determinado

$SOC_{(t_0)}$: El estado de carga inicial de la batería

AHC : Capacidad nominal o capacidad máxima de carga

$i_{(t)}$: Corriente de $\frac{\text{carga}}{\text{descarga}}$

La técnica del conteo de columb funciona razonablemente bien para baterías de Li-ion, las cuales ofrecen una alta eficiencia y baja autodescarga. Con este método se calcula la capacidad restante acumulando la carga transferida. Sin embargo, hay una serie de parámetros importantes para el implemento de este método como son el voltaje y la resistencia interna. Aunque sencillos de obtener, cambian irregularmente con la profundidad de descarga (DoD), la velocidad de carga/descarga y la temperatura ambiente, además depende en gran medida del estado de salud (SOH) de las baterías.

El DoD mencionado anteriormente se define como la capacidad total de energía disponible de la batería que se ha extraído antes de que esta se considere descargada por completo. Es un parámetro estrictamente relacionado con el SoC y se caracteriza mediante la siguiente fórmula:

$$DOD = 1 - SOC$$

Cuando la batería está en circuito abierto con corriente cero, se realiza una compensación de autodescarga para corregir los estados iniciales de carga y salud de la batería. Se considera que la batería ya no puede ser utilizada si el voltaje es mejor al voltaje de corte especificado en la hoja de datos del fabricante y debe ser recargada. Por otro lado, la batería se encuentra completamente cargada si alcanza el límite superior del voltaje también proporcionado por el fabricante.

2.8 Modelos de batería

Los modelos de batería se pueden dividir principalmente en dos categorías: los modelos electroquímicos y los modelos basados en circuitos equivalentes [14]. Los primeros se centran en las reacciones químicas dentro de la batería, mientras que los modelos de circuitos equivalentes tratan de emular el comportamiento eléctrico de la batería en un sistema simulado. Ambos modelos necesitan parámetros específicos de las baterías como suelen ser la resistencia interna o las curvas de cargas y descargas OCV.

2.8.1 Modelos electroquímicos

Los modelos electroquímicos se basan en los procesos electroquímicos subyacentes, pueden predecir la energía almacenada y suministrada por las baterías, sin embargo, ignoran fenómenos muy influyentes como son la variación del voltaje de salida durante la carga, la influencia de la temperatura y el envejecimiento. El modelo de Shepherd es un modelo ampliamente utilizado para el análisis del comportamiento de las baterías en vehículos híbridos. Este modelo se enfoca en el comportamiento electroquímico de la batería en términos de voltaje y corriente.

2.8.1.1 Modelo de Shepherd

El modelo de Shepherd es una herramienta que permite simplificar la estimación del estado de carga de una batería utilizando parámetros internos de la misma, como la tensión de circuito abierto. Este modelo utiliza principalmente factores como la resistencia interna, la tensión en bornes y la corriente de descarga. El modelo presenta una limitación ya que es posible que entre en un ciclo matemático que pueda afectar a la precisión de la simulación. Por eso se implementó un modelo de Shepherd mejorado que aborda ese problema de diseño matemático. La diferencia con el modelo original es que el nuevo, implementa una serie de constantes que evita que la simulación entre en un bucle matemático.

La siguiente expresión se utiliza en este nuevo modelo para modelizar las baterías:

$$E = E_0 - K \times \frac{Q}{Q - i \times t} - R \times i + A \times e^{-B \times i t}$$

Siendo E la tensión sin carga (V), E_0 la constante de voltaje de la batería (V), K el voltaje de polarización (V), Q la capacidad de la batería (Ah), $i \times t$ el estado de carga instantáneo (Ah), A el voltaje del inicio de la zona exponencial (V), B el inverso de la constante de tiempo de la zona exponencial (Ah)⁻¹, R la resistencia interna (Ω) y, por último, i la intensidad instantánea (A).

En el modelo original, hay un término no línea igualado a la fracción de la expresión $K \times \frac{Q}{Q - i \times t}$, que explica que cuando la batería se esta descargando y no circula la corriente, la tensión en bornes tiende hacia la expresión E_0 y al comenzar a circular la corriente de nuevo, el voltaje disminuye de manera instantánea. Esto es en realidad es el proceso que sucede en una batería de manera experimental y que por lo tanto describe con exactitud el modelo dinámico al que se ve sometido una batería en los procesos de descarga, sin embargo, el modelo matemático compromete la exactitud de los resultados. Es por eso que se utiliza el modelo nuevo, el cual presenta gran precisión en los resultados y no compromete la viabilidad del modelo [15].

2.8.2 Modelos basados en circuitos equivalentes

Los modelos basados en circuitos equivalentes representan a la batería como un circuito eléctrico. Estos modelos suelen ser sencillos y tener un comportamiento lineal, consisten en una fuente ideal con un voltaje de circuito abierto y una resistencia interna, sin embargo, existen más complejos donde se incluyen elementos adicionales como un condensador y resistores que consiguen modelar el comportamiento no lineal de las baterías. En ambos modelos, los valores de los parámetros, como el voltaje de circuito abierto y la resistencia interna pueden variar según las condiciones de funcionamiento de la batería, afectadas principalmente por el estado de salud, la temperatura y las intensidades de funcionamiento requeridas [16].

2.8.2.1 Modelo de Thévenin

El modelo equivalente de Thévenin forma parte de uno de los modelos basados en circuitos equivalentes que intentan explicar el comportamiento de una batería definiéndola como un sistema eléctrico. En el caso del circuito de Thévenin que se presenta en la Figura 2-9, está formado por una fuente, dos resistores y un condensador.

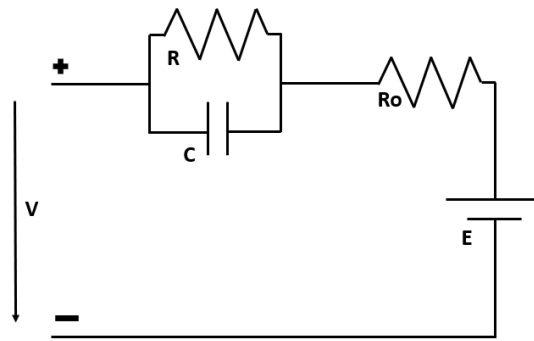


Figura 2-9. Modelo de Thévenin [Fuente propia].

El resistor (R) modela el comportamiento de la resistencia interna de la batería, el condensador (C) modela la capacidad en los electrodos de las celdas y el (R_o) explica la resistencia con un comportamiento no lineal entre los electrodos y los electrolitos. Sin embargo, este modelo, presenta algunas dificultades para su implementación en un modelo de una batería, por tanto, se aplica una simplificación al presente modelo representado en la Figura 2-10, que, aunque con un funcionamiento muy similar tiene la limitación de no explicar el funcionamiento lineal que verdaderamente sigue la resistencia interna de una batería de estas características.

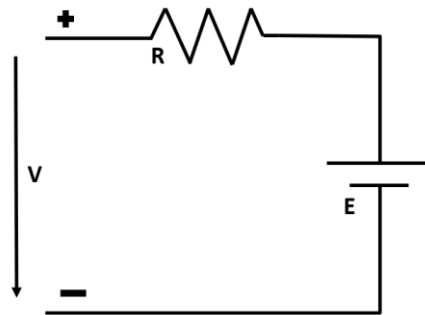


Figura 2-10. Modelo de Thévenin simplificado [Fuente propia].

En este modelo se asume que todos los elementos tienen un valor constante, es decir, la resistencia interna que depende de muchos factores como puede ser la edad de la batería, el estado de carga y las condiciones de funcionamiento, intensidades de cargas y descargas, se presenta como un valor constante durante el modelado, perdiendo por tanto rigor científico a la hora de diseñar un modelo matemático pero que simplifica enormemente el procedimiento de la creación del modelaje.

A estos modelos se suelen implementar otros parámetros como el coeficiente de Peukert para una mejor aproximación del comportamiento real de una batería, ya que por sí solo, el modelo de Thévenin no es capaz de demostrar todos los factores a tener en cuenta si se quiere realizar un modelo que defina bien el comportamiento de una batería.

3 MODELADO DE LA BATERÍA

3.1 Introducción

En este apartado se desarrollará el modelo de una batería que caracterice el comportamiento de estas de forma genérica. Se partirá de un modelo simplificado de circuito equivalente de una batería, y a partir de este se desarrollarán las ecuaciones que permitan modelar cada una de las partes de este circuito, para posteriormente combinarlas en un modelo global. Para dicho modelado se empleará el software de programación Matlab, utilizando tanto el propio entorno propio del programa como el entorno de diagramas de bloque de Simulink, incluido en el mismo programa.

La creación del modelo supone poder estimar el comportamiento de un sistema complejo en el que es difícil conocer el comportamiento de la química interior de las celdas, es por eso, que se han desarrollado una serie de modelos generales que intentan predecir el consumo energético en los procesos de carga y descarga, a partir de parámetros fundamentales como son la intensidad y la tensión de circuito abierto, entre otros. Para el presente modelo de batería se combinarán dos modelos dinámicos ampliamente utilizados, el modelado de Thévenin junto al modelado de Peukert, que permitirán estudiar el comportamiento de la batería frente a cambios dinámicos en su funcionamiento.

3.2 Circuito equivalente de la batería

La primera etapa en la simulación del modelado de la batería consiste en desarrollar un circuito equivalente que permita simplificar y entender el comportamiento interno de la celda. Este circuito está compuesto por elementos que tiene un comportamiento predecible específico. Mediante la simplificación del circuito equivalente de Thévenin, se podrá obtener la tensión de circuito abierto (Open Circuit Voltage, OCV) en función de su estado de carga, la resistencia interna de la batería y la intensidad que circula por la misma [17].

Mediante la elección de este circuito, los parámetros mencionados anteriormente necesarios para la construcción del modelo se pueden obtener de manera experimental, lo que facilita el ajuste del modelo y permite manejar ecuaciones simples que explican el comportamiento del circuito. A pesar de su simplicidad, este modelo permite obtener con precisión el comportamiento dinámico de una batería al ser cargada o descargada bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

La siguiente Figura 3-1 que se muestra es el modelo de circuito equivalente seleccionado para estudiar el comportamiento de la batería:

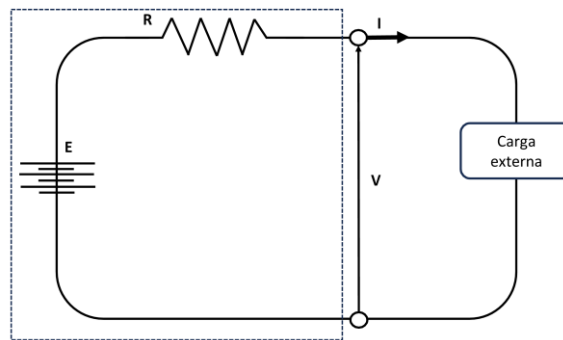


Figura 3-1. Circuito equivalente de la batería [Fuente propia].

Se puede observar el circuito propuesto, donde E es la tensión de circuito abierto expresada en voltios [V], R la resistencia interna propia de la celda en ohmios [Ω], V es la tensión entre bornes y, por último, I es la intensidad en amperios [A].

Una vez presentado el circuito equivalente, en los siguientes apartados se describirán las ecuaciones para caracterizar cada uno de estos parámetros, y que a posteriori permitirán modelar el comportamiento de las celdas.

Por lo tanto, en los siguientes apartados se describirán cada uno de estos elementos, con el objetivo de conseguir un modelo de circuito equivalente funcional en Matlab/Simulink y que se detallan a continuación: Tensión de circuito abierto, Intensidad, Capacidad, Carga eliminada y suministrada, Estado de carga y Resistencia interna

3.3 Tensión de circuito abierto

En este apartado se determina la función que consigue representar en el modelo de Simulink la curva que describe una batería durante las cargas y las descargas. Las curvas de OCV tienen una morfología diferente dependiendo del tipo de batería y de la tecnología por la que estén formada. La morfología de las curvas depende además de otros factores como la temperatura o la intensidad de carga y descarga a la que estén sometidas las celdas.

3.3.1 Tipos de curvas OCV

Por lo general los valores normales de tensión de una celda para las cargas y descargas suelen oscilar desde los 2 V hasta los 4 V para las baterías de litio. Cuando la batería se somete a una descarga, se le aplica una intensidad capaz de llevar la tensión hasta el mínimo establecido por el fabricante, siendo este su estado de carga equivalente al 0%. En el proceso de carga, al someter a la batería a una intensidad de carga, durante aproximadamente el 10% de su carga total, aumenta considerablemente su tensión hasta un nivel donde permanece prácticamente igual durante el 80% de su carga hasta el último 10% donde vuelve a subir ligeramente de tensión llegando a su tensión nominal de carga establecida por el fabricante. El comportamiento para las descargas es algo diferente y la curva no tiene una forma tan acentuada, por lo general, durante la descarga la tensión baja levemente antes de haber descargado si quiera el 5% de la capacidad y permanece a voltaje constante prácticamente hasta llegar al último 10 % de capacidad de la batería. Las baterías que se están estudiando presentan una conducta similar al proceso que se acaba de explicar, y se acentuará esta curva en función de las demandas de consumo y de la intensidad suministrada a la batería.

Estas curvas suelen estar proporcionadas por el fabricante, sin embargo, uno de los objetivos de este trabajo es modelar el comportamiento de una batería de manera experimental, que se explicará más adelante el proceso que se ha llevado a cabo para conseguir modelar la curva.

En la Figura 3-2 que se muestra a continuación, se pueden observar diferentes baterías para un proceso de descarga y como estas tienen una morfología específica para cada tipo de batería:

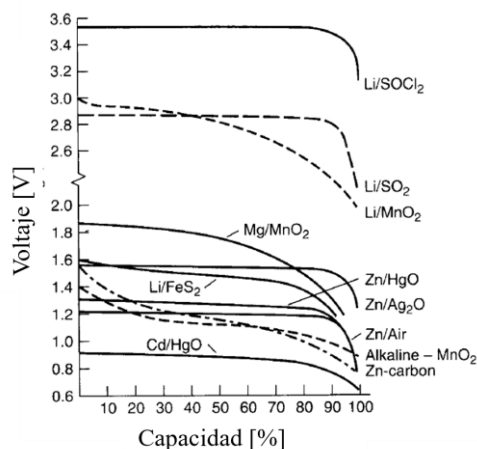


Figura 3-2. Curvas OCV de diferentes baterías [3].

Muchas de las curvas de las baterías tienen una tendencia similar, sin embargo, hay diferencias que hay que tener en cuenta para el modelo de la batería, como es la tensión de inicio y final de la descarga. Cada tecnología tiene un voltaje inicial y final de descarga y será uno de los mayores condicionantes para concluir que el modelo es capaz de realizar unas simulaciones satisfactorias. Por lo general una batería de tipo LiFePO₄, que son objeto de estudio, presenta una curva marcada en forma de “S” para las cargas y descargas como las presentes en la figura.

3.3.2 Modelado OCV

Para simular el comportamiento de las baterías es necesario modelar las curvas OCV tanto para las cargas como para descargas, puesto que sí se conoce como cambia el voltaje a lo largo del tiempo y del estado de carga de las baterías, es posible representar dichas curvas mediante un ajuste con una ecuación polinómica.

Existen varias opciones para obtener el polinomio de la curva, en ocasiones, los datos pueden estar suministrados por los fabricantes de la batería, sin embargo, uno de los objetivos de este TFG era conseguir los parámetros de manera experimental mediante ensayos. Es por eso, que se ha utilizado la herramienta Matlab para obtener dicho polinomio y desde la herramienta Simulink se empleará el bloque denominado como “OCV” para ejecutar la aproximación polinomial a partir de los valores del estado de carga (SoC). Esto se puede apreciar en la Figura 3-3 que a continuación se muestra:

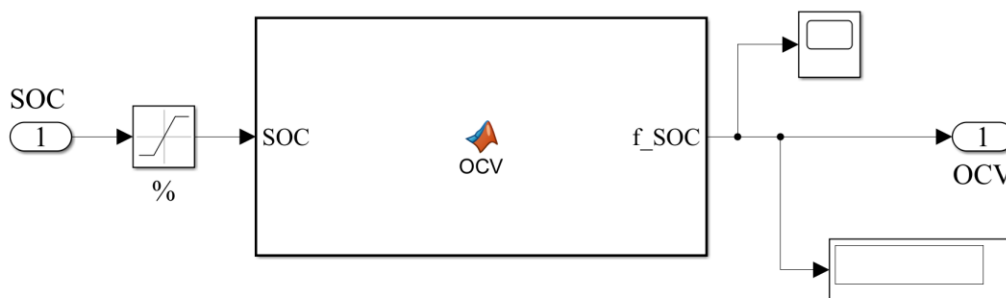


Figura 3-3 Bloque de cálculo de la tensión de circuito abierto (OCV) [Fuente propia].

El bloque obtiene directamente los valores desde la entrada SOC, que hace referencia al estado de carga, siendo estos valores del 0 al 100 que permiten simular de forma dinámica la curva del proceso de carga/descarga de la batería a lo largo del tiempo. Se le añaden tres herramientas al bloque, la primera de todas, empezando de izquierda a derecha, sirven para establecer los límites que se quieren dejar entrar en la función, la segunda es la herramienta “Scope” que permite ver los resultados de las gráficas que se intentan modelar y por último la herramienta “Display” para visualizar el correcto resultado numérico de la simulación, esto devuelve unos valores a lo largo del tiempo que salen por la salida OCV y se utilizará en otros bloques.

3.4 Intensidad

Para el modelo de la batería, es fundamental calcular la intensidad que circula en cada instante de tiempo, de forma que se puedan controlar las simulaciones y ajustar el valor de la corriente para cada una de las simulaciones. Para ello se emplea la Ley de Ohm que relaciona la corriente I [A] de la batería con la potencia P [W]:

$$P = V \times I \quad \text{Ec.1}$$

Donde V es el voltaje, que se puede relacionar con la ecuación básica que explica el voltaje de la batería:

$$V = (V_{ocv} - IR_{int}) \quad \text{Ec.2}$$

Siendo V_{ocv} la tensión en circuito abierto de la batería [V], I la intensidad [A] y R_{int} la resistencia interna [Ω].

Combinando ambas fórmulas, se queda la expresión: $P = (V_{ocv} - IR_{int}) \times I$; donde despejando la intensidad, se obtiene una fórmula que permite modelar la intensidad a partir de parámetros conocidos:

$$I = \frac{V_{ocv} - \sqrt{V_{ocv}^2 - 4R_{int}P}}{2R_{int}} \quad \text{Ec.3}$$

Una vez obtenida la expresión necesaria, se traslada a Simulink para crear el bloque del cálculo de la intensidad (Figura 3-4):

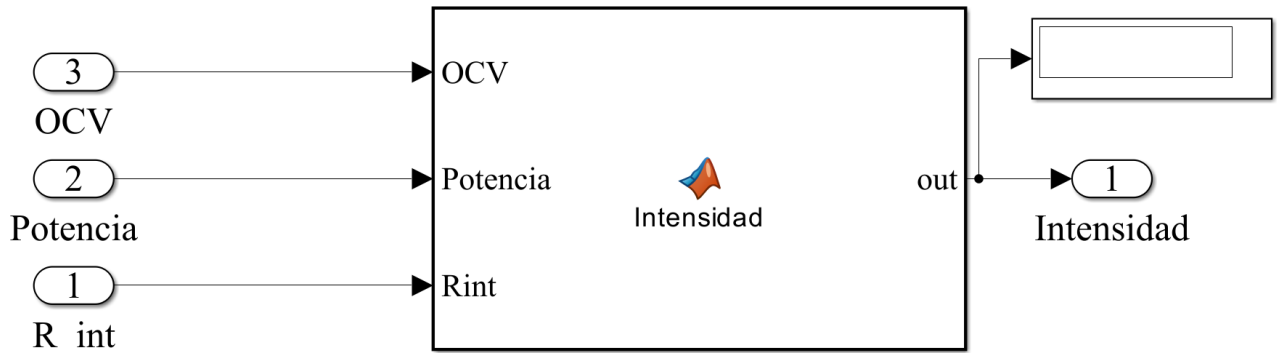


Figura 3-4. Bloque del cálculo de la intensidad [Fuente propia].

El bloque de cálculo de la intensidad implementa la Ecuación 3 sirviéndose de la potencia, que es una constante que se establece en el modelo, la resistencia interna que se explicará en detalle más adelante y el voltaje calculado en el apartado anterior, devolviendo un valor de intensidad que se utilizará posteriormente para calcular la carga eliminada/suministrada.

3.5 Capacidad de Peukert

La capacidad de Peukert es uno de los bloques para modelar una batería utilizando el modelo de Peukert. La ecuación de Peukert explica como la capacidad efectiva de una batería disminuye en función del aumento de la tasa de descarga, cuanto más rápido se descargue esta, menos energía total se podrá extraer de la batería[18]. Para corregir este efecto, Peukert desarrollo en 1897 la siguiente fórmula:

$$C_p = t \times I^k$$

Siendo C_p la capacidad teórica corregida de la batería (Ah), t el tiempo de descarga/carga (h), I la intensidad de descarga/carga (A) y k el coeficiente de Peukert, siendo este último el parámetro que se averiguará de manera experimental mediante descargas a diferentes intensidades en el apartado [4.6].

El coeficiente de Peukert es fundamental para estimar el almacenamiento real estimado de una batería, el concepto es particularmente usado en las baterías con tecnologías de plomo-ácido, debido a que estas sufren más las variaciones de capacidad en función de la intensidad de descarga, aunque en este caso las variaciones son menos pronunciadas para las tecnologías que se están utilizando, también juegan un papel fundamental en el modelado de estas baterías.

La expresión que se utiliza para el cálculo del coeficiente de Peukert es la siguiente:

$$K = \frac{\log t_2 - \log t_1}{\log \left(\frac{C_1}{t_1} \right) - \log \left(\frac{C_2}{t_2} \right)} \quad \text{Ec.4}$$

Siendo C_1 y t_1 la capacidad y el tiempo total para la descarga a una baja intensidad, mientras que, C_2 y t_2 se corresponden con una descarga a alta intensidad. Estos datos se han obtenido de manera experimental en los ensayos de laboratorio.

La capacidad de Peukert tiene un rol imprescindible en el modelado de la batería ya que permitirá tener unas simulaciones de cargas y descargas lo más cercanas al verdadero funcionamiento de las baterías. Para ello se ha implementado un bloque que se muestra en la siguiente Figura 3-5:



Figura 3-5. Bloque de cálculo de la capacidad de Peukert [Fuente propia].

Donde se obtiene la capacidad de Peukert utilizada en el cálculo del estado de carga que se explicará a continuación. El bloque utiliza los valores de la intensidad a la que se está realizando la simulación y el tiempo de descarga del procedimiento de manera análoga a la intensidad y, por último, el coeficiente de Peukert representado como “Kp_c” que se obtiene de un bloque aparte de la siguiente forma como se muestra en la Figura 3-6:

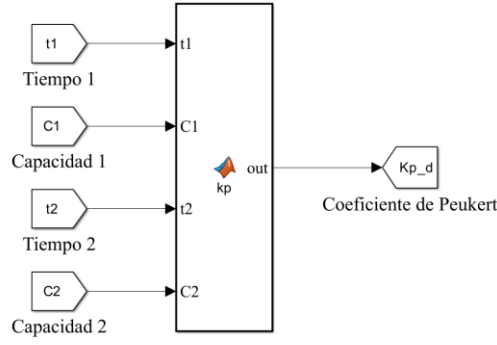


Figura 3-6. Bloque de cálculo del coeficiente de Peukert [Fuente propia].

Este bloque resulta imprescindible para el modelo de la batería y es el único bloque que se encuentra aparte del modelo, ya que se utiliza en más de uno de los bloques para los cálculos de la simulación. Los valores de Tiempo 1, Capacidad 1, Tiempo 2 y Capacidad 2 que se han obtenido de manera experimental en los ensayos del laboratorio se combinan mediante una función en Matlab que consigue operar la Ecuación 4.

3.6 Carga eliminada y suministrada

Para poder calcular la cantidad real de energía eléctrica que se ha descargado de la batería o que ha sido suministrada durante el proceso de carga, es necesario establecer un bloque que proporcione la carga eliminada y suministrada (Charge Remained Charge supplied, CRCS). Como se explica en [18], la corriente I [A] de una batería utilizando el modelo de Peukert se debe escribir como I^k , siendo “ k ” el coeficiente de Peukert. Por lo tanto, siempre que la intensidad y el módulo de Peukert sean mayores que uno, la intensidad final que se sustrae de la batería va a ser mayor que la corriente establecida. La expresión que relaciona los elementos relacionados es la siguiente:

$$CR = \frac{I^k \times \delta t}{3600} [\text{Ah}] \quad \text{Ec.5}$$

Siendo I^k la intensidad en función del modelo de Peukert y δt la derivada del tiempo expresado en [s]; necesario, por tanto, dividir la fórmula entre 3600 para poder expresar el resultado en Amperios-hora. Esta fórmula solo es necesaria aplicarla en el proceso de descarga (Charge Remained) puesto que para el proceso de carga no se utiliza el coeficiente de Peukert por considerarse despreciable para el cálculo. Quedando la siguiente ecuación para la carga suministrada (Charge Supplied)

$$CS = \frac{I \times \delta t}{3600} [\text{Ah}] \quad \text{Ec.6}$$

Obteniendo el siguiente bloque para el cálculo del CRCS (Figura 3-7):

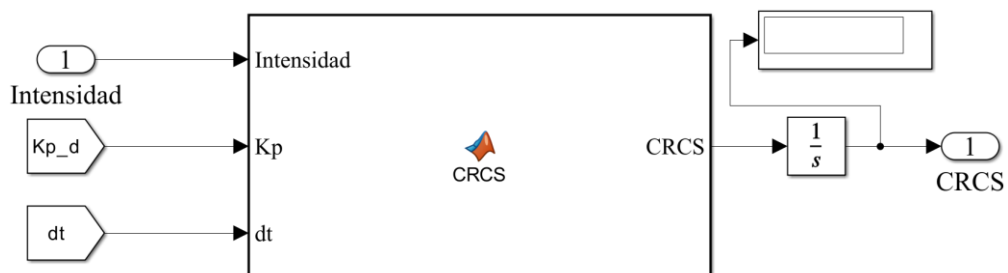


Figura 3-7. Bloque de cálculo de CRCS [Fuente propia].

El bloque de la intensidad se conecta directamente a este bloque para utilizarlo en la función implementada CRCS, además también se utiliza el coeficiente de Peukert (Kp_c) cuyo valor se encuentra calculado en otro bloque del modelo y la intensidad calculada previamente. La última herramienta que se representa como $1/s$ permite realizar una integral a la salida del bloque, necesaria para obtener correctamente la carga eliminada/suministrada debido a la derivada que se puede observar en la Ecuación 5.

3.7 Estado de carga

Este bloque tiene como objetivo calcular el estado de carga de la batería (Estate of Charge, SoC), que se relaciona directamente con los parámetros calculados anteriormente y con el nuevo concepto de profundidad de descarga (DoD) [18], que se refiere al porcentaje de la capacidad total de una batería que ha sido utilizado en comparación la con la capacidad máxima de la batería. Se relaciona mediante la capacidad de Peukert y la CRCS con la siguiente expresión:

$$DoD = \frac{CRCS}{C_{Peukert}} \quad \text{Ec.6}$$

Siendo CRCS la carga eliminada/suministrada y $C_{Peukert}$ la capacidad de la batería una vez modelada por Peukert. Mediante la obtención de la profundidad de descarga se puede obtener directamente mediante una sencilla operación, que a continuación se mostrará, el estado de carga (SoC) que es el valor que realmente se necesita para el modelo de la batería:

$$SoC = 1 - DoD \quad \text{Ec.7}$$

Estas operaciones se han implementado dentro del siguiente bloque (Figura 3-8):

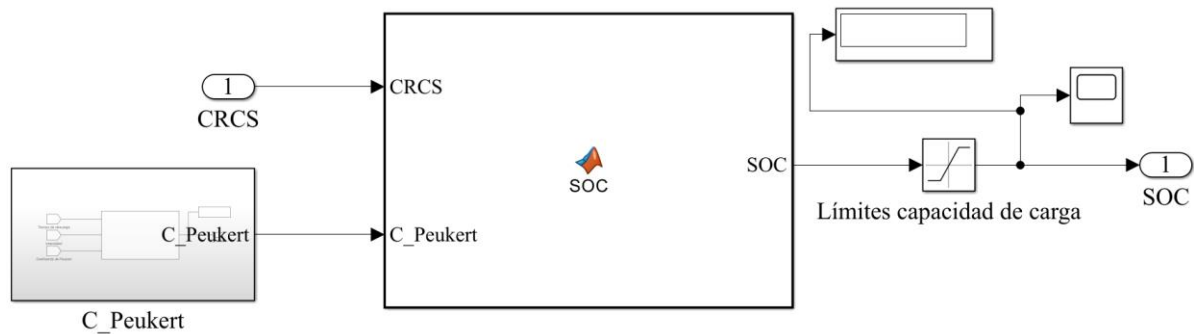


Figura 3-8. Bloque de cálculo del estado de carga (SoC) [Fuente propia].

La entrada de bloque CRCS se conecta directamente en serie al bloque de estado de carga y también se conecta el bloque de capacidad de Peukert ($C_{Peukert}$) explicado anteriormente. Por último, se añade una función que limite los valores del estado de carga entre 0 y 100 para prevenir fallos en el modelo y las herramientas “Scope” y “Display” para comprobar los resultados que se obtienen. Saliendo el valor del SoC hasta el primer bloque del modelo del cálculo, denominado como tensión de circuito abierto.

3.8 Modelado de la resistencia interna

Las baterías están formadas por materiales que, aunque conductores, no lo son completamente, esto implica que con el paso de la corriente estas ofrezcan una pequeña resistencia que se opone parcialmente al paso de la corriente. Es un elemento intrínseco en las baterías y caracteriza el comportamiento de estas

[19]. Para el modelado de la batería se ha obtenido de manera experimental el valor de la resistencia interna mediante la media de los valores obtenidos a lo largo del tiempo de varias cargas y descargas, puesto que el valor de la resistencia interna varía en función del estado de carga de las baterías.

Volviendo al primer apartado de este capítulo, la resistencia en el circuito equivalente de Thévenin se utiliza para predecir el funcionamiento de una fuente de tensión real, representando las pérdidas internas de la batería que causan una caída de voltaje. La resistencia interna afecta a la cantidad de energía que se puede entregar a la batería en la carga como a la cantidad de energía desperdiciada en forma de calor dentro de la propia batería. Una resistencia interna con un valor bajo es deseable si se busca la eficiencia y proporcionar más energía sin que la batería sufra una gran caída de voltaje.

Los valores de forma general para las resistencias de batería de Li-ion dependen en gran medida de varios factores, como son el tamaño, el estado de carga y la temperatura, sin embargo, los valores suelen ir desde los 300 mΩ para pequeñas celdas cilíndricas recargables hasta decenas de mΩ para baterías de mayores dimensiones que suelen ser utilizadas en vehículos eléctricos.

La siguiente expresión que aquí se indica se implementa en bloque de Matlab para su posterior utilización en el modelo global.

$$R_{int_{conjunto}} = \frac{R_{int_{unitaria}}}{C_{bateria}}; \quad \text{Ec.8}$$

Siendo la $R_{int_{unitaria}}$ la resistencia obtenida expresada en [Ω] de manera experimental explicada en [4.5], $C_{bateria}$ la capacidad de la batería expresada en [Ah].

La siguiente Figura 3-9 que se muestra, corresponde con el bloque de cálculo de la resistencia interna que está directamente conectado al bloque de cálculo de la intensidad:

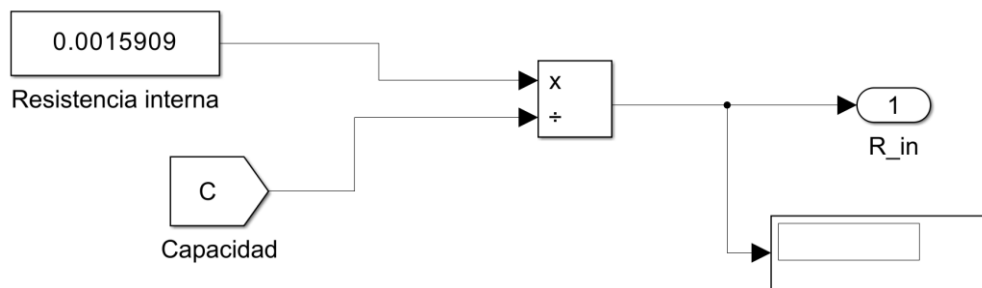


Figura 3-9. Bloque de cálculo de la resistencia interna [Fuente propia].

En este caso, al estar modelando únicamente una celda de batería y no un conjunto de estas, no es necesario multiplicar por el número de celdas, simplemente bastaría con multiplicar la capacidad teórica de la batería con la resistencia interna calculada de manera experimental.

3.9 Modelo global de la batería

Por último, en este apartado, se presentará el modelo completo para la simulación del comportamiento de la batería, teniendo en cuenta todos los sub-bloques mencionados anteriormente. El conjunto global de la batería se corresponde con dos bloques, el primero de ellos, denominado como “potencia”, simplemente es una constante donde se asigna un valor de la potencia y el segundo, “batería”, corresponde con el modelo en sí de la batería, que contiene todos los bloques que modelan el comportamiento.

Para que el modelo funcione es necesario suministrarle una potencia en función del proceso que se quiera simular, para la carga de la batería se establece una carga positiva simulando el suministro de

energía al dispositivo y para las descargas bastaría se establece una potencia negativa simulando un consumo eléctrico de la batería.

Siendo el conjunto del modelo el siguiente que se presenta en la Figura 3-10:

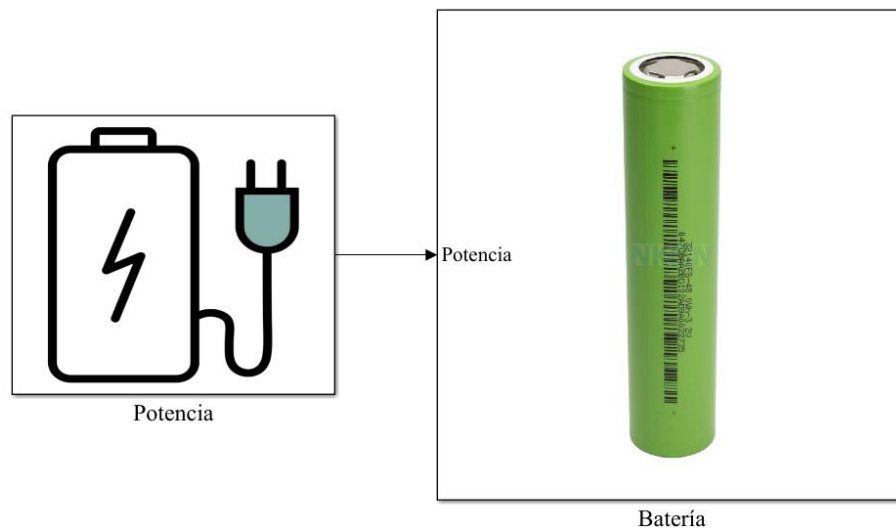


Figura 3-10. Módulo de la batería [Fuente propia].

En el interior del segundo bloque denominado como “Batería”, existen dos sub-bloques que, aunque parecidos, sus diferencias residen en las funciones internas que afectan al modelado del comportamiento de la batería, en función de si la batería se encuentra en un proceso de carga o de descarga.

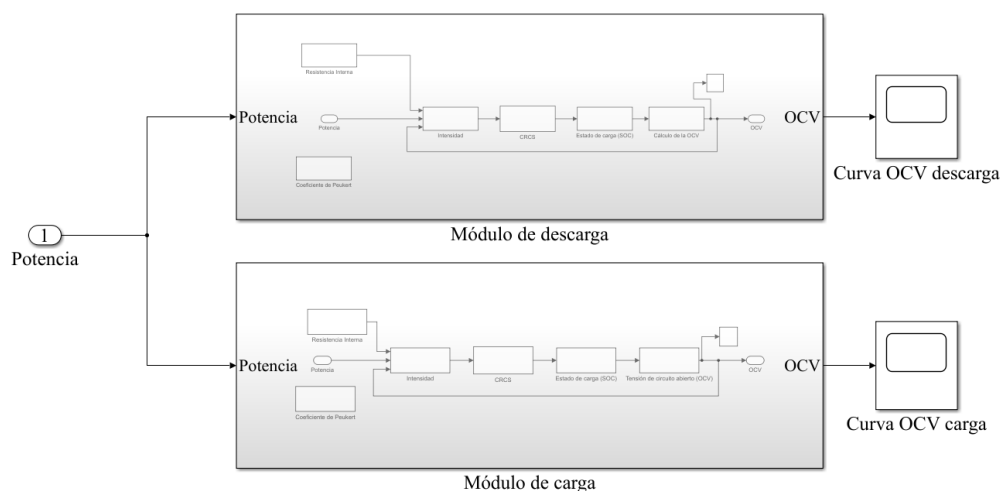


Figura 3-11. Bloques de carga y descarga de la batería [Fuente propia].

Los dos bloques que se muestran en la Figura 3-11, son los principales que desarrollan el modelado de la batería, diferenciados únicamente en las funciones que residen en algunos de los bloques como el de la intensidad y la tensión de circuito abierto (OCV) en su interior. Ambos se encuentran conectados a la misma entrada de potencia, a la cual, se le da el valor desde el bloque representado en la Figura 3-10 en función del proceso que se pretenda simular.

Ambos bloques disponen a la salida de estos la herramienta “Scope” que permitirá representar la curva final de la simulación, que se comparará con la obtenida con el cargador para verificar la veracidad y precisión del modelo

El interior de estos bloques que se puede ver en la siguiente Figura 3-12, corresponde con la unión de cada uno de los bloques presentados y explicados anteriormente:

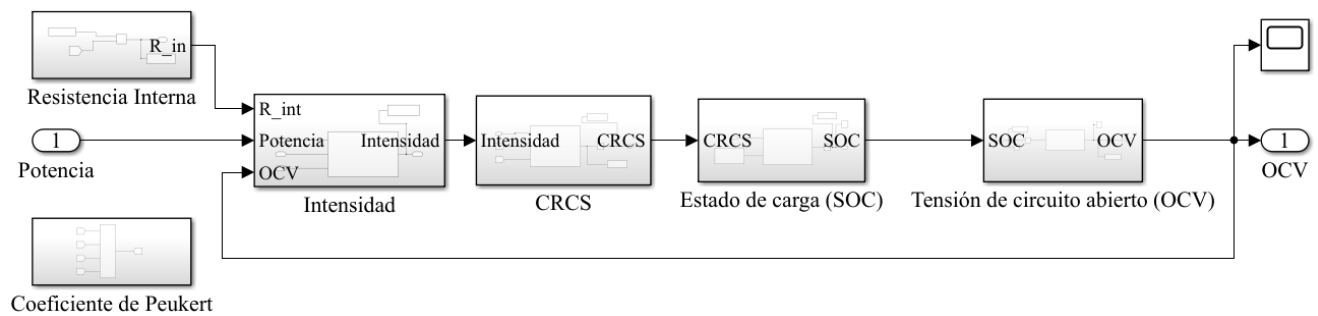


Figura 3-12. Módulo de carga/descarga de la batería [Fuente propia].

Ambos bloques tienen las mismas funciones internas de Matlab, sin embargo, para tener una mayor precisión en la simulación de los procesos, fue necesario realizar dos aproximaciones polinomiales, las cuales no se pueden combinar en un mismo bloque, además tuvieron que hacerse algunos ajustes para que el bloque de la intensidad y la CRCS funcionasen para valores de potencia negativos de forma que se pudiera simular lo explicado al principio del apartado.

El bloque de carga/descarga entrega a la salida unos valores de voltaje en función del tiempo de la simulación, denominados como “OCV”, que corresponden con la curva explicada anteriormente y se puede visualizar mediante la herramienta “Scope”.

Todos los bloques se encuentran conectados entre sí porque siguen una secuencia donde cada uno es dependiente del anterior para finalmente obtener la curva OCV de carga/descarga, a excepción del “Coeficiente de Peukert” que se utiliza en más de un bloque.

4 ENSAYOS EXPERIMENTALES

4.1 Introducción

En el capítulo previo, se explicó el modelo teórico que simulaba el comportamiento de una batería. Una vez definido el circuito equivalente y los elementos que lo conforman, el siguiente capítulo profundiza en cómo se han obtenido a partir de los ensayos realizados en el laboratorio de manera experimental, los parámetros necesarios de implementar para que el modelo simule el comportamiento de las baterías.

Además, se describirán los métodos de carga y descarga empleados para llevar a cabo los ensayos, junto con una descripción del cargador con el que se recopilaban los datos esenciales de voltaje, corriente y tiempo para la realización de la curva OCV, la resistencia interna y el coeficiente de Peukert. Se estudiarán también las características de las tres baterías comerciales y, finalmente se realizarán las simulaciones de las baterías contrastando los resultados con los obtenidos de los ensayos reales.

4.2 Baterías y equipo de ensayos

En el presente apartado se desglosarán los tipos de celdas utilizadas en los ensayos del laboratorio, formadas por dos baterías con tecnología LiFePO_4 y una última con tecnología Li-ion. Además, también se indicará el cargador/descargador utilizado para los ensayos junto con el software que proporciona.

Las celdas de baterías utilizadas forman parte del grupo de celdas cilíndricas recargables cuyo uso se está extendiendo ampliamente por sus características. La diferencia de las baterías que se encuentran en estudio, con las utilizadas en la industria automovilística se basan en la capacidad [Ah], siendo las de este TFG considerablemente menores, en parte para la reducción de los tiempos de ensayos [13-15].

4.2.1 Batería de litio-ion Panasonic

Este tipo de celdas de litio cilíndricas se caracteriza por tener una alta densidad eléctrica, se utilizan especialmente en vehículos eléctricos como pueden ser bicicletas, scooters, y herramientas eléctricas que requieren de una importante cantidad de energía. Además de esto, este tipo de celdas carecen de efecto de memoria, evitando consumir ciclos de carga de la batería que es el causante directo de acortar la vida útil. Esta batería servirá para comprobar si el modelo que se ha construido es capaz de simular el comportamiento de una batería que no fuese de LiFePO_4 .

Fabricante:	PANASONIC
Modelo:	NCR18650GA
Composición	Litio-ion
Voltaje nominal:	3,6 V
Capacidad nominal:	3,45 Ah
Tensión de carga:	4,2 V
Tensión de descarga:	2,5 V
Máxima corriente de carga:	10 A
Máxima corriente de descarga:	10 A
Corriente de carga nominal:	1,475 A
Corriente de descarga nominal:	6 A
Imagen	

Tabla 4-1. Características batería de Li-ion Panasonic NCR18650GA.

4.2.2 Batería de LiFePO_4 Lithium Werks

Es la celda de menor dimensión y capacidad pero que ofrece muy buenas prestaciones cuando se utiliza a bajas intensidades. Su funcionamiento se ve comprometido cuando se somete a altas intensidades, principalmente por la poca capacidad de la que disponen. Están especialmente diseñadas para ofrecer una gran potencia y una alta durabilidad. Además, están preparadas para mantener hasta el 80% de su capacidad en más de 1000 ciclos de carga.

Fabricante:	LITHIUM WERKS
Modelo:	ANR26650M1-B
Composición	LiFePO_4
Voltaje nominal:	3,3 V
Capacidad nominal:	2,5 Ah
Tensión de carga:	3,6 V
Tensión de descarga:	2,0 V
Máxima corriente de carga:	15 A
Máxima corriente de descarga:	70 A
Corriente de carga nominal:	3,6 A

Corriente de descarga nominal:	3,6 A
Imagen	

Tabla 4-2. Características batería de litio-ion Lithium Werks ANR26650M1-B.

4.2.3 Batería de LiFePO_4 PFS Energy

Esta celda de batería es la que dispone de una mayor capacidad y soporta mejor las descargas y cargas a altas intensidades. Por sus características esta es la batería que mejor debería de comportarse frente a las simulaciones, especialmente aquellas que sean a elevadas intensidades. Tienen muy buenas prestaciones para sus reducidas dimensiones, se suelen utilizar como sistemas de almacenamiento para vehículos eléctricos, iluminación solar y sistemas de respaldo de energía.

Fabricante:	PFS Energy
Modelo:	32140FS
Composición	LiFePO_4
Voltaje nominal:	3,2 V
Capacidad nominal:	15 Ah
Tensión de carga:	3,6 V
Tensión de descarga:	2,0 V
Máxima corriente de carga:	30 A
Máxima corriente de descarga:	90 A
Corriente de carga nominal:	7,5 A
Corriente de descarga nominal:	7,5 A
Imagen	

Tabla 4-3. Características batería de litio PFS Energy 32140FS.

4.3 Cargador /descargador de baterías y software

Para lograr el objetivo de este TFG era necesario disponer de un dispositivo que permitiese obtener los parámetros de las baterías que sirviesen posteriormente para la creación del modelo. Finalmente se empleó el siguiente cargador que además de las características que a continuación se adjuntan en la siguiente tablada, permite recopilar los datos del voltaje y la corriente en función del tiempo [22]:

Modelo:	ZKETech EBC-A20 Capacity Tester
Intensidad máxima de carga:	5 A
Intensidad máxima de descarga:	20 A
Potencia máxima	85 W
Imagen	

Tabla 4-4. Características del cargador/descargador.

Unas de las grandes ventajas de este dispositivo es que dispone de un software que permite programar las cargas y descargas con la configuración más adecuada para el tipo de tecnología, con la posibilidad de trabajar desde un ordenador. Además, ofrece la oportunidad de tener un registro de datos en tiempo real. Las siguientes imágenes muestran las posibilidades y la interfaz que utiliza el software del dispositivo:

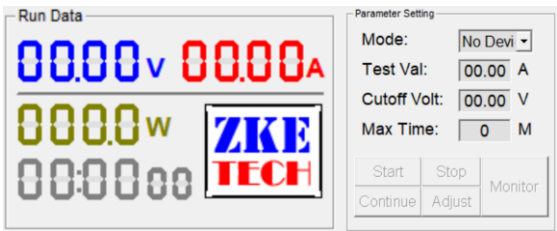


Figura 4-1. Interfaz de programación de las cargas y descargas [Fuente propia].

La Figura 4-1 forma parte de la interfaz que ofrece el cargador, en la parte derecha de la figura, correspondiente con “Run data”, se puede ver en todo momento el valor del voltaje en ese mismo instante, la intensidad que está circulando, la potencia acumulada total de la batería y, por último, el tiempo total de la descarga/carga.

Por otro lado, en la zona de la derecha denominada “Parameter Setting” es donde se configuran tanto los modos de carga y descarga, que posteriormente se explicarán en detalle, como la corriente y la tensión de corte para el proceso, en función de las especificaciones del fabricante.

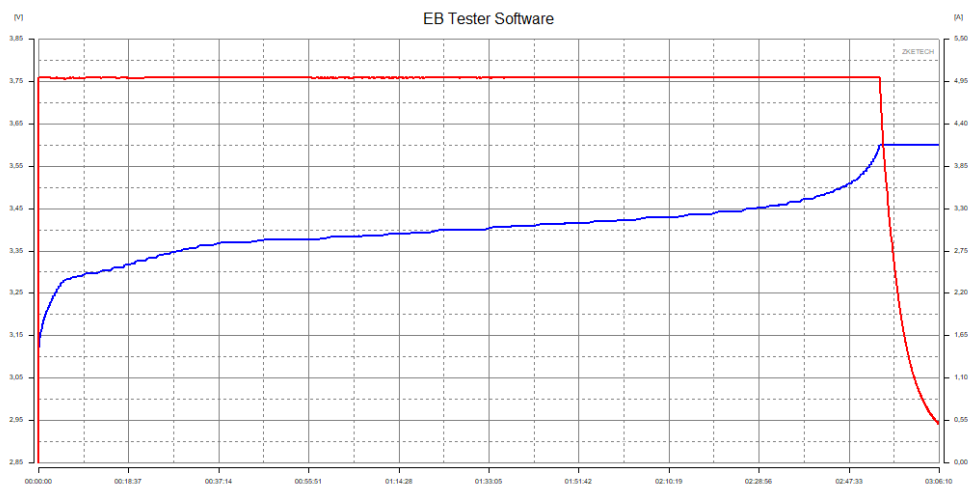


Figura 4-2. Representación de los datos de voltaje e intensidad en una carga [Fuente propia].

La Figura 4-2 muestra la interfaz del software. La curva azul corresponde con el voltaje en función del tiempo para la carga de una de las baterías, el eje se encuentra en la columna de la izquierda con las unidades en [V], mientras que la curva roja representa la intensidad que se le está suministrando en el proceso, con su eje a la derecha en [A].

4.3.1 Montaje experimental

Para el montaje experimental se conectaron las baterías al cargador ZKETech junto a un dispositivo portátil, para la recopilación de los datos proporcionados por el software (Figura 4-3):

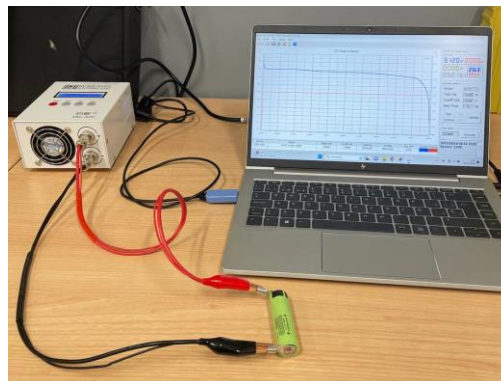


Figura 4-3. Montaje de los ensayos [Fuente propia].

Se realizó una soldadura en ambos polos de la batería con dos placas metálicas, con el fin de obtener el menor error posible por imprecisión a la hora de realizar los ensayos.

4.4 Ensayos

Para la realización de los ensayos y la obtención de los parámetros que permitan construir el modelo matemático de la batería, se realizaron una serie de cargas y descargas acorde a la tecnología con la que se estaba tratando. El tiempo de descarga y carga ha sido un factor limitante a la hora de realizar los

ensayos, ya que estos tenían una duración media aproximada de 120 minutos, aunque dependía de muchos factores, principalmente de las intensidades de descarga de las baterías.

A continuación, se explicará más en detalle los dos procesos que se han llevado a cabo para realizar los ensayos de forma que no se comprometía la seguridad y la recopilación de los datos de las baterías

4.4.1 Carga CC-CV

La carga CC-CV significa Corriente Constante – Voltaje Constante (Constant Current – Constant Voltage), es un método ampliamente utilizado para cargar baterías de litio y otros tipos de baterías con capacidad de recarga. Este método consta de dos fases con el fin de conseguir maximizar el rendimiento y la esperanza de vida de las baterías. Es actualmente el método más utilizado para la carga de estos dispositivos independientemente del tipo de tecnología que se esté utilizando [23].

- **Fase de corriente constante (CC):** se establecen los valores de la intensidad a la que se quiere cargar la batería de manera preestablecida y esta se mantiene constante a medida que aumenta gradualmente el voltaje hasta alcanzar el corte predefinido. El objetivo de esta fase es cargar aproximadamente el 80% de la capacidad total de la batería sin superar los límites de seguridad y sin someter a excesivo estrés a la batería.
- **Transición a la Fase de voltaje constante (CV):** una vez que la batería ha alcanzado el nivel de voltaje definido para la carga, el cargador cambia automáticamente a la fase de voltaje constante.
- **Fase de voltaje constante (CV):** en esta etapa, el voltaje de la batería se mantiene constante y a medida que la batería se acerca a su estado de carga máxima, la intensidad disminuye progresivamente. El objetivo de esta fase es finalizar el proceso de carga de la batería sin someter a esta a una sobrecarga excesiva que pueda causar daños por calor excesivo. Además, ayuda a prevenir la conservación de problemas que puedan afectar a la estabilidad química de la batería [24].

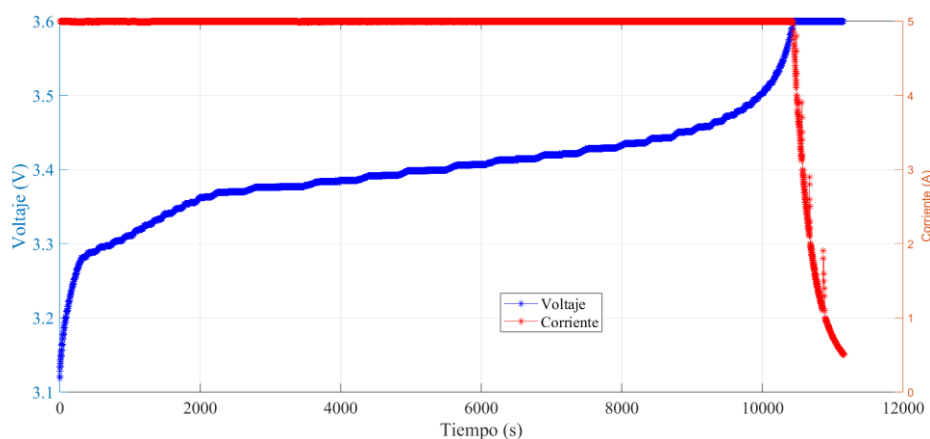


Figura 4-4. Carga CC-CV [Fuente propia].

La Figura 4-4. Carga CC-CV [Fuente propia]. recoge los datos y muestra el proceso de carga que realiza el cargador para una de las celdas. Se puede observar cómo durante la mayor parte de la carga la corriente se mantiene estable a 5 A mientras que el voltaje va aumentando progresivamente, sin embargo, a partir de los 10.000 [s] el voltaje llega a su máximo los 3,6 V y es cuando se produce la transición a la fase de voltaje constante y comienza la fase de voltaje constante para completar la carga de la batería, disminuyendo progresivamente la corriente hasta llegar al corte recomendado por el fabricante, que para este tipo de tecnología suele ser un valor alrededor de los 0,5-0,1 A, concluyendo así el proceso de carga.

4.4.2 Descarga C-CC

El proceso análogo solamente consta de una fase de descarga a una intensidad constante durante todo el proceso. La batería comienza su descarga a la tensión nominal correspondiente cuando se encuentra completamente cargada y se le aplica una intensidad constante durante todo el proceso hasta llegar al voltaje de descarga definido y recomendado por el fabricante.

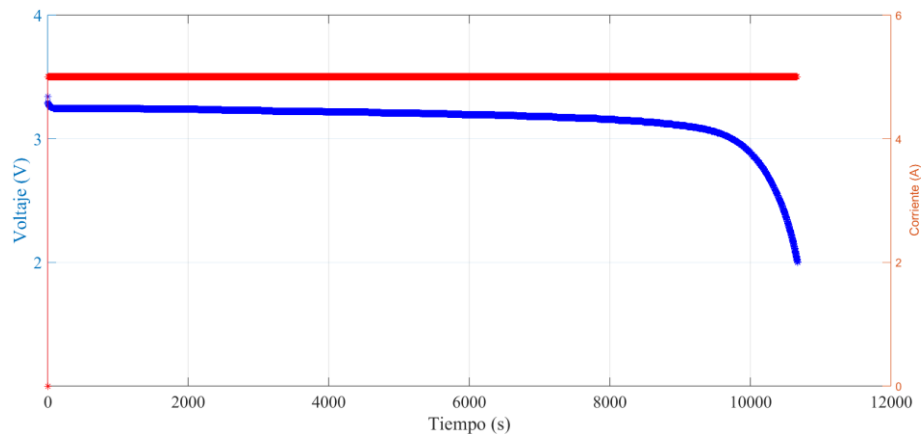


Figura 4-5. Descarga D-CC [Fuente propia].

Al igual que ocurría con el comienzo de la fase de carga, se puede observar en la Figura 4-5 como la corriente permanece constante, en este caso a 5 A, durante todo el proceso de descarga y es el voltaje el que va disminuyendo en mayor o menor medida dependiendo de varios factores, hasta llegar a la tensión mínima recomendada por el fabricante considerando por tanto que se encuentra completamente descargada.

4.4.3 Reposo

Las baterías de litio son conocidas por su estabilidad química, sin embargo, existen una serie de prácticas recomendables para ayudar a maximizar su rendimiento, ciclo de vida y que la exactitud de los datos de los ensayos sean los más precisos y estandarizados posibles [25].

-Reposo después de la carga: tras una carga completa de una batería el tiempo de reposo generalmente es corto por las características de este tipo de tecnologías. No obstante, si se ha realizado una carga rápida donde se haya producido un sobrecalentamiento de la celda, es recomendable realizar una pausa de un tiempo aproximado de 30 minutos para permitir que la temperatura se estabilice y para asegurarse que los electrolitos y la composición interna de la batería se asienten tras la carga.

-Reposo después de la descarga: el tiempo de descanso después de realizar una descarga completa permite que la batería al haber estado sometida a un cierto nivel de estrés pueda recuperarse ligeramente, evitándose así también daños por sobrecalentamiento. Se recomienda dejar un reposo de un periodo corto similar al realizado tras el proceso de carga.

Durante los diferentes ensayos realizados en el laboratorio se tuvieron en cuenta esta serie de recomendaciones de seguridad con el fin de prever posibles daños a las baterías objeto de estudio.

4.5 Cálculo de la resistencia interna

4.5.1 Introducción

La resistencia interna es uno de los factores más importantes a tener en consideración para el correcto modelado de la batería. En el presente apartado se explicarán los procesos que se han llevado a cabo para obtener los datos de los ensayos del laboratorio, así como su posterior tratamiento de datos y el fundamento teórico. De esta forma se pretende obtener el valor de la resistencia interna a lo largo del estado de carga de la batería y en función de si se encuentra en un proceso de carga o de descarga [14].

4.5.2 Fundamento teórico

En las baterías, la resistencia interna funciona como un elemento puramente resistivo que afecta directamente al comportamiento de la celda, ocasionando una caída de voltaje proporcional al aumento de la corriente que fluye a través de la batería. Se calculará la resistencia interna teniendo en cuenta el circuito equivalente de Thévenin.

Para el cálculo de la resistencia interna se ha utilizado la ley de Ohm que relaciona las tres magnitudes físicas que interviene en los procesos de un circuito eléctrico:

$$R_i = \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Ec.9}$$

Siendo R_i el valor de la resistencia interna expresada en ohmios [Ω], ΔV : la diferencia de potencial expresada en voltios [V] e I : la intensidad de corriente que circula por la batería expresada en amperios [A].

El cálculo de la resistencia interna redundante en la diferencia de potencial durante los procesos de carga y descarga. Para ello se ha implementado un código en Matlab, que ha permitido extrapolar la diferencia de potencial para ambos procesos en un intervalo de 60 segundos. Se ha escogido este intervalo de tiempo en función de la larga duración de los ensayos y con el objetivo de tener una mejor visualización de como se ve afectada la resistencia interna a lo largo del estado de carga [18].

De esta forma se consigue determinar el valor de la resistencia interna asociada a cada valor del estado de carga de una batería. No obstante, para la creación final del modelo se ha utilizado la resistencia interna únicamente como una constante resultante de la media de todos los valores a lo largo del SoC [27]. No resulta un problema dado que las variaciones de los valores que se mostrarán a continuación de la resistencia interna para ambos procesos apenas varían entre el 5 y 95% del SoC, pudiéndose asumir como un valor constante.

4.5.3 Proceso de carga

Se ha tomado como ejemplo la batería de PFS Energy para mostrar como varían los valores de la resistencia interna a lo largo del SoC durante el proceso de carga, aunque posteriormente se presentarán todos los valores obtenidos para las tres baterías.

En la siguiente Figura 4-6 se puede observar cómo varia los valores de la resistencia para un proceso de carga CC-CV:

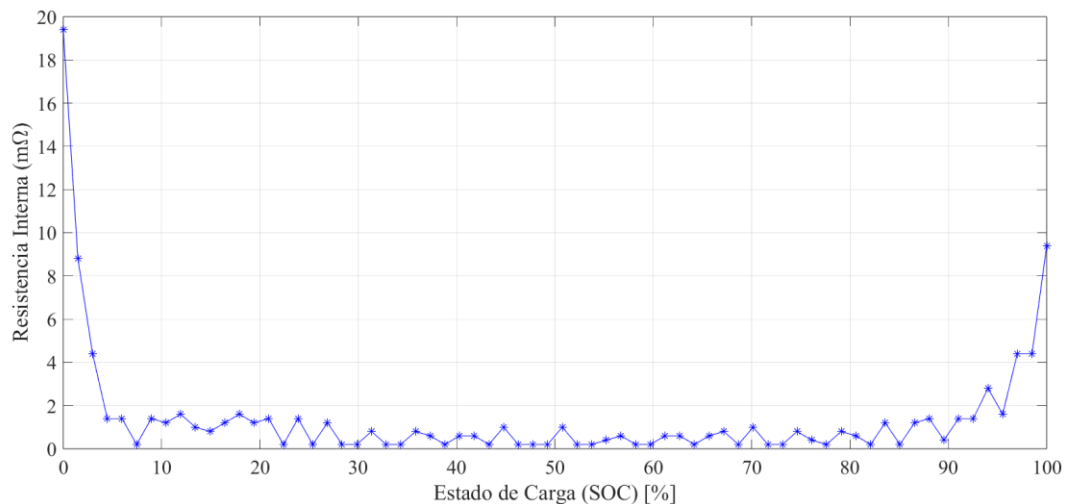


Figura 4-6 Variación de la resistencia interna en el proceso de carga [Fuente propia].

- **Estado de la batería al inicio:** al principio de la carga, si la batería se ha visto sometida a una descarga profunda con anterioridad, la resistencia interna puede ser alta debido a la baja movilidad iónica y a los efectos de pasivación superficial en los electrodos.

- **Transición a Voltaje Constante (CV):** correspondiente con los últimos porcentajes de carga de la batería, una vez alcanza la tensión de corte, la corriente disminuye con el fin de evitar el sobrecalentamiento de la batería, durante ese estado de alta tensión y disminución de la corriente, la resistencia interna puede empezar a aumentar ligeramente, debido entre otros factores a una posible saturación de los espacios de intercalación de iones que están menos disponibles a mitad que la batería se carga completamente.

Se puede apreciar en la Figura 4-6 como los valores iniciales de la resistencia interna son muy elevados, posteriormente se estabilizan y se mantienen prácticamente constantes durante todo el proceso de carga hasta llegar al 90% de SOC. Este es el comportamiento esperado para este tipo de tecnologías de baterías, exceptuando los valores iniciales obtenidos hasta aproximadamente el 5% del estado de carga, que se puede deber a lo recién comentado.

- Además de lo mencionado anteriormente, siempre hay que tener en cuenta los factores externos de la temperatura y las condiciones ambientales, que deben mantenerse constantes de forma que se puedan garantizar unas mediciones fiables.

Se repite el mismo proceso para las otras dos baterías y en la siguiente tabla se pueden ver los valores obtenidos para las tres baterías:

Batería de litio-ion Panasonic NCR18650GA	Resistencia interna carga = 1,5909 mΩ
Batería de LiFePO ₄ Lithium Werks ANR26650M1-B	Resistencia interna carga = 9,0214 mΩ
Batería de LiFePO ₄ PFS Energy 32140FS	Resistencia interna carga = 8,8611 mΩ

Tabla 4-5 Valores de la resistencia interna en el proceso de carga.

4.5.4 Proceso de descarga

Se repite el mismo proceso llevado a cabo para la carga, la Figura 4-7 que se muestra corresponde con la misma batería utilizada para la carga, la batería de LiFePO₄ PFS Energy:

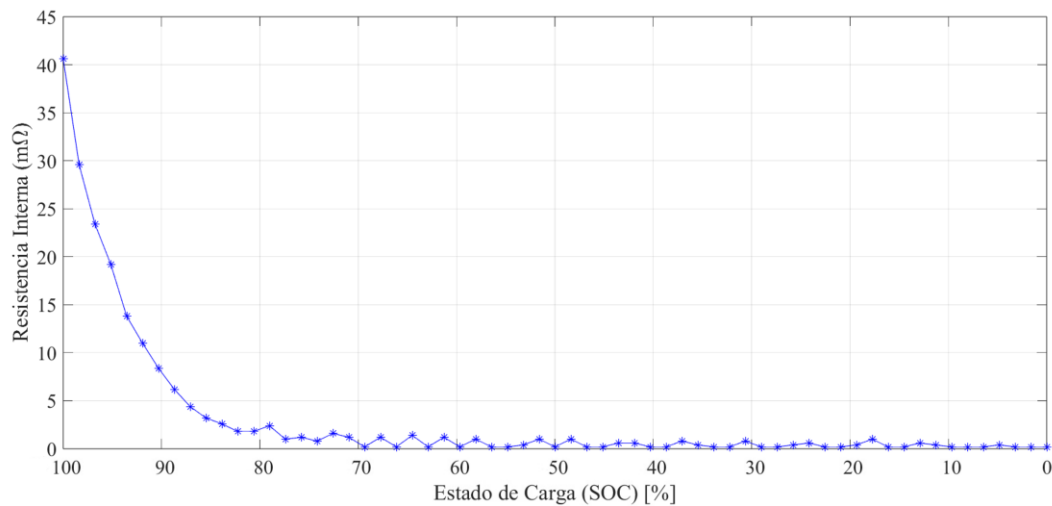


Figura 4-7. Variación de la resistencia interna en el proceso de descarga [Fuente propia].

Los valores siguen una tendencia muy parecida para el proceso de descarga en comparación con el proceso de carga. Hay que mencionar que los valores que se producen al inicio de la descarga se pueden deber a una serie de factores como son los siguientes:

- **Temperatura inicial:** si la batería ha estado en reposo al principio de la descarga, su temperatura es menor a la temperatura óptima operativa, lo que provoca que las reacciones químicas se vuelvan más lentas por las bajas temperaturas y por tanto aumente la resistencia interna.
- **Efectos de pasivación:** los electrodos pueden formar una capa superficial pasiva formada durante un periodo de inactividad que se activa durante la descarga y ofreciendo una mayor resistencia en los instantes iniciales de la descarga.

La siguiente tabla muestra los valores de la resistencia interna para las descargas de las baterías:

Batería de litio-ion Panasonic NCR18650GA	Resistencia interna descarga = 5,2571 mΩ
Batería de LiFePO_4 Lithium Werks ANR26650M1-B	Resistencia interna descarga = 8,9833 mΩ
Batería de LiFePO_4 PFS Energy 32140FS	Resistencia interna descarga = 11,2361 mΩ

Tabla 4-6. Valores de la resistencia interna en el proceso de descarga.

Al igual que en el proceso de carga, los valores reflejados en esta tabla son la media de los obtenidos de las gráficas como la que se muestra en la Figura 4-7 y que se establecerán como valores constantes en la rama que modela la curva de descarga de la batería.

4.6 Obtención de los coeficientes de Peukert

Como se mencionó en el apartado de modelado de la capacidad corregida de Peukert, es imprescindible conocer los coeficientes de Peukert de cada una de las baterías para que la simulación y los datos obtenidos del cargador presenten un ajuste preciso. Los fabricantes salvo en algunas ocasiones, no proporcionan los datos para calcular el coeficiente. Por tanto, en el presente trabajo se pretende obtener dichos coeficientes de manera experimental.

Para la obtención del coeficiente de Peukert, también denominado parámetro “k”, se llevaron a cabo dos descargas a diferentes intensidades para cada una de las tres baterías [18]. Los datos de las descargas se establecerán en el bloque de cálculo del coeficiente de Peukert dentro del modelo global de la batería.

A continuación, se muestran tres tablas que contienen los datos proporcionados en las descargas por el cargador/descargador que se obtuvieron para la obtención del coeficiente de Peukert:

Celda de litio-ion Panasonic NCR18650GA	
Tiempo t_1 (1 A)	3,265 h
Capacidad C_1 (1 A)	3,265 Ah
Tiempo t_2 (10 A)	0,315 h
Capacidad C_2 (10 A)	3,150 Ah
Coeficiente de Peukert	1,0156

Tabla 4-7. Descargas de la batería Panasonic.

Los valores corresponden con la batería con tecnología de iones de litio y el coeficiente de Peukert obtenido de manera experimental se encuentra dentro de la normalidad para este tipo de baterías cilíndricas de pequeñas dimensiones, que resultan ligeramente más sensibles por su reducida capacidad que las de mayores dimensiones fabricadas para la industria automovilística.

Celda de LiFePO4 Lithium Werks ANR26650M1-B	
Tiempo t_1 (0,5 A)	5,351 h
Capacidad C_1 (0,5 A)	2,675 Ah
Tiempo t_2 (10 A)	0,198 h
Capacidad C_2 (10 A)	1,937 Ah
Coeficiente de Peukert	1,1087

Tabla 4-8. Descargas de la batería Lithium Werks.

Esta segunda batería corresponde con la de menor capacidad de las tres que se están estudiando, por lo que al aplicarle una descarga a altas intensidades se ve más afectada, como se puede ver en los resultados. Como resultado se obtiene un valor del coeficiente que, aunque está dentro de los valores normales para este tipo de baterías, resulta el más elevado de las tres baterías.

Celda de LiFePO4 cilíndrica PFS Energy 32140FS	
Tiempo t_1 (5 A)	2,964 h
Capacidad C_1 (5 A)	14,820 Ah
Tiempo t_2 (20 A)	0,737 h
Capacidad C_2 (20 A)	14,750 Ah
Módulo de Peukert	1,0034

Tabla 4-9. Descargas de la batería PFS Energy.

Esta última batería por su capacidad, sus dimensiones y su tecnología, obtiene un coeficiente de Peukert muy cercano a uno y también es el más pequeño de las tres baterías. Como se puede observar, para ambas descargas, aunque exista una diferencia de intensidad de 15 A, las capacidades totales obtenidas son prácticamente iguales.

4.7 Cálculo de la curva OCV

Para el modelado de la batería es imprescindible conocer en detalle el comportamiento de la batería cuando se encuentra en estado de circuito abierto para los ciclos de cargas y descargas. En este apartado se desarrollarán una serie de polinomios para ambos procesos por separado que permitirán modelar el comportamiento de la batería en función del estado de carga (SoC).

Para la obtención de dichos polinomios, se utilizará la herramienta “Curve Fitter” del propio Matlab. Esta herramienta permite realizar aproximaciones polinómicas en función de los valores de las curvas obtenidas de manera experimental con el cargador. Para validar las simulaciones, aparte de una posterior demostración de estas en el entorno de simulink, se mencionarán los valores de “R cuadrado” también conocido como coeficiente de determinación o “ R^2 ” que indica el ajuste del polinomio al conjunto de datos experimentales, siendo más preciso cuanto más cercano a uno se encuentre.

4.7.1 Curva OCV de carga

Mediante la utilización de “Curve Fitter” se crea un primer polinomio para un proceso de carga de una de las baterías y una vez realizado el primer ajuste, se llegó a la conclusión de que eran necesarias más de una aproximación polinómica para la correcta representación de la curva OCV de carga en la simulación.

En la siguiente Figura 4-8 se puede observar la curva obtenida de manera experimental para la batería PFS Energy con tecnología LiFePO_4 que suelen coincidir con el resto de las curvas de manera genérica para una batería con este tipo de tecnología.

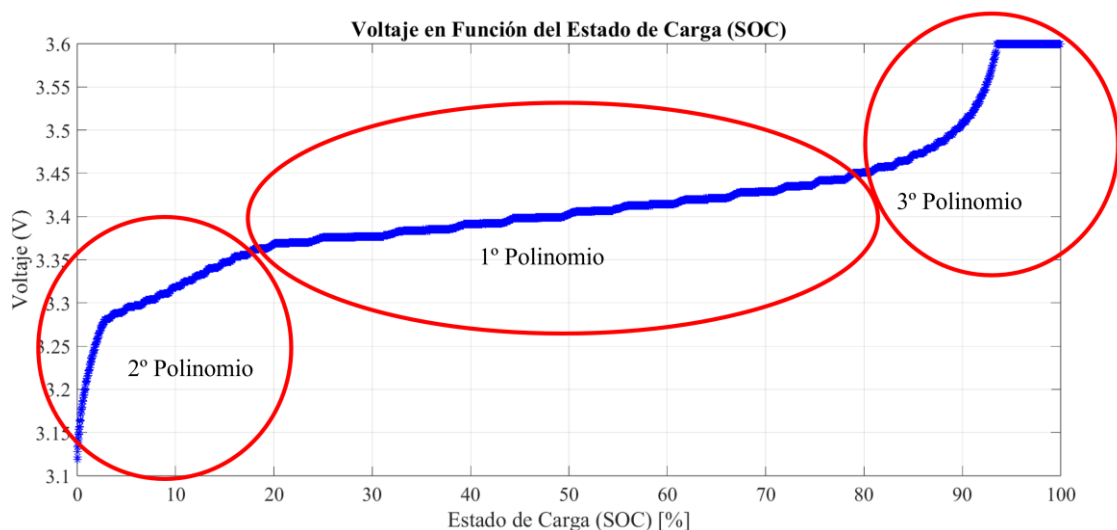


Figura 4-8. Curva de carga OCV. [Fuente propia].

Se pueden apreciar tres zonas remarcadas, y que comprenden partes donde se van a realizar tres ajustes distintos, con el objetivo de que la aproximación total de la curva sea lo más precisa posible.

Mediante la herramienta de Matlab mencionada anteriormente se realiza la primera aproximación polinómica obteniendo como resultado el siguiente polinomio de grado 8:

- 1º Polinomio:

$$f(x) = p1 \times x^7 + p2 \times x^6 + p3 \times x^5 + p4 \times x^4 + p5 \times x^3 + p6 \times x^2 + p7 \times x + p8;$$

p1	-2.9712e-13
p2	9.0217e-11
p3	-9.6984e-09
p4	3.8985e-07
p5	2.4281e-06
p6	-6.2802e-04
p7	0.0176
p8	3.2070

Tabla 4-10. Polinomio de ajuste para la curva OCV de carga.

La Figura 4-9 que a continuación se muestra, es el resultado de la utilización de dicho polinomio en la curva de datos originales:

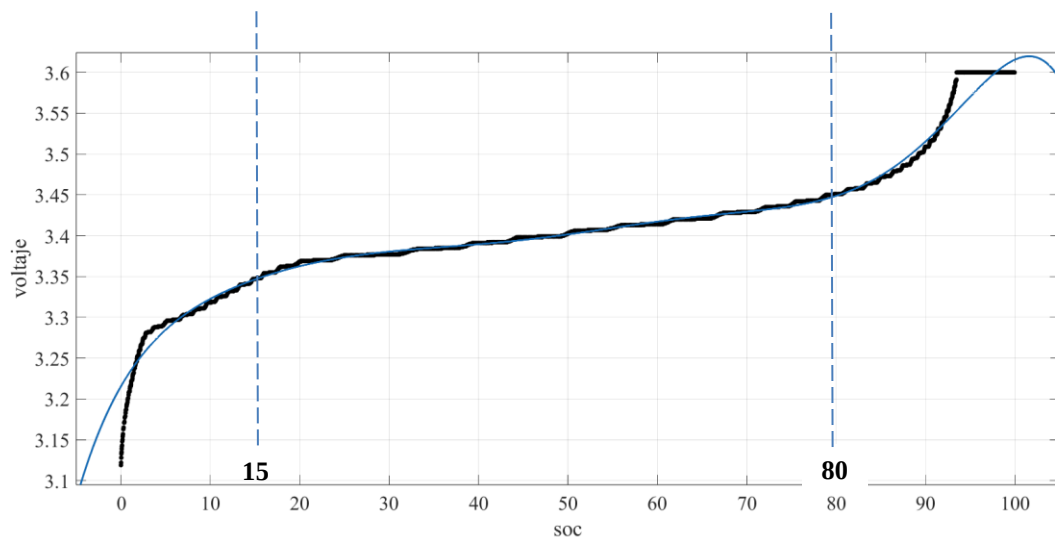


Figura 4-9. Ajuste del polinomio de la curva OCV de carga [Fuente propia].

Como se puede apreciar, el polinomio no consigue ajustar la totalidad de valores de la curva original, únicamente para los valores de la curva comprendidos entre el 15 y el 80 % se consigue un ajuste preciso con un valor de R^2 de 0.9912.

Para conseguir un mejor ajuste de la curva se implementan más de un polinomio. El polinomio anterior se utilizará para los valores de la curva entre el 15 y el 80 %, se utilizará un segundo polinomio para los valores del SoC desde el 0 al 15% y un tercer polinomio para los valores entre el 80 y el 100%.

La herramienta “Curve Fitter” permite también excluir algunas zonas de las gráficas para analizar por partes la curva, lo que se ha utilizado para excluir todos los datos posteriores al 15 % del SoC, obteniendo así el segundo polinomio para el inicio de la curva que se puede visualizar en la siguiente Figura 4-10:

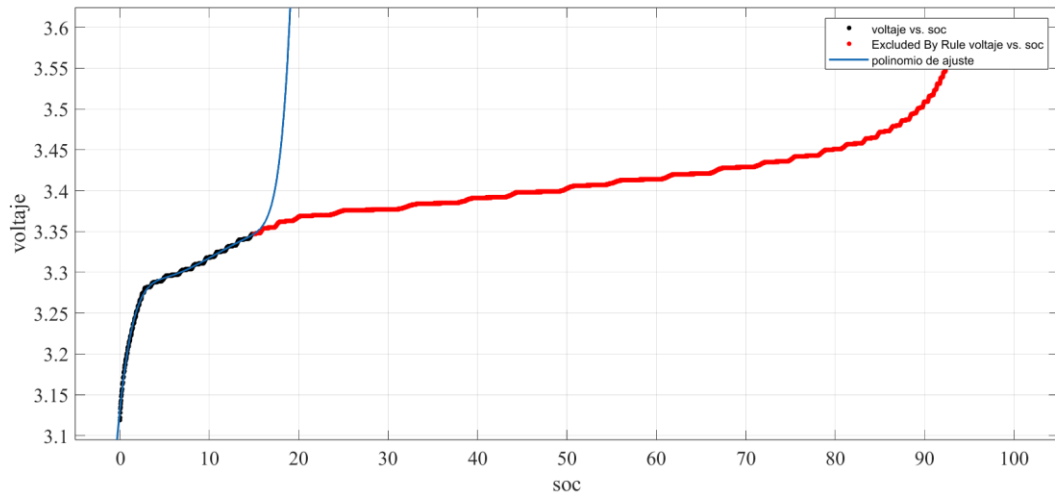


Figura 4-10 Ajuste del polinomio de la curva OCV de carga entre el 0 y el 15 % [Fuente propia].

A diferencia del resultado obtenido en la Figura 4-9. Ajuste del polinomio de la curva OCV de carga, los valores del inicio de la curva realizada con el segundo polinomio y los valores reales son prácticamente idénticos. Este segundo polinomio que a continuación se adjunta, corresponde con un polinomio de grado siete con un valor de R^2 de 0,9984:

- 2º Polinomio

$$f(x) = p1 \times x^7 + p2 \times x^6 + p3 \times x^5 + p4 \times x^4 + p5 \times x^3 + p6 \times x^2 + p7 \times x + p8;$$

p1	-6.2491e-09
p2	1.3087e-07
p3	5.8014e-06
p4	-2.5391e-04
p5	0.0039
p6	-0.0288
p7	0.1070
p8	3.1311

Tabla 4-11. Polinomio de ajuste para la curva OCV de carga entre el 0 y el 15%.

Por último, se necesita implementar un tercer polinomio que ajuste la curva para los valores comprendidos entre el 85 y el 100% del estado de carga. Se repite el proceso esta vez excluyendo la totalidad de los datos a excepción del tramo recién mencionado, obtenido así el siguiente polinomio de ajuste de grado 9 con un R^2 de 0.9946:

- 3º Polinomio:

$$f(x) = p1 \times x^8 + p2 \times x^7 + p3 \times x^6 + p4 \times x^5 + p5 \times x^4 + p6 \times x^3 + p7 \times x^2 + p8 \times x + p9;$$

p1	2.4761e-18
p2	-1.9123e-15
p3	6.4606e-13

p4	-1.2471e-10
p5	1.5045e-08
p6	-1.1615e-06
p7	5.6037e-05
p8	-0.0015
p9	3.6186

Tabla 4-12. Polinomio de ajuste para la curva OCV de carga entre el 85 y el 100%.

Terminando finalmente el modelado de la curva OCV de carga para el modelo de batería. Esto tres polinomios se implementarán en el bloque de función del modelado de la tensión de circuito abierto, especificando en dicha función, para que valores del SOC se utiliza cada polinomio. En la siguiente Figura 4-11 se puede observar la curva de carga en el entorno de Simulink mediante la herramienta “Scope”:

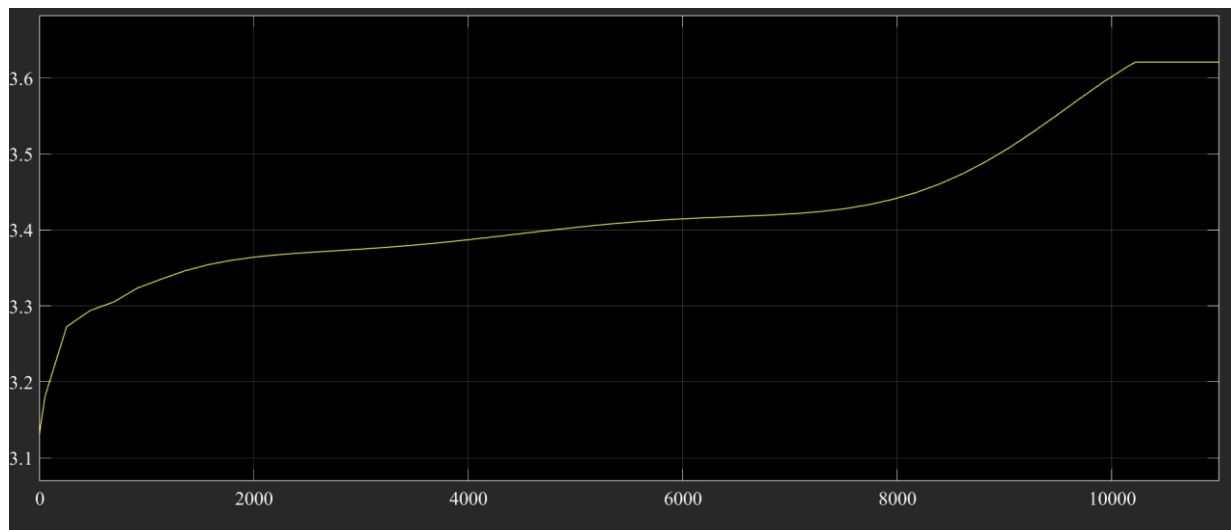


Figura 4-11. Simulación de curva la OCV de carga en Simulink [Fuente propia].

La herramienta únicamente permite visualizar la carga a lo largo del tiempo. Se tuvo que realizar una extracción de los datos del voltaje de la curva en función del estado de carga para poder representar las simulaciones junto a los datos reales obtenidos en los ensayos por el cargador.

4.7.2 Curva OCV de descarga

El proceso se repite para el proceso de descarga, que presenta una curva con una morfología similar, pero con algunas diferencias que pueden afectar a la precisión de las simulaciones.

En la siguiente Figura 4-12 se puede ver la forma que realiza una curva de descarga OCV para una batería con tecnología LiFePO₄:

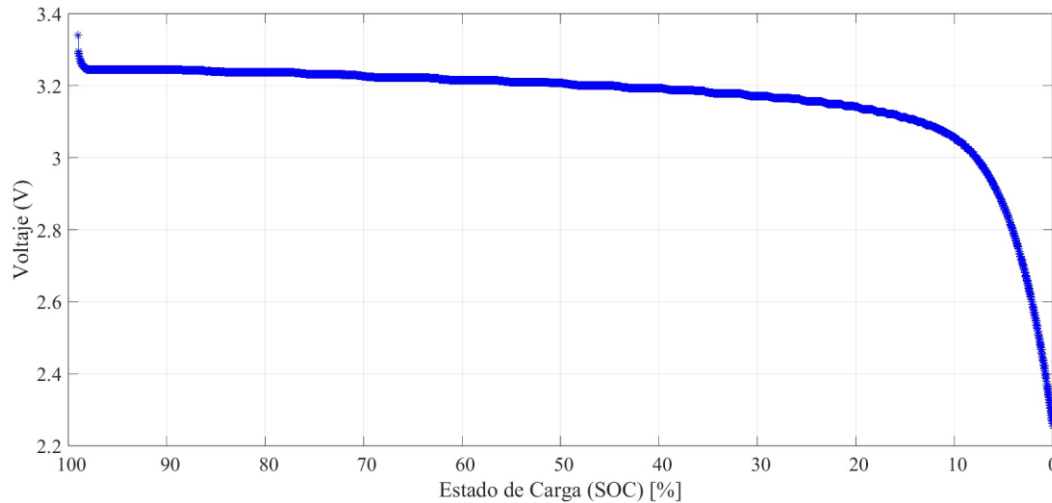


Figura 4-12. Curva de descarga OCV [Fuente propia].

Se repite el proceso llevado a cabo en el apartado anterior utilizando los mismos métodos mencionados, con la excepción de que, para la descarga, únicamente fue necesario la implementación de un polinomio de grado 10 que se ajustaba en su totalidad a la curva OCV de descarga que se puede apreciar en la siguiente Figura 4-13:

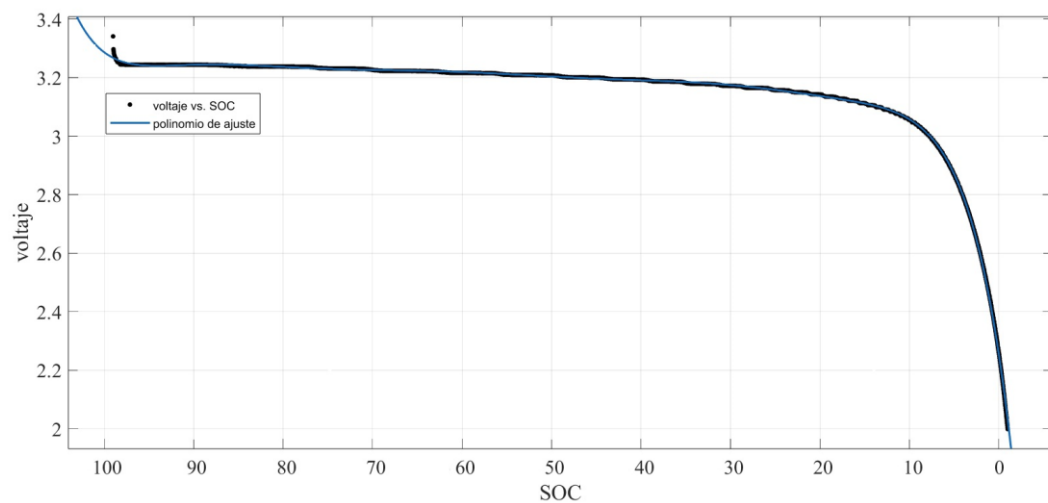


Figura 4-13. Ajuste del polinomio para la curva OCV de descarga [Fuente propia].

A diferencia del ajuste para la curva de carga, el polinomio en este caso se ajusta al detalle a los datos originales de los ensayos y por lo tanto no ha sido necesario la implementación de más polinomios.

Se obtuvo un polinomio de grado 10 con un R^2 de 0.9989:

$$f(x) = p1 \times x^9 + p2 \times x^8 + p3 \times x^7 + p4 \times x^6 + p5 \times x^5 + p6 \times x^4 + p7 \times x^3 + p8 \times x^2 + p9 \times x + p10;$$

p1	2.4761e-18	p6	1.5045e-08
p2	-1.9123e-15	p7	-1.1615e-06
p3	6.4606e-13	p8	5.6037e-05
p4	8.3976e-09	p9	-0.0015
p5	-1.2471e-10	p10	3.6186

Tabla 4-13. Polinomio de ajuste para la curva OCV de descarga.

En la siguiente Figura 4-14 se muestra mediante el uso de la herramienta “Scope” la simulación del proceso de descarga:

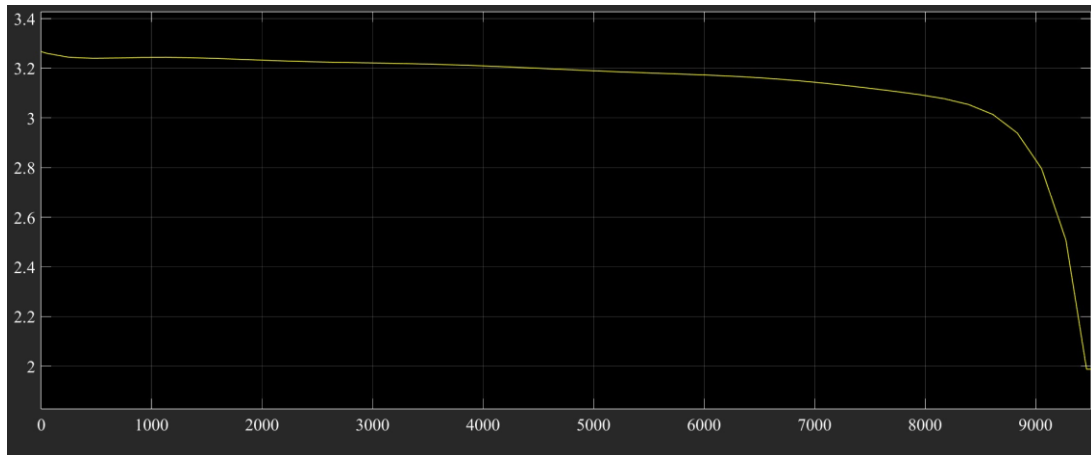


Figura 4-14. Simulación de curva la OCV de descarga en Simulink [Fuente propia].

Al igual que en la simulación de la carga, aunque aparezca una simulación a lo largo del tiempo, en vez de en función del estado de carga, los valores de la curva se basan en los valores del SoC y con el posterior tratamiento de datos en las simulaciones se podrá ver la curva de la simulación en función del SoC.

4.8 Simulaciones del modelo

Una vez adaptadas las baterías al modelo, se procede a las simulaciones de las tres baterías con el objetivo de validar el modelo bajo distintas condiciones de carga y descarga. Este apartado tiene como objetivo comprobar los resultados de las simulaciones comparándolas directamente con las curvas obtenidas del cargador y verificar que el modelo es capaz de simular el comportamiento de las dos tecnologías.

4.8.1 Simulaciones batería LiFePO₄ PFS Energy

La celda de batería con mayores dimensiones que mejor responde a las altas variaciones de intensidades por su capacidad y propósito de fabricación. La figura 4-15 muestra la simulación del proceso de carga a una intensidad de 5 A:

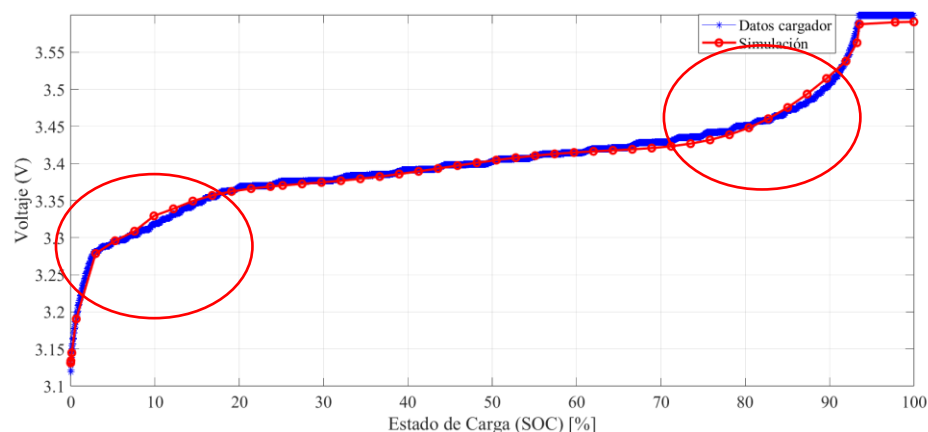


Figura 4-15. Simulación de carga PFS Energy a 5 A [Fuente propia].

Se puede apreciar como las curvas son prácticamente idénticas a excepción del principio y el final de la simulación que se debe principalmente a que eran las zonas donde más error tenía la aproximación polinómica. Al final de la simulación los valores de la tensión son 0,02 V inferiores a los datos reales, al igual que al principio, donde los valores de tensión comienzan en una tensión 0,01 V mayor a la tensión real.

También se puede apreciar en las dos zonas resaltadas en rojo como el ajuste polinómico varía con respecto a la curva original. La razón principal de este problema puede ser, que esos errores, se encuentran en las zonas de intersección de los polinomios y donde era más probable que se produjese un error.

A continuación, se mostrarán las simulaciones de descarga, comenzando por la descarga a baja intensidad, 5 A, y posteriormente se mostrará la descarga a alta intensidad, 20 A.

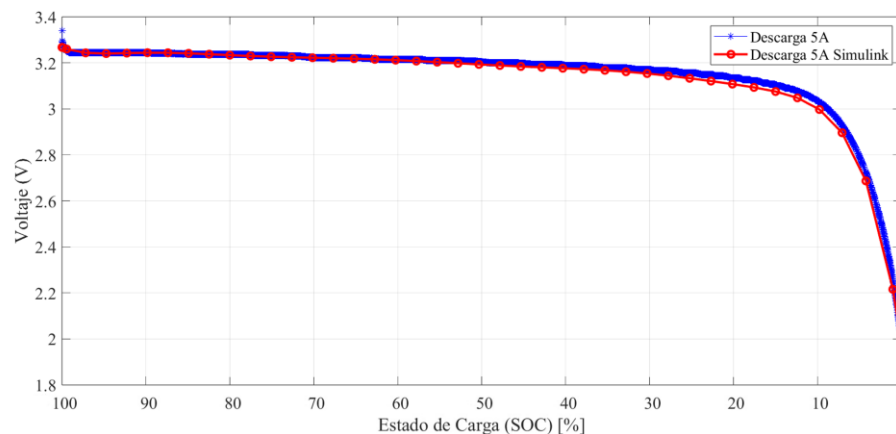


Figura 4-16. Simulación de descarga PFS Energy a 5 A [Fuente propia].

Los valores obtenidos para esta simulación (Figura 4-16) son bastantes precisos, coincidiendo el voltaje final de la simulación con el obtenido con el cargador y con una diferencia de 0,07 V entre los valores de tensión iniciales. Ahora se comprobará en la siguiente Figura 4-17 la simulación cuando la intensidad se eleva a 20 A:

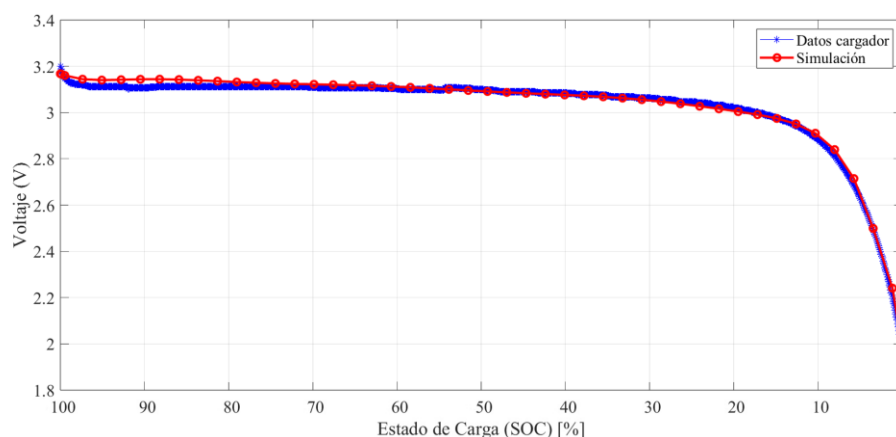


Figura 4-17. Simulación de descarga a 20 A [Fuente propia].

Los resultados son muy parecidos a la descarga realizada a 5 A, en este caso, en los valores iniciales los errores se acentúan un poco más que la anterior simulación, pero aun así la simulación describe a la perfección la morfología de la curva real.

4.8.2 Simulaciones batería LiFePO₄ Lithium Werks

Una batería que comparte la misma tecnología que la anterior pero que tiene unas características respecto a las capacidades y las intensidades a la que puede someter que hay que tener en cuenta. Tiene una capacidad de 2,5 Ah por lo que la intensidad con la que se ha realizado la carga de manera experimental ha sido de 2 C, es decir, el doble de su carga recomendada, por lo que como se muestra en la Figura 4-18, se presentan algunas diferencias de tensión de no más de 0,05 V.

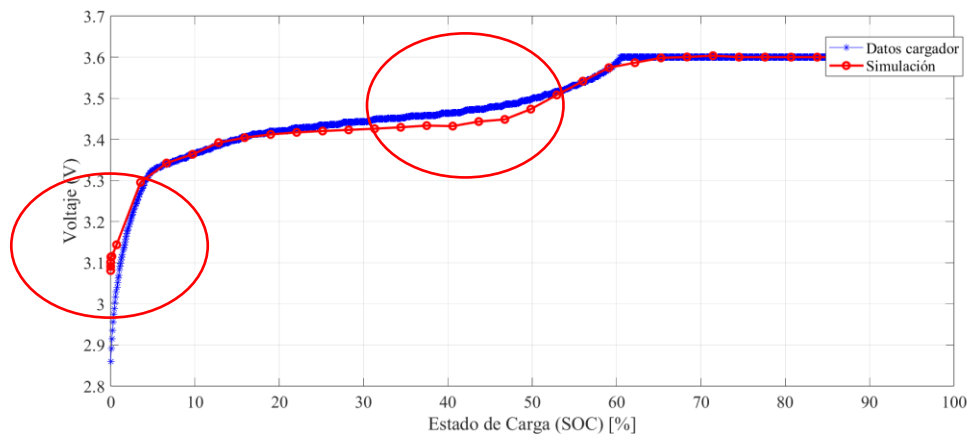


Figura 4-18. Simulación de carga Batería Lithium Werks a 5 A [Fuente propia].

La simulación se ajusta bastante bien a la curva original con evidentes salvedades en el principio de la simulación donde los valores mínimos en los primeros instantes de carga de la batería son apenas 0,2 V menores que los obtenidos en la simulación y entre el 30 y el 50 % del SoC donde la simulación tiene una diferencia de tensión de 0,003 V. En el final del proceso de carga ambas curvas coinciden de manera satisfactoria.

En las siguientes dos figuras se muestran las simulaciones de descargas realizadas a estas baterías, la primera de toda a una intensidad de 0,5 A y la segunda a 10 A.

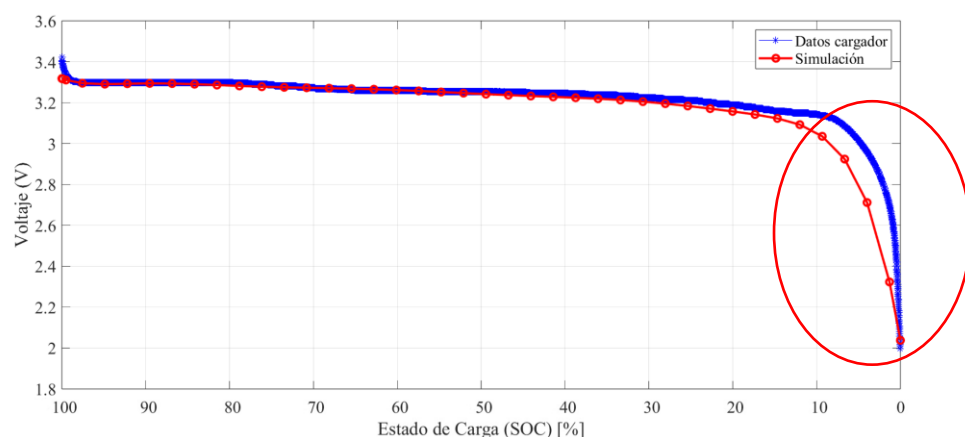


Figura 4-19. Simulación de descarga batería Lithium Werks a 0,5 A [Fuente propia].

Durante la mayor parte de la simulación (Figura 4-19) los valores de la curva son prácticamente idénticos a los reales obtenidos del cargador, sin embargo, es al final del proceso de descarga, en el 15 % restante de batería donde la simulación comienza a tener una pequeña diferencia de tensión que en su valor máximo no supera los 0,14 V. No obstante, en el instante final de ambas curvas los valores de la tensión son idénticos.

A continuación, se muestra en la siguiente Figura 4-20 la descarga realizada a 10 A:

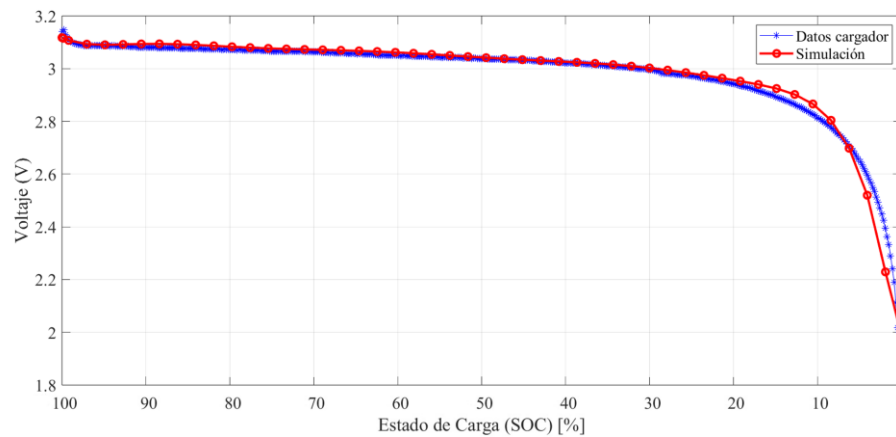


Figura 4-20. Simulación de descarga batería Lithium Werks a 10 A.

Se repite el mismo resultado para la descarga a 10 A, incluso para esta simulación se ha conseguido una mejor aproximación al comienzo de la descarga. En la parte final la simulación se aleja un máximo de 0,003 V de los datos recogidos por el cargador, pero sigue una tendencia clara en sintonía con los valores reales.

4.8.3 Simulaciones batería de litio-ion Panasonic

Esta celda de batería es la única de las tres que no tiene la tecnología LiFePO_4 , aunque parecida, la tecnología de Litio- ion tiene diferencias en el comportamiento de la batería y, por tanto, la curva OCV que forma es ligeramente diferente a las mostradas previamente en las otras dos baterías. Se ha elegido esta batería con tecnología diferente para comprobar si el modelo es capaz de emular su comportamiento de forma satisfactoria pese a ser una batería diferente a la utilizada para la creación del modelo.

Se ha sometido a esta celda a una carga realizada a baja intensidad, 1,5 A y dos descargas, a 1 A y 10 A. En la siguiente Figura 4-21 se muestra la simulación del proceso de carga de la batería:

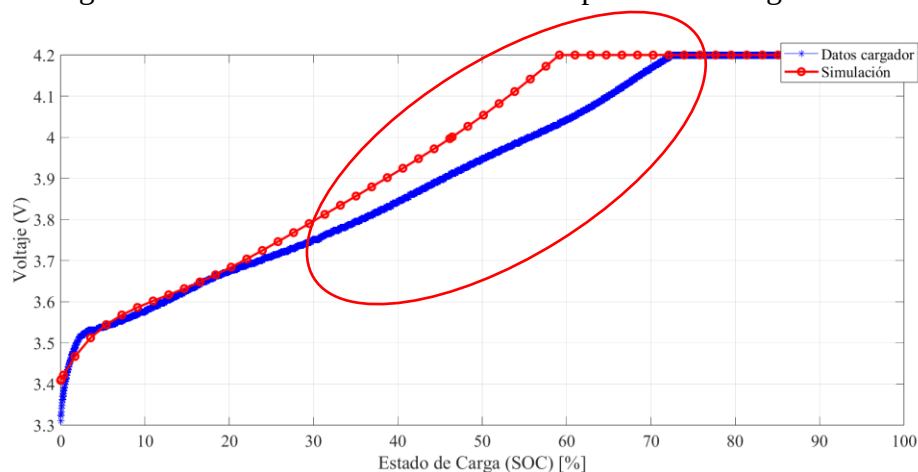


Figura 4-21. Simulación de carga batería Panasonic a 1,5 A.

La simulación tiene una buena precisión teniendo en cuenta, como se puede observar, que la curva es bastante diferente a las curvas de las otras dos baterías con tecnología LiFePO_4 . La curva realizada por la simulación sigue una tendencia muy parecida a la curva de los datos reales, sin embargo, tiene una diferencia de tensión máxima de 0,17 V en la zona reseñada.

Las siguientes dos figuras corresponden con las descargas, la primera de todas que se muestra a continuación en la Figura 4-22 es la simulación de descarga a una intensidad de 1 A:

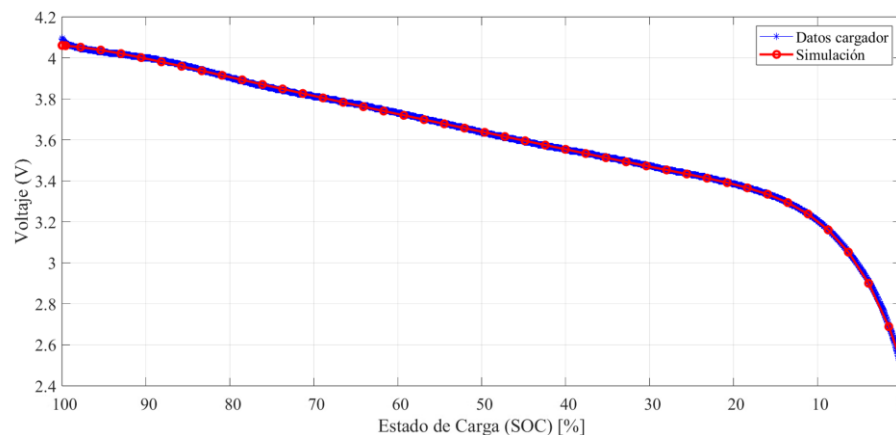


Figura 4-22. Simulación de descarga batería Panasonic a 1 A.

Por otro lado, las curvas de las descargas sí que tienen un comportamiento similar al de las otras dos baterías, a esto se le suma que la descarga es a una baja intensidad, 1 A donde la celda se comporta bien sin alteraciones por elevadas temperaturas, dando como resultado una satisfactoria simulación de descarga.

La siguiente Figura 4-23 se corresponde con la descarga a 10 A:

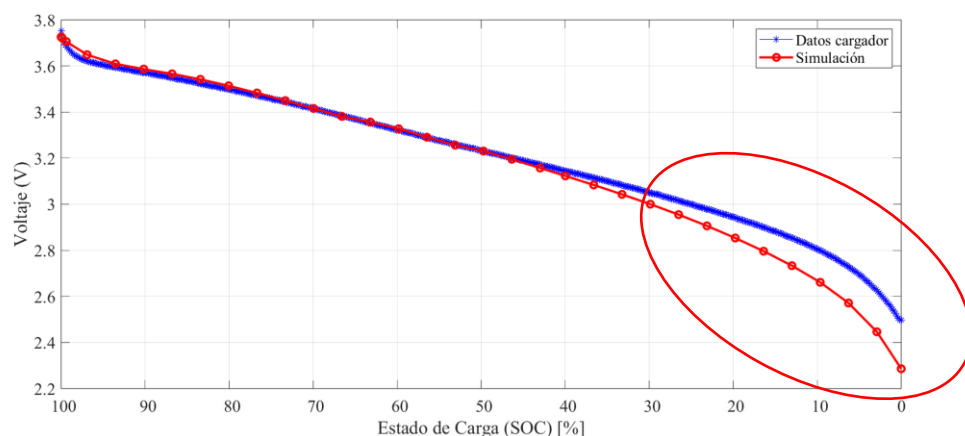


Figura 4-23. Simulación de descarga batería Panasonic a 10 A.

Como era de esperar, al aumentar la intensidad de descarga de la batería, se somete a esta a un mayor estrés, dificultando la obtención de una simulación que tenga en cuenta todas las variaciones que sufre durante el proceso de descarga. Aun así, en líneas generales, sin tener demasiado en cuenta el final de la descarga, donde la intensidad de la simulación es como máximo 0,18 V menos que la real, ambas curvas tienen una morfología muy parecida. Se podría concluir que esta es la peor simulación que se ha obtenido teniendo en cuenta el criterio de los voltajes.

5 CONCLUSIONES

5.1 Introducción

En este último apartado se establecen las conclusiones en base a los resultados obtenidos del modelo utilizado para modelar el funcionamiento de los tres tipos de baterías bajo diferentes modos de uso. El análisis resulta esencial para determinar la validación de los resultados y la valoración de la precisión de los datos, tanto los experimentales que se han obtenido con el cargador como los obtenidos en las simulaciones.

Primeramente, se analizarán las conclusiones sobre las simulaciones y posteriormente se establecerán unas líneas futuras sobre el presente trabajo para que se continúe el desarrollo de este modelo de baterías.

5.2 Conclusiones

Se han realizado ensayos de carga y descarga para tres baterías con tecnología Li-ion con el objetivo de obtener los parámetros necesarios para establecer un modelo que pueda ser implementado en el software de Matlab/Simulink. Para ello se utilizó la batería PFS Energy por ser la batería, que, por sus características, tenía más probabilidad de soportar cargas y descargas a altas intensidades. Se le realizaron ensayos bajo condiciones de carga a 5 A y de descarga desde los 5 A hasta los 20 A, con estas mediciones se obtuvieron el conjunto de datos de donde se obtuvieron los valores de la tensión en función del estado de carga que caracteriza el comportamiento de la celda y permitió realizar el ajuste polinómico para su implementación en Simulink.

El modelo fue desarrollado de forma correcta, tanto en los ensayos experimentales como en los cálculos que se incluían, obteniendo unos resultados para las resistencias internas y los coeficientes de Peukert que se encuentran dentro del rango de valores para este tipo de tecnologías, y unas simulaciones que se ajustaban a la realidad de los datos obtenidos en los ensayos por el cargador.

Para la validación del modelo se han llevado a cabo simulaciones a tres baterías diferentes, aunque todas comparten la tecnología Li-ion, las celdas PFS Energy y Lithium Werks son concretamente de LiFePO_4 , y la celda Panasonic Litio-ion, con esto se consigue comprobar que el modelo tiene un buen ajuste para ambas tecnologías, convirtiéndose en un modelo capaz de modelar el comportamiento de más de una batería en específico.

Las simulaciones para las dos celdas con tecnología LiFePO_4 se realizan bajo diferentes condiciones de descargas, para la batería de PFS Energy se realizaron a unas intensidades mayores por las características de la batería, la última descarga a 20 A se realizó para comprobar que el modelo era capaz de simular la curva realizada a alta intensidad donde se ve afectada entre otros factores, por la temperatura, que es un condicionante en el funcionamiento de la batería. Como resultado se obtuvo que pese a las diferencias de tiempo de descarga y, por ende, la morfología de la curva, el modelo realizó una simulación con un buen ajuste respecto a los valores reales.

La segunda batería, Lithium Werks, tiene unas características diferentes, tanto para las tensiones máximas de descarga como en lo que respecta a la capacidad, esto presenta dificultades a la hora de realizar las simulaciones, puesto que, al tener una capacidad menor, se ve más afectada por las altas intensidades. No obstante, las dos simulaciones realizadas, la primera a 0,5 A y la segunda a 10 A, comparten la tendencia de la curva obtenida de los datos reales, obteniendo unos valores de la tensión muy similares con apenas diferencias en décimas de voltio respecto a los datos obtenidos del cargador.

La utilización de la batería Panasonic sirvió para comprobar si el modelo era capaz de realizar unas simulaciones para un tipo de batería que no fuese LiFePO_4 . Los resultados obtenidos para la carga y las descargas a 1 A y 10 A han proporcionado un ajuste aceptable, especialmente para la descarga a 1 A donde la curva coincide con la experimental. La simulación de 10 A comienza ajustándose a la curva de datos reales, sin embargo, hay que tener en cuenta que, dependiendo de la tecnología, las baterías se comportan de manera diferente frente a descargas a altas intensidades, por eso, al final de la simulación a 10 A la curva se aleja un máximo de 0,18 V de los datos reales de la descarga.

5.3 Líneas futuras

Tras la finalización de este Trabajo de fin de Grado y con la experiencia obtenida durante el proceso de su realización, se procede a proponer algunas de las ideas para continuar con el desarrollo de este modelo de batería:

1. La primera línea futura que ayudaría a conseguir un modelo más preciso de batería sería añadir un registro de temperatura en el montaje experimental, que consiguiese captar los cambios de temperatura que se producen en la celda, para posteriormente implementar ese condicionante de la temperatura al modelo. Además, con el añadido de la temperatura, se podría estudiar cómo se ve afectada la resistencia interna y la capacidad en los procesos de carga y descarga, especialmente en las descargas a altas intensidades. De esta forma se podría conseguir un modelo más preciso de la batería.
2. Obtener un cargador que tenga una mayor capacidad de carga para acortar los tiempos de los ensayos y realizar ensayos de carga a corrientes superiores a 5 A, estudiando así el comportamiento de las baterías al ser cargadas a una mayor intensidad y comprobando si el modelo funciona bien a esas intensidades.
3. Al igual que con los procesos de carga, al obtener un nuevo cargador se pueden realizar ensayos de descarga a las celdas a mayores intensidades que estresen ligeramente más las baterías y de esta forma analizar también sus respuestas a esa elevación de la temperatura de funcionamiento.
4. Sería interesante también realizar ciclos continuos de carga/descarga para analizar como envejece y calcular el estado de salud de las baterías, que se puede realizar con el mismo cargador que se ha utilizado en este proyecto.

5. Implementar un contador en el modelo que llevase una cuenta de los ensayos realizados y basándose en los estudios de los ciclos continuos de carga/descarga, que permitiese ir reduciendo la capacidad de la batería en función de su estado de salud.
6. Aunque la combinación de los dos modelos para el modelado ha sido bastante satisfactoria, se podría sustituir el modelo simplificado de Thévenin por otro que permitiese estudiar a fondo el comportamiento dinámico de la batería y especialmente de la resistencia interna.
7. Utilizar otro modelo de batería, pero un modelo electroquímico como el modelo de Shepherd que estudie el funcionamiento de la batería desde otro punto de vista, con la posibilidad de comparar ambos modelos y concluir con cuál de los dos se obtienen unas mejores simulaciones.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Linden y Reddy - 2002 - Handbook of batteries.pdf». Accedido: 26 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.inexess.com/files/ecar/Akkus/Handbook%20Of%20Batteries%203rd%20Edition.pdf>
- [2] C. Julien, A. Mauger, A. Vijh, y K. Zaghib, *Lithium Batteries: Science and Technology*. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-19108-9.
- [3] D. Linden y T. B. Reddy, Eds., *Handbook of batteries*, 3. ed. en McGraw-Hill handbooks. New York, NY: McGraw-Hill, 2002.
- [4] «Lithium_Batteries_Science_Technology_Springer.pdf».
- [5] «Rodríguez - Baterías de ion litio presente y futuro.pdf». Accedido: 1 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://unlp.edu.ar/wp-content/uploads/81/35081/a05b0f92e176924a0a8a841528d0df88.pdf>
- [6] D. Deng, «Li-ion batteries: basics, progress, and challenges», *Energy Science & Engineering*, vol. 3, n.º 5, pp. 385-418, 2015, doi: 10.1002/ese3.95.
- [7] R. González y J. Miguel, «Autor: López Sánchez, David».
- [8] «Características de las baterías LiFePO4 | Kuantica Hybrid Solar Technologies». Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.kuantica-hst.com/caracteristicas-baterias-linadium/>
- [9] «Desarrollo de baterías plomo-ácido reguladas por válvula para nuevas aplicaciones de automoción.pdf».
- [10] «¿Cómo funcionan las baterías de plomo ácido? | AutoSolar». Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/como-funcionan-las-baterias-de-plomo-acido>
- [11] D. Linden y T. B. Reddy, Eds., *Handbook of batteries*, 3rd ed. en McGraw-Hill handbooks. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [12] «FuelCell_Larminie&Dicks (2).pdf».
- [13] «State of Charge Estimation Techniques of Li-Ion Battery of Electric Vehicles».
- [14] R. Iglesias *et al.*, «Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda».
- [15] «Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas.pdf».
- [16] R. Iglesias *et al.*, «4006 - Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda».
- [17] «Electric Vehicle Technology Explained (Wiley,2003)(Isbn 0470851635)(303S) E (2).pdf».
- [18] «Modelización de Sistemas Energéticos Híbridos con Hidrógeno como Vector Energético.pdf».
- [19] J. Larminie y A. Dicks, *Fuel cell systems explained*, 2nd ed. Chichester, West Sussex: J. Wiley, 2003.
- [20] «ANR26650M1B_v1 July 28_print.pdf».
- [21] «ficha-tecnica-celda-32140-lifepo4-hdibattery.pdf».

- [22] «ZKETECH EBC-A20 USER MANUAL Pdf Download», ManualsLib. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.manualslib.com/manual/2010240/Zketech-Ebc-A20.html>
- [23] «BU-409: Charging Lithium-ion», Battery University. Accedido: 9 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion>
- [24] «Banguero - Modelado, estudio y validación experimental de la influencia de los parámetros interno....pdf».
- [25] «Batteries In A Portable Wold .pdf».
- [26] D. Karimi, H. Behi, J. Van Mierlo, y M. Bercebar, «Equivalent Circuit Model for High-Power Lithium-Ion Batteries under High Current Rates, Wide Temperature Range, and Various State of Charges», *Batteries*, vol. 9, n.º 2, p. 101, feb. 2023, doi: 10.3390/batteries9020101.
- [27] D. Andrea, *Battery Management Systems for Large Lithium-ion Battery Packs*. Artech House, 2010.

.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

Las implicaciones tanto sociales como ambientales de este TFG radican en su contribución a la transición de vehículos propulsados por combustibles contaminantes a vehículos propulsados por baterías. Se promueve, por tanto, mediante la creación de este modelo, el desarrollo de tecnologías más limpias, favorables y amigables con el medio ambiente, lo que aporta directamente una mejora en la calidad del aire y la salud pública.

Desde un punto de vista económico, este trabajo promueve la inversión en la industria automovilística y en tecnología relacionada con el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía más eficientes. La transición hacia vehículos eléctricos requiere inversión en investigación y desarrollo. Además, la creación de este modelo promueve la utilización de los modelos matemáticos ya existentes y capaces de simular el comportamiento de una batería, reduciendo así, considerablemente los costes de recursos y acelerando la adopción de vehículos eléctricos en el mercado.

Por último, la utilización de las baterías contribuye en la disminución de la polución atmosférica, teniendo un impacto significativo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la mitigación del cambio climático. Promoviendo el avance de una economía más sostenible y menos dependiente de los combustibles fósiles.

.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La reflexión ética y social de este TFG se basa en encontrar un equilibrio entre el avance tecnológico y el bienestar tanto humano como ambiental. El desarrollo de los modelos matemáticos que permitan estudiar el comportamiento de las baterías en vehículos eléctricos promoverá la transición hacia una movilidad más eficiente y reducirá los impactos negativos en el medioambiente. Además de promover el cambio, también se reducirán los costes en el desarrollo de los vehículos, que permitirá, por tanto, reducir el precio de venta al público de los vehículos.

Aunque hay que mencionar también las implicaciones éticas de estos avances tecnológicos, aunque sí que es verdad que se reducirían los costes asociados a los vehículos eléctricos, habría que garantizar una transición justa para aquellos con menos poder adquisitivo. Además, existen unas ciertas preocupaciones sobre la procedencia de los materiales que se utilizan para fabricar las baterías de Litio y las condiciones laborales de las minas donde se extraen este tipo de recursos.

Desde el punto de vista social, la calidad de la atmósfera se mejoraría y, por ende, supondría una mejora sustancial para la salud de las personas. No obstante, deberían de cuestionarse algunas medidas relacionadas con el alto coste inicial de la adquisición de un vehículo de estas características, lo que podría relacionarse con profundas desigualdades económicas. Esto provoca que sea fundamental y que se garantice que el progreso tecnológico este estrechamente relacionado con el bienestar de las personas y la sostenibilidad ambiental.

ANEXO III: CÓDIGO DE MATLAB

En el presente anexo se adjuntarán los códigos utilizados que se implementan en cada uno de los bloques del modelo de la batería realizado en Matlab.

- Bloque de cálculo de la intensidad:

```
function out = Intensidad(OCV, Potencia, Rint)

if Potencia>0 %Cargar la batería
    Intensidad = 0;

elseif Potencia<0 %Descarga de la batería
    Intensidad = (OCV - (((OCV^2)-(4*Rint*Potencia))^0.5))/(2*Rint);

else
    Intensidad = 0;
end
out = Intensidad;
```

- Bloque de cálculo de la carga eliminada/suministrada:

```
function CRCS = CRCS(Intensidad, Kp, dt) %Cálculo de la carga eliminada/suministrada
en función
% del proceso de carga/descarga

if Intensidad>0 %Cuando la intensidad sea mayor que cero se descargará la batería
    % teniendo en cuenta el coeficiente de Peukert

    CRCS = ((Intensidad^Kp)*dt)/3600;

elseif Intensidad<0 %Si la intensidad es menor que cero se procederá a cargar la
batería
    % sin tener en cuenta el coeficiente de Peukert

    CRCS = (Intensidad*dt)/3600;

else
    CRCS = 0;
end
```

- Bloque de cálculo del estado de carga:

```
function SOC = SOC(CRCS,C_Peukert)

SOC = 100 - 100*(1-(abs(CRCS)/C_Peukert));

end
```

-

- Bloque de cálculo curva OCV de descarga:

```
function f_SOC = OCV(SOC)

% Definición de coeficientes
p1 = -1.2711e-15;
p2 = 5.2029e-13;
p3 = -8.9496e-11;
p4 = 8.3976e-09;
p5 = -4.6688e-07;
```

```

p6 = 1.5631e-05;
p7 = -3.0583e-04;
p8 = 0.0032;
p9 = -0.0155;
p10 = 3.2676;

% Calcular el valor de la función
f_SOC = p1*SOC^9 + p2*SOC^8 + p3*SOC^7 + p4*SOC^6 + p5*SOC^5 ...
        + p6*SOC^4 + p7*SOC^3 + p8*SOC^2 + p9*SOC + p10;
end

```

- Bloque de cálculo curva OCV de carga:

```

function y = curvaOCVcarga(SOC)

% Coeficientes para cada polinomio
coef1 = [-6.2491e-09, 1.3087e-07, 5.8014e-06, -2.5391e-04, 0.0039, -0.0288,
0.1070, 3.1311];
coef2 = [-2.9712e-13, 9.0217e-11, -9.6984e-09, 3.8985e-07, 2.4281e-06, -6.2802e-
04, 0.0176, 3.2070];
coef3 = [2.4761e-18, -1.9123e-15, 6.4606e-13, -1.2471e-10, 1.5045e-08, -1.1615e-
06, 5.6037e-05, -0.0015, 3.6186];

if SOC >= 0 && SOC < 15
    % Primer polinomio
    y = polyval(coef1, SOC);
elseif SOC >= 15 && SOC < 80
    % Segundo polinomio
    y = polyval(coef2, SOC);

elseif SOC >= 80
    %Cuarto polinomio
    y = polyval(coef3, SOC);
else
    error('El valor de SOC debe estar entre 0 y 100');
end
end

```

-