



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÁREA DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**HERRAMIENTA SOFTWARE BASADA EN MATLAB® PARA LA
SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO**

**Dña. ABREU RECHE, Lilié
TUTOR: D. VIERA PÉREZ, Juan Carlos**

FECHA: (septiembre de 2020)

Índice

1.- Motivación y ámbito.	3
2.- Introducción.....	5
3.- Definiciones asociadas al campo de las baterías (Glosario).....	8
4.- Estado del arte de las baterías de litio.	10
4.1.- Características y funcionamiento de una batería.	10
4.2.- Funcionamiento de las baterías de litio-ion.....	13
4.3.- Electrodo positivo.....	15
4.3.1.- Óxido de litio-cobalto (LCO).	16
4.3.2.- Óxido litio-manganeso (LMO).	17
4.3.3.- Óxido litio-níquel (LNO).....	19
4.3.4.- Litio-fosfato de hierro (LFP).	20
4.3.5.- Óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto (NMC).	21
4.3.6.- Óxido de litio-níquel-cobalto-aluminio (NCA).	22
4.4.- Electrodo negativo.....	23
4.4.1.- Electrodos a base de carbono.	23
4.4.2.- Titanato de litio (LTO).	24
4.4.3.- Litio metálico.....	25
4.4.4.- Electrodos a base de aleación. Electrodos de litio-silicio.....	27
4.5.- Electrolito.	27
4.6.- Comparación entre las principales tecnologías de litio-ion.....	28
4.7.- Conclusiones.	29
5.- Modelo de baterías de MATLAB/Simulink®.....	31
5.1.- Descripción del modelo.....	31
5.2.- Parámetros de entrada del modelo.....	43
5.2.1.- Parámetros generales.	43
5.2.1.- Parámetros para el ajuste de la curva de descarga.	45
5.2.2.- Parámetros del modelo de temperatura.	48
5.2.3.- Parámetros del modelo de envejecimiento.....	49
5.3.- Conclusiones.	51
6.- Prácticas de laboratorio virtual.....	53

6.1.- PL#1: Diseño de un banco de ensayos virtual usando MATLAB/Simulink®.	53
6.1.1.- Diseño de un banco de ensayos virtual. Etapas de carga y descarga.....	55
6.1.2.- Simulación de un protocolo de ensayos. Comparación con resultados reales.	68
6.1.3.- Conexión de celdas en serie y paralelo.	75
6.2.- PL#2: Factores que influyen en la vida útil la batería.	82
6.2.1.- Influencia de la temperatura.	83
6.2.2.- Influencia del envejecimiento por ciclado.....	90
6.3.- PL#3. Técnicas de evaluación de la resistencia interna.	95
6.3.1.- Medida de IR por método CC.	96
6.3.2.- Medida de IR por método AC.	103
6.4.- Conclusiones.	108
7.- Dimensionamiento y selección del sistema de almacenamiento en una aplicación industrial.....	110
7.1.- Seguidor solar autoalimentado in-situ en una aplicación industrial.	110
7.2.- Dimensionamiento del sistema de almacenamiento.	112
7.3.- Simulación del sistema de seguimiento solar auto-alimentado.	115
7.4.- Conclusiones.	123
8.- Conclusiones generales.....	125
9.- Bibliografía.	127
10.- Anexo 1.....	131
11.- Anexo 2.....	134

1.- Motivación y ámbito.

Ante el evidente cambio climático experimentado a nivel global en la última década, muchos países europeos han comenzado a implantar políticas enmarcadas a lograr un desarrollo sostenible, apostando por el uso de energías renovables como principal fuente de suministro de energía.

La transición energética europea hacia fuentes 100% renovables es una necesidad debido a la escasez de los recursos naturales y a la contaminación causada por la quema de combustibles fósiles, causantes fundamentales de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

La utilización combinada de fuentes de energía renovables como la solar, eólica, hidroeléctrica, bioenergía y geotérmica lograrían cubrir las necesidades energéticas de forma eficiente y sostenible. En este aspecto, los sistemas de almacenamiento de energía juegan un papel fundamental, ya que permiten la continuidad del suministro, debido al carácter intermitente de las fuentes renovables de energías.

Los sistemas de almacenamiento de energía se clasifican de acuerdo con sus mecanismos electroquímicos en: condensadores, supercondensadores, baterías y pilas de combustible. Dentro de estos sistemas, las baterías han atraído la atención del mercado mundial en los últimos años debido a su rápida respuesta, alta densidad de energía, la reducción de sus precios y a la posibilidad de devolver casi en su totalidad la energía almacenada. Las baterías más utilizadas en el mercado actual son las de litio-ion debido a sus mejores prestaciones en cuanto a rendimiento, energía específica, comportamiento térmico, densidad de energía y potencia específica; superando a las tradicionales baterías de plomo-ácido o de níquel-metal-hidruro, entre otras. Las baterías de litio-ion constituyen una parte fundamental en la mayoría de los dispositivos electrónicos, los vehículos eléctricos y los sistemas de almacenamiento masivo.

Comprender el funcionamiento de las diferentes tecnologías de baterías, en especial de las baterías de lito-ion, es fundamental para los estudiantes de varias ramas de ingeniería. Estos conocimientos juegan un papel importante en su desarrollo profesional ya que son muy demandados por el sector industrial y en general por toda la sociedad.

Actualmente existen pocas asignaturas, tanto a nivel de grado como de máster, donde se impartan materias relacionadas con los sistemas de almacenamiento y más específicamente sobre baterías. A pesar de la incorporación en algunas asignaturas de temas relacionados con el

comportamiento de las baterías, estos, únicamente se imparten de forma teórica en las aulas puesto que se hace difícil la implementación de un laboratorio como los habituales para la enseñanza de la electrónica. La realización de ejercicios demostrativos para entender el comportamiento de una u otra tecnología de batería ante una serie de condiciones de funcionamiento, es difícil de conseguir en el tiempo disponible para una práctica de laboratorio, tal y como está concebido en la actualidad. En el campo de la investigación, los ensayos reales de una celda o batería podrían tardar horas, semanas, meses o incluso años, para poder observar los efectos deseados. Estos efectos pueden ser el envejecimiento por ciclado, la influencia de la temperatura o la influencia de la razón de carga.

En este trabajo se propone la implementación de una herramienta software basada en MATLAB® que permita la simulación y el análisis de diferentes sistemas de almacenamiento, su comparación y su comprensión. Dicha herramienta debe facilitar la realización de una serie de prácticas de laboratorio mediante la utilización del modelo de baterías de MATLAB/Simulink®, que sirvan como complemento docente a las clases de teoría que actualmente se imparten en diferentes asignaturas de ingeniería.

La herramienta desarrollada podría aplicarse de manera inmediata en asignaturas como “Tracción Eléctrica” del segundo año del Grado en Ingeniería Eléctrica y “Sistemas de Instrumentación Industrial” del segundo año del Máster en Ingeniería Industrial, entre otras. Además, la herramienta podría tener otras utilidades como el dimensionamiento y selección de sistemas de almacenamiento en aplicaciones industriales.

2.- Introducción.

La escasez de recursos naturales y el cambio climático a nivel global han concientizado a los gobiernos a establecer pautas que permitan una transición energética hacia fuentes más limpias y sostenibles. El uso de fuentes de energías renovables es una de las principales soluciones a la escasez de combustibles tradicionales y a los riesgos ambientales que tienen como consecuencia la quema de esos combustibles fósiles. Sin embargo, la naturaleza intermitente y aleatoria de la producción de energía a partir de fuentes renovables requiere de sistemas de almacenamiento que permitan su estabilidad.

Por este motivo, varios esfuerzos en el campo de la investigación, se han centrado en el mejoramiento y desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía, tales como celdas solares, celdas de combustible, supercondensadores y baterías. Siendo las baterías recargables, la tecnología de sistemas de almacenamiento más omnipresente actualmente en aplicaciones de integración de energías renovables, debido a su seguridad, reciclabilidad, rentabilidad, portabilidad, alta densidad de energía, alta densidad de potencia y relativa alta vida cíclica [1]. Dependiendo de los materiales utilizados en la fabricación de las baterías recargables existen varias tecnologías entre las que destacan las baterías de plomo-ácido, níquel-cadmio, níquel-hidruro metálico y litio-ion. Actualmente las baterías de litio-ion dominan el mercado de baterías secundarias debido a la mayor energía por unidad de peso y de volumen que son capaces de almacenar, respecto al resto de tecnologías de baterías recargables.

Las baterías de litio-ion tienen un papel importante en la calidad de vida de la sociedad moderna por su utilización en dispositivos electrónicos portátiles como teléfonos móviles, tabletas electrónicas y computadoras, entre muchos otros dispositivos electrónicos de consumo. Además, esta tecnología de baterías, es utilizada en aplicaciones espaciales, en la medicina (bioimplantes e instrumentos médicos), en vehículos eléctricos, en sistemas de suministro de energía en combinación con energía fotovoltaica y eólica, etc.

Dada la amplia gama de aplicaciones y presencia en el mercado actual, las baterías de litio-ion juegan un papel fundamental en la sostenibilidad energética y la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera. Por este motivo, se han comenzado a introducir asignaturas, sobre todo en ramas relacionadas con la ingeniería, donde se abordan temas reaccionados con el campo de las baterías. En muchas ocasiones los temas relacionados con este campo, solo se imparten de forma teórica en las aulas debido a la dificultad de poder realizar una práctica de laboratorio como las comunes en el resto de las asignaturas. Para poder

observar la influencia de varios factores en el comportamiento y funcionamiento de una batería, como por ejemplo la influencia del envejecimiento o la temperatura, sería necesario la realización de ensayos que pueden tardar días, incluso años, lo que sería incompatible con el tiempo disponible para la realización de una práctica de laboratorio tal y como están definidas actualmente. El estudio de estos factores en el comportamiento de las baterías, también es de gran importancia en aplicaciones industriales donde se evita alargar excesivamente los tiempos de ensayos ya que se encarecería demasiado el producto al cual se destina el sistema de almacenamiento.

Las herramientas software que incluyen modelos y permiten la simulación de sistemas, tienen cada vez aplicaciones más importantes para estudiar las baterías, y en particular, para comprender su funcionamiento, sin tener que hacer experimentos sofisticados y costosos. Entre estas herramientas software se encuentra el modelo de baterías que brinda el programa MATLAB/Simulink® en su librería *SimScape*.

Este trabajo se propone la realización de una serie de prácticas de laboratorio de forma virtual, que sirvan como complemento a las clases de teoría que se imparten en varias asignaturas, tanto de grado como de máster, de forma tal, que permitan a los estudiantes estudiar y comprender el funcionamiento de las baterías ante diferentes escenarios de funcionamiento, poniendo énfasis en las baterías de litio-ion. También se pretende mostrar la utilidad y la posible aplicación de dicho modelo para la realización del dimensionamiento y selección del sistema de almacenamiento más adecuado en una aplicación industrial.

Para lograr los objetivos propuestos, el presente trabajo se estructura de la siguiente forma:

En el **Capítulo 4** se realiza una descripción del principio de funcionamiento de una batería y una breve comparación entre las principales tecnologías de baterías que compiten actualmente en el mercado. También se realiza un resumen del principio de funcionamiento de las baterías de litio-ion, detallando los elementos fundamentales que las componen y las propiedades fundamentales de las químicas disponibles para la fabricación de sus electrodos. Dicho resumen se realiza haciendo énfasis en las ventajas y desventajas que ofrecen las diferentes químicas en cuanto a: energía y potencia específicas, vida cíclica, seguridad, disponibilidad, coste, aplicaciones, etc. Por último, en este capítulo, se realiza una comparación entre las principales características de las diferentes tecnologías existentes de litio-ion.

En el **Capítulo 5** se realiza una descripción del modelo de batería disponible en el programa MATLAB/Simulink® y de cada uno de los parámetros de entrada a partir de los cuales se modela el comportamiento de la batería.

En el **Capítulo 6** se propone la realización de una serie de prácticas de laboratorio que permiten observar la respuesta de varias tecnologías de baterías ante diferentes condiciones de funcionamiento. En un primer momento se propone la realización de una serie de cargas/descargas a diferentes razones de corriente, parametrizando el modelo de baterías a partir de la hoja de características de la celda a analizar. A continuación, se propone la simulación de un banco de ensayos virtual capaz de emular un protocolo de ensayos como los realizados en la realidad. Con los resultados obtenidos de las simulaciones en el banco de ensayos virtual se analizan y se abordan conceptos generales relacionados con el campo de las baterías, como la influencia de las velocidades de carga y descarga, principales métodos de carga y conexión de celdas en serie y paralelo. En una segunda práctica se propone la realización de un análisis de los principales factores que influyen en la vida útil de una batería, poniendo énfasis en la influencia de la temperatura de funcionamiento y el envejecimiento por ciclado. En la tercera y última práctica, se propone la aplicación de dos métodos para medir el valor de la resistencia interna de la batería ante una serie de condiciones de funcionamiento y evaluar el rendimiento de esta a partir de los resultados obtenidos.

Por último, en el **Capítulo 7**, se realiza el dimensionamiento y selección del sistema de almacenamiento para una aplicación industrial que consiste en un sistema de seguimiento solar. A partir de un prototipo de sistema de seguimiento solar facilitado por la empresa *Reneergy by ASTURMADI GROUP* se obtiene el consumo del motor encargado de realizar el movimiento de los paneles solares a lo largo de todo un día de funcionamiento. Los datos de consumo se obtienen mediante una tarjeta de adquisición de datos, controlada por un programa creado en LabVIEW®. A partir de los datos de consumo, se realiza el dimensionamiento y selección de la batería apropiada para el sistema. Posteriormente se realiza una simulación del sistema de seguimiento solar autoalimentado en el programa MATLAB/Simulink®, incluyendo los elementos de electrónica de potencia necesarios para su funcionamiento, con el objetivo de evaluar la respuesta de la batería seleccionada durante el movimiento donde el motor consume más energía para realizar el seguimiento solar.

3.- Definiciones asociadas al campo de las baterías (Glosario).

Tensión nominal (V): Valor de tensión especificado por el fabricante, bajo unas condiciones específicas de índice de descarga y temperatura ambiente [2].

Tensión de circuito abierto (V): Valor de tensión de la batería (especificado para un estado de carga y temperatura ambiente) en ausencia de corriente de carga o descarga y en estado de reposo absoluto [2].

Tensión de corte (V): Valor de tensión para el que se da por finalizada la carga o la descarga. Tensión de corte superior (final de carga) e inferior (final de descarga) [2].

Capacidad Nominal (Ah): Cantidad de amperios-hora (Ah) que puede entregar una batería totalmente cargada bajo unas ciertas condiciones específicas (generalmente a temperatura ambiente y con un régimen de descarga específico seleccionado por el fabricante). Se expresa mediante la expresión $Capacity (Ah) = \int_0^{t_1} i(t) \cdot dt$, donde $i(t)$ es la corriente de descarga y t_1 el tiempo de descarga [2].

Índice de carga/descarga (C-Rate): Régimen de carga o descarga al que se somete un batería, expresado como un múltiplo de la capacidad nominal en amperios hora. Por ejemplo, si una batería de capacidad nominal 1Ah está cediendo 0,1A y una batería de 10Ah está entregando 1A, se están descargando con un índice o razón de C/10 [3].

Estado de carga (SOC) (%): Relación entre la capacidad en amperios hora que tiene almacenada una batería y su capacidad nominal [2].

Profundidad de descarga (DOD) (%): Relación de los amperios hora descargados de una batería con respecto a su capacidad nominal. Ejemplo, una profundidad de descarga del 70% en una batería de 10Ah corresponde a una extracción de 7Ah [2].

Carga rápida: Cuando la razón de carga es de C o más [4].

Densidad de energía (Wh/l): Energía (Wh) que se puede almacenar en una batería por unidad de volumen (l) [4].

Densidad de potencia (W/l): Potencia (W) que se puede extraer de una batería por unidad de volumen (l) [4].

Energía específica (Wh/kg): Energía (Wh) que se puede almacenar en una batería por unidad de masa (kg) [4].

Potencia específica (W/kg): Potencia (W) que se puede extraer de una batería por unidad de masa (kg) [4].

Rango de temperatura de funcionamiento (°C): Margen de temperaturas en el que la batería trabaja en condiciones seguras y con un rendimiento aceptable, tanto en carga como en descarga [2].

Embalamiento térmico: Fenómeno producido por una temperatura elevada que activa reacciones exotérmicas, aumentando aún más la temperatura de la batería. Puede producirse si el calor en el interior de la batería no se disipa de forma adecuada, incrementando de forma rápida la temperatura interna, lo que puede producir fuego o la explosión de la batería [2].

Vida cíclica: Número de ciclos, bajo unas condiciones de carga y descarga específicas, que soporta una batería antes de que su capacidad nominal disminuya por debajo de un límite específico, generalmente un 80 % de la capacidad inicial [4].

Eficiencia Energética (%): Relación de la energía extraída de una batería durante una descarga en función de la energía requerida para ser cargada. Se expresa mediante la expresión

$$\eta = \frac{\int_0^{t_d} i_d(t) \cdot v_d(t) \cdot dt}{\int_0^{t_c} i_c(t) \cdot v_c(t) \cdot dt}$$
 donde, v_d y v_c son las tensiones de descarga y de carga, i_d e i_c son las corrientes de descarga y carga, y t_d y t_c el tiempo de descarga y de carga [2].

Eficiencia culómbica o Aceptación de carga (%): Relación entre los amperios-hora extraídos de una batería y los necesarios para cargarla [4].

Estado de salud (SOH): Relación entre la capacidad nominal de una batería nueva, medida en unas condiciones específicas, y la capacidad de esa misma batería medida en las mismas condiciones después de un tiempo de uso o de almacenamiento [5].

Resistencia interna (Ω): Es la suma de la resistencia iónica y electrónica de los componentes de la celda. Se trata de un valor dependiente de la corriente, el estado de carga, la vida de la batería y la temperatura [2].

Temperatura de almacenamiento (°C): Margen de temperaturas, en circuito abierto (almacenamiento, manipulación y transporte) que puede tolerar la batería sin degradarse [2].

Autodescarga (%): Es la pérdida de capacidad de una batería cuando se encuentra en circuito abierto. Tiene su origen en reacciones químicas internas de descarga [6].

Sobrecarga: Consiste en forzar una corriente a través de una batería después de que todo el material activo ha sido convertido al estado cargado, es decir, la carga continúa después de que se ha alcanzado el 100% del SOC o zonas próximas al 100% [2].

Sobredescarga: Proceso que tiene lugar cuando se continúa la descarga de la celda por debajo de la tensión operativa mínima recomendada [2].

4.- Estado del arte de las baterías de litio.

Una batería es un sistema de almacenamiento de energía que convierte la energía eléctrica en química y viceversa. Existen dos clasificaciones en función de la posibilidad de que la batería pueda o no aceptar carga una vez que se ha descargado: las baterías primarias y las secundarias. Las baterías primarias, solo pueden convertir su energía química en eléctrica una vez (solo pueden ser descargadas), mientras que las baterías secundarias pueden cargarse y descargarse un determinado número de veces.

Con el creciente uso de fuentes de energías renovables como la energía eólica, la geotérmica, la mareomotriz, la solar, entre muchas otras; las baterías secundarias juegan un papel fundamental para mantener un suministro regular y eficiente de energía. Las baterías secundarias son ampliamente utilizadas en dispositivos electrónicos, en sistemas de tracción eléctrica y en sistemas de respaldo de la red eléctrica.

En el siguiente capítulo se realiza un resumen de los principales conceptos relacionados con el campo de las baterías. Se realiza un estudio bibliográfico sobre las diferentes tecnologías de baterías, poniendo especial énfasis en las basadas en litio-ion ya que ofrecen una alta confiabilidad, alta densidad de potencia, larga vida útil, alta densidad de energía, baja tasa de autodescarga y alta eficiencia energética. Además, la disminución de su coste en los últimos años ha incrementado su presencia en los sectores de la automoción con tracción eléctrica (vehículos eléctricos puros o híbridos) y en el sector de las energías renovables, permitiendo una mayor integración de las mismas en los sistemas eléctricos. También se realiza una descripción general de varias tecnologías de baterías litio-ion, sus ventajas, desventajas, características de funcionamiento y aplicaciones.

4.1.- Características y funcionamiento de una batería.

El principio de funcionamiento de una batería se basa en un proceso reversible llamado reducción-oxidación, donde uno de los componentes se oxida (pierde electrones) y el otro componente se reduce (gana electrones).

Una “celda” es la unidad mínima electroquímica que transforma energía química en energía eléctrica; cuando se aísla una celda del ambiente exterior y se la dota de terminales para

su uso comercial se obtiene una “batería”. Las baterías pueden constar de una o más celdas conectadas en serie y/o en paralelo para obtener la tensión y/o capacidad deseada.

La configuración de celda única es la batería más simple y se utiliza fundamentalmente en aplicaciones donde la potencia requerida sea baja, entre las que se encuentran los teléfonos móviles, tabletas, relojes de pared y relojes de pulsera. En aplicaciones donde se requiera una tensión superior a la que puede proporcionar una única celda se utilizan conexiones en serie entre varias celdas, mientras que para alcanzar una capacidad más alta se utilizan conexiones en paralelo [7].

Una celda está compuesta por tres componentes fundamentales: dos electrodos y un electrolito. El electrodo con mayor potencial de reducción se denomina electrodo positivo, mientras que el electrodo con menor potencial de reducción se denomina electrodo negativo. Ambos electrodos se encuentran sumergidos en el electrolito, que es el medio que permite la transferencia de carga entre los electrodos. El electrolito es generalmente líquido, aunque en algunas celdas puede ser un gel o un sólido. Además, las celdas cuentan con un separador que impide el contacto eléctrico directo entre los electrodos, pero permite el paso de partículas cargadas a través del mismo [2].

Dependiendo del material utilizado en sus electrodos y de sus características electroquímicas, existen diferentes tecnologías de baterías. Las tecnologías de baterías más utilizadas en el mercado son: plomo-ácido, níquel cadmio (Ni-Cd), níquel-hidruro metálico (Ni-MH) y litio-ion (Li-ion). La Tabla 1 compara los principales tipos de baterías comerciales en términos de densidad de energía y potencia, ciclo de vida, eficiencia, tensión nominal, etc.

	Plomo-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Energía específica (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	100-270
Potencia específica (W/kg)	180	150	250-1000	250-1800
Tensión nominal	2 V	1.2 V	1.2 V	3.2-3.7 V
Temperatura de operación	-20-50 °C	-40-60°C	-20-60°C	-20-60°C
Vida cíclica	200-300	1500	300-600	600-3000
Eficiencia de energía %	70	60-90	75	80-90
Eficiencia culómbica %	90	70-90	70-90	99
Tolerancia de sobrecarga	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Autodescarga	Baja	Moderada	Alta	Muy baja

Estabilidad térmica	Menos estable	Menos estable	Menos estable	Estable
Coste	Bajo	Moderado	Moderado	Alto
Toxicidad	Muy alta	Muy alta	Baja	Baja

Tabla 1: Comparación de características de las baterías recargables de uso comercial. Fuente [8][9][10].

Las baterías de plomo-ácido son una tecnología madura y económica, con una gran cantidad de fabricantes en todo el mundo. Esta tecnología de baterías es utilizada en automóviles, sillas de rueda, montacargas y grandes sistemas de suministro ininterrumpido de energía (UPS) [11]. Su tasa de autodescarga se encuentra entre las más bajas de los sistemas de baterías recargables, sin embargo, poseen un peso y volumen elevados para la energía que almacenan (baja energía específica y densidad de energía) [2]. Permite solo un número limitado de ciclos de descarga completos, por lo que su utilización se limita a aplicaciones donde se requieran descargas profundas solo de forma ocasional. A bajas temperaturas el rendimiento de la batería disminuye y una carga inadecuada podría ocasionar escapes de gases. Además, el electrolito y el contenido de plomo pueden causar daños medioambientales [11].

Las baterías de níquel-cadmio son una tecnología robusta y resistente, con un buen comportamiento ante situaciones rigurosas de trabajo, en un amplio rango de temperaturas y con una alta vida cíclica si se mantienen adecuadamente. Sin embargo, debido a su contenido de cadmio (tóxico) se ha limitado su uso. Estas baterías poseen una densidad de energía relativamente baja, en comparación con los sistemas más nuevos y tiene una autodescarga relativamente alta por lo que necesitan ser recargadas después del almacenamiento. Estas baterías se utilizan como fuente de respaldo en centrales térmicas, en nucleares y en sistemas de tracción eléctrica [11].

Las baterías de níquel-hidruro-metálico surgen como una alternativa más ecológica a las baterías de níquel-cadmio y se utilizan principalmente en dispositivos portátiles. El NiMH posee hasta un 40% más de densidad de energía, en comparación con el NiCd, aunque, es menos duradero ya que el ciclado a altas razones de corriente y el almacenamiento a alta temperatura reduce su vida útil [11]. Además, la autodescarga de estas baterías es considerablemente mayor que la de NiCd, y necesita un algoritmo de carga más complejo ya que genera más calor durante la carga [2].

El presente estudio se centrará en las baterías de litio-ion ya que es la química de batería más prometedora y de más rápido crecimiento en el mercado actual [11]. Esto se debe principalmente a su alta energía específica, alta vida cíclica, alta eficiencia energética, amplio rango de temperatura de operación, capacidad de carga rápida y baja tasa de autodescarga, en comparación con el resto de tecnologías de baterías. Las baterías de litio-ion ofrecen una densidad de energía tres veces mayor que la de una batería plomo-ácido debido al bajo peso atómico del litio [12]. Además, la tensión por celda es mayor que en el resto de baterías comerciales, por lo que se requiere un menor número de celdas en serie para alcanzar cierta tensión.

Sin embargo, tienen inconvenientes que incluyen su alto coste y la necesidad de sistemas complejos de seguridad y monitoreo (BMS). Además, a altas temperaturas de trabajo pueden presentar una rápida degradación y en condiciones extremas, puede provocar la destrucción de la batería por incendio o explosión.

4.2.- Funcionamiento de las baterías de litio-ion.

El funcionamiento de las baterías de litio-ion es diferente al de las baterías convencionales ya que, la transferencia de carga se produce fundamentalmente por intercalación iónica en lugar de reacción química de los electrodos, lo que posibilita que las reacciones secundarias sean mínimas, alcanzando valores cercanos al 90% de eficiencia energética y casi el 100% de eficiencia culómbica.

En el mecanismo de intercalación, los iones de litio ocupan sitios vacantes (se insertan o intercalan) en la estructura de los electrodos [2]. Los principales compuestos utilizados en los electrodos para la intercalación de iones de litio son los que contienen metales de transición con estructuras en capas, espinelas u olivinas [1].

La celda de litio-ion está conformadas por un electrodo positivo, un electrodo negativo, un separador, dos colectores de corriente y el electrolito que permite la circulación de iones por el interior de la batería, tal y como se puede observar en la Figura 1.

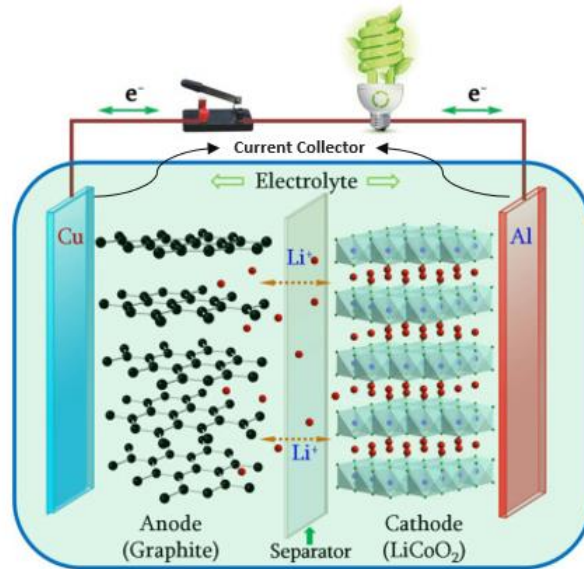


Figura 1: Partes que constituyen una celda de litio-ion. Fuente [13].

Cuando los terminales de la celda se conectan a una carga externa, puede trabajar como fuente de tensión, aportando o extrayendo energía del circuito, en función del sentido de la corriente. Los iones de litio se insertan o extraen del espacio intersticial entre las capas atómicas de los materiales activos por los que están constituidos el electrodo positivo y el electrodo negativo de la batería, como se puede observar en la Figura 2 [13], [14].

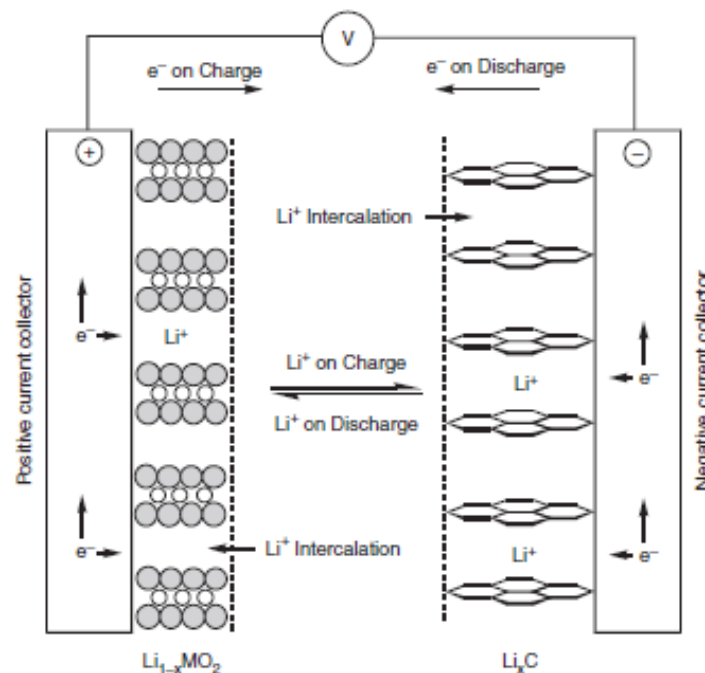


Figura 2: Funcionamiento básico de una batería de litio-ion [2].

Cuando se carga una celda de litio-ion (la carga aporta energía a la celda), el material del electrodo positivo se oxida (cede electrones) y el material del electrodo negativo se reduce (gana electrones). En este proceso, los iones de litio se desintercalan del material positivo y se intercalan en el material negativo. Durante la descarga ocurre un proceso inverso al anterior. En este caso es la celda la que aparta la energía a la carga, por lo que el electrodo positivo se reduce y el electrodo negativo se oxida [2].

La tensión de la celda será la diferencia de potencial de reducción entre el par que conformen los materiales de los electrodos, mientras que la capacidad estará influenciada por la capacidad específica de cada uno de los materiales constituyentes de los electrodos [15]. Debe existir una combinación adecuada de los materiales constituyentes de los electrodos para la obtención de los requisitos necesarios, según las aplicaciones y las condiciones de uso de la batería.

El electrodo negativo generalmente se formula a partir de grafito, y el electrodo positivo generalmente contiene uno de los siguientes materiales: óxido de litio-manganeso (LMO), óxido de litio-níquel, óxido de litio-fosfato de hierro (LFP), óxido de litio-cobalto (LCO), óxido de níquel-manganeso-cobalto (NMC) y óxido de níquel-cobalto-aluminio (NCA). Como materiales para el electrolito se utiliza carbonato de dietilo o carbonato de etileno, mientras que el aluminio y el cobre se utilizan como colectores de corriente positiva y negativa, respectivamente [15].

A continuación, se realiza una breve descripción de las principales ventajas y desventajas de los materiales utilizados en la fabricación de los electrodos de las baterías de litio-ion, así como, las principales aplicaciones en el mercado actual. También se realiza un resumen de los principales electrólitos utilizados en la fabricación de este tipo de tecnología de baterías.

4.3.- Electrodo positivo.

Un elemento clave, que limita el rendimiento de las baterías, es el elemento activo del electrodo positivo, y es el elemento que más encarece la batería [16]. Los materiales utilizados en el electrodo negativo suelen ofrecer una mayor capacidad de almacenamiento de iones de litio que los materiales del electrodo positivo, motivo por el cual, el material del electrodo positivo es el factor limitante en el rendimiento de las baterías de litio-ion [13].

El electrodo positivo debe contener sitios o espacios reticulares adecuados para almacenar y liberar iones, por lo que se requieren estructuras de cristal robustas, con suficientes sitios de almacenamiento para producir un material con ciclabilidad estable y alta capacidad específica [13].

Como se mencionó en el apartado anterior, las estructuras típicas de los electrodos positivos son la estructura en capas, la espinela y la olivina. Los materiales con estructura en capas se utilizan cuando se requieren sistemas de alta energía, mientras que los materiales con estructura de espinela y olivinas se utilizan en sistemas donde se requiera alta potencia [16].

En general, la elección de los materiales a utilizar en el electrodo positivo de una celda de litio-ion se basa en las necesidades de las aplicaciones donde se utilicen (rendimiento de la batería, ciclo de vida útil, seguridad, coste, entre muchos otros). A continuación, se realiza una breve descripción de los principales materiales utilizados en los electrodos positivos de las celdas de litio-ion.

4.3.1.- Óxido de litio-cobalto (LCO).

Las primeras baterías comerciales de Sony, en 1991, utilizaron LiCoO_2 (óxido de litio-cobalto) como material en el electrodo positivo debido a su alta densidad de energía y facilidad de fabricación [2]. El electrodo formado por dicho material tiene una estructura de capas, donde, en estado litiado, se alternan capas de CoO_2 y de Li (Figura 3).

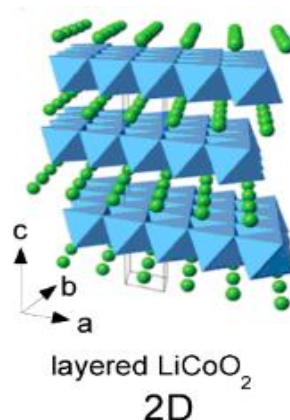


Figura 3: Estructura en capas de LiCoO_2 . Fuente [16].

Las celdas formadas por este material tienen una serie de limitaciones, entre las que se puede destacar su inestabilidad térmica, lo que implica que deban ser controladas durante su

funcionamiento para garantizar la seguridad [15]; también tienen una vida corta y no puede cargarse ni descargarse a corrientes fuera de su rango de funcionamiento, por lo que la velocidad de carga y descarga debe limitarse aproximadamente a 1C [8].

Además, el cobalto, no solo es un elemento limitado y costoso, también es tóxico para el medio ambiente. En la Tabla 2 se muestra un resumen de las principales características de las baterías de LCO [5][17][18].

Nombre	Óxido de litio-cobalto (LCO)
Electrodo positivo	LiCoO ₂
Electrodo negativo	Grafito
Tensión de celda (V)	3.7–3.9
Energía específica	150–190 Wh/kg
Máxima Razón de descarga	1C
Embalamiento térmico	150°C
Vida cíclica	500-1000 ciclos
Beneficios	Alta energía específica
Inconvenientes	Alto coste, vida útil corta, capacidad de carga limitada y problemas de seguridad por baja estabilidad térmica del óxido de cobalto

Tabla 2: Principales características del electrodo de LiCoO₂.

El óxido de litio-cobalto ha sido muy utilizado en dispositivos electrónicos personales (computadoras portátiles, cámaras, tabletas, etc.). También se utilizó en la aviación, en el *Boeing 787 Dreamliner*, para proporcionar energía auxiliar de arranque y respaldo durante el vuelo. Aunque varios fallos en la baterías por embalamiento térmico, provocaron la puesta a tierra de todos los aviones afectados a principios de 2013, evidenciando los problemas de seguridad de estas celdas y la necesidad de un riguroso sistema de control [17].

4.3.2.- Óxido litio-manganeso (LMO).

Las primeras baterías de óxido de litio-manganeso (LMO) se comercializaron en 1996. El material del electrodo positivo LiMn₂O₄, forma una estructura de espinela tridimensional

(Figura 4) que favorece el flujo de iones y disminuye la resistencia interna [17]. Esta disminución de la resistencia interna permite que las baterías de Li-manganeso se puedan descargar a razones de corrientes mayores (20-30A) con acumulación moderada de calor, en comparación a las baterías de LCO [15].

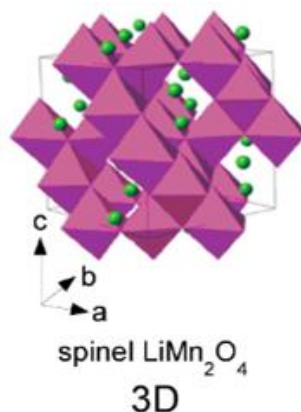


Figura 4: Estructura en espinela de LiMn_2O_4 . Fuente [16].

El material con estructura de espinela utilizado en el electrodo positivo permite una alta estabilidad térmica y, por tanto, un aumento de la seguridad. Sin embargo, la capacidad del Li-manganeso es aproximadamente un 33% menor en comparación con el Li-cobalto. El óxido de litio-manganeso tiene una mayor pérdida de capacidad durante los ciclos de carga/descarga debido a la extensa desintegración de manganeso en el electrolito a temperaturas elevadas [8]. En la Tabla 3 se muestra un resumen de las principales características de la tecnología de baterías de LMO [5][17][18].

Nombre	Óxido de litio-manganeso (LMO)
Electrodo positivo	LiMn_2O_4
Electrodo negativo	Grafito
Tensión de celda (V)	4.4
Energía específica	100–140 Wh/kg
Máxima Razón de descarga	1C típico; tolerable 10C y 30C en algunas celdas
Embalamiento térmico	250°C
Vida cíclica	1000-1500 ciclos

Beneficios	Bajo precio, alto valor de tensión, seguridad media, alta potencia, no contiene cobalto y se basa en materiales abundantes y ecológicos
Inconvenientes	Vida útil limitada, menor energía

Tabla 3: Principales características del electrodo de LiMn_2O_4 .

Las baterías LMO se usan principalmente en bicicletas eléctricas, herramientas eléctricas y dispositivos médicos. También han sido utilizadas por varios fabricantes de vehículos eléctricos, mezclando Li-manganeso con óxido de litio- manganeso y cobalto, para mejorar la energía específica y prolongar la vida útil. Entre los principales fabricantes de vehículos eléctricos, que han utilizado dicha combinación, se encuentran Nissan Leaf, Chevy Volt y BMW i3 [8], [15].

4.3.3.- Óxido litio-níquel (LNO).

La utilización del LiNiO_2 (óxido de litio-níquel) como material del electrodo positivo surge como alternativa a las baterías de LCO, ya que es un material de menor coste y libre de Co (tóxico). La estructura bidimensional de capas de las baterías de LNO es similar a las de LCO. Además, las baterías de óxido de litio y níquel poseen una alta energía específica, un alto valor de tensión por celda y ofrecen entre un 20% y un 30% más de capacidad reversible que LCO [14]. Sus principales inconvenientes son, la corta vida útil de sus ciclos electroquímicos y, sus problemas de estabilidad térmica y estructural a elevados estados de carga o elevadas temperaturas [19].

Debido a los problemas de estabilidad, las celdas de LNO requiere un gran cuidado en su fabricación, por lo que es un material menos práctico para su utilización en aplicaciones comerciales. Las soluciones sólidas de este material con Co, Fe, Mn, Al, Ti y Mg mejoran el rendimiento de este tipo de baterías [15]. En los siguientes apartados se realiza un análisis de algunas de las baterías que utilizan la combinación de materiales mencionados con anterioridad en su fabricación.

4.3.4.- Litio-fosfato de hierro (LFP).

Las primeras baterías de litio-fosfato de hierro (LiFePO_4) se comercializaron en 1999 y pronto se consideró una tecnología prometedora debido a su alta vida cíclica, seguridad y alta disponibilidad del Fe. El electrodo de LiFePO_4 tiene una estructura de cristal olivino lo que permite que los iones de Li se muevan a lo largo de una sola dirección del eje del cristal (unidimensional) [20], como se muestra en la Figura 5.

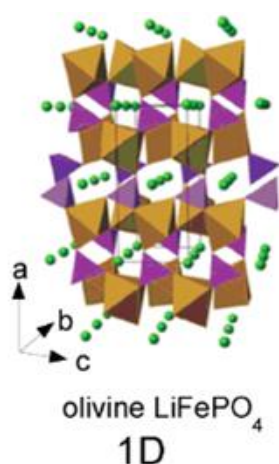


Figura 5: Estructura en olivina de LiFePO_4 . Fuente [16].

Las principales ventajas de las baterías LiFePO_4 se basan en su larga vida útil y alta estabilidad térmica. Estas características permiten que puedan tolerar más situaciones de abusos eléctricos como sobrecargas, sobredescargas y temperaturas elevadas, en condiciones de seguridad. Las celdas fabricadas con LiFePO_4 muestra una curva de tensión bastante plana en una amplia ventana del SOC (15-100%), lo que implica un rendimiento constante. Sin embargo, la energía específica de estas celdas es relativamente baja, en comparación con otras químicas de litio-ion [17]. En la Tabla 4 se muestra un resumen de las principales características de la tecnología de baterías de LFP [5][17][18].

Nombre	Litio-fosfato de hierro (LFP)
Electrodo positivo	LiFePO_4
Electrodo negativo	Grafito
Tensión de celda (V)	3.3
Energía específica	90-140 Wh/kg

Máxima Razón de descarga	11C, 25C en algunas celdas
Embalamiento térmico	270°C
Vida cíclica	2000 ciclos
Beneficios	Buena estabilidad térmica, alto índice de corriente, excelente seguridad, larga vida útil y baja toxicidad
Inconvenientes	Energía específica moderada, baja tensión, sensible a la variación de temperatura y alta autodescarga

Tabla 4: Principales características del electrodo de LiFePO_4 .

La batería LFP son utilizadas fundamentalmente en aplicaciones donde se requiera alta potencia como: herramientas eléctricas, bicicletas eléctricas y sistemas de almacenamiento y suministro de energía. También muestran características prometedoras para suministrar energía a vehículos eléctricos e híbridos [2].

4.3.5.- Óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto (NMC).

Las baterías de NMC se comercializaron por primera vez en 2004 y su estructura atómica en capas es muy similar a la de los electrodos constituidos por LCO [17]. Los electrodos de óxido de litio- níquel- manganeso-cobalto (NMC) permiten la obtención de una alta energía específica. Estas propiedades favorables se atribuyen a la combinación de Ni (capacidad), Co (cinética) y Mn (estabilidad) [1].

La combinación de níquel y manganeso exhibe un buen rendimiento general debido a la alta energía específica del níquel y el bajo efecto de resistencia interna del manganeso [8]. La mezcla de níquel y manganeso varía según el fabricante, lo que determina en gran medida las características de la batería, brindando soluciones personalizadas para una amplia gama de aplicaciones. En la Tabla 5 se muestra un resumen de las principales características de la tecnología de baterías de NMC [5][17][18].

Nombre	Óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto (NMC)
Electrodo positivo	LiNiMnCoO_2
Electrodo negativo	Grafito
Tensión de celda (V)	3.8–4.0

Energía específica	140–200 Wh/kg
Máxima Razón de descarga	1C, 2C en algunas celdas
Embalamiento térmico	210°C
Vida cíclica	1000–2000
Beneficios	Buen rendimiento general y excelente en energía específica
Inconvenientes	Alto coste

Tabla 5: Principales características del electrodo de LiNiMnCoO_2 .

Las baterías de NMC tiene una gran demanda para aplicaciones de vehículos eléctricos debido a su alta energía específica y una tasa reducida de autocalentamiento [15]. También se utiliza en dispositivos electrónicos portátiles, herramientas eléctricas y dispositivos médicos.

4.3.6.- Óxido de litio-níquel-cobalto-aluminio (NCA).

Las baterías de NCA se comenzaron a comercializar en 1999 y usan, por lo general, una mezcla de 80% de níquel, 15% de cobalto y 5% de aluminio ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$), con una dependencia de cobalto moderada en comparación con las baterías de LCO [17].

La tecnología NCA ofrece una alta energía específica, alta potencia específica y una larga vida útil, al igual que las baterías de NMC. Sin embargo, las baterías de NCA no son tan seguras como las de NMC ya que requieren medidas especiales de monitoreo y seguridad para su uso en vehículos eléctricos, debido a que la moderada estabilidad térmica del electrodo dificulta su utilización a altas razones de corriente [15]. En la Tabla 6 se muestra un resumen de las principales características de la tecnología de baterías de NCA [5][17][18].

Nombre	Óxido de litio-níquel-cobalto-aluminio (NCA)
Electrodo positivo	$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$
Electrodo negativo	Grafito
Tensión de celda (V)	3,65
Energía específica	200–250 Wh/kg
Máxima Razón de descarga	1C, 2C en algunas celdas
Embalamiento térmico	210°C

Vida cíclica	1000–1500
Beneficios	Alta densidad de energía y potencia, larga vida útil.
Inconvenientes	Alto coste y seguridad moderada

Tabla 6: Principales características del electrodo de $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$.

Las baterías NCA se usan en vehículos eléctricos, especialmente en los fabricados por Tesla para elevar la autonomía hasta cerca de los 500 kilómetros. Además, hay proyecciones para su uso en conexiones a la red (para respaldo y cambio de carga)[17].

4.4.- Electrodo negativo.

En el electrodo negativo de las baterías de litio-ion se utilizan materiales que permitan reacciones de intercalación y/o reacciones de conversión, aunque históricamente los materiales más utilizados son los que funcionan mediante reacciones de intercalación.

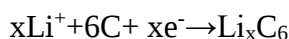
Los electrodos negativos más utilizados en el mercado incluyen electrodos a base de carbono y titanato de litio. También se han comenzado a utilizar aleaciones de litio-metal, con un enfoque especial en aleaciones de litio-silicio [15].

A continuación, se realiza un resumen de las principales características de los materiales utilizados comercialmente en la fabricación del electrodo negativo de las baterías de litio-ion.

4.4.1.- Electrodos a base de carbono.

El carbono, y generalmente el grafito sintético, es el material activo más utilizado en las celdas comerciales para el electrodo negativo. El grafito es un material abundante, de bajo coste y no tóxico, con una capacidad específica relativamente alta y un perfil de tensión plano que permite la obtención de un elevado valor de tensión general en la celda y, además, posee una alta eficiencia energética.

La reacción electroquímica en el electrodo negativo, en las baterías de litio-ion, está representada por la siguiente ecuación [21]:



Los iones Li^+ presentes en el electrolito entran entre los planos del grafito durante la carga (intercalación), la distancia entre los planos de la capa de grafito se expande aproximadamente un 10% para acomodar los iones Li^+ . Cuando la celda se descarga (desintercalación), los iones Li^+ se eliminan de la estructura de grafito y vuelven al electrolito. La cantidad máxima de iones Li^+ que se almacena en grafito es equivalente a $x = 1$ (LiC_6) [21]. Esta intercalación de litio en los planos de grafito proporciona una alta capacidad específica de 372 mAh/g (aproximadamente 2.5 veces mayor que LiCoO_2) y una alta capacidad volumétrica (similar a LiCoO_2) [22].

Durante el primer proceso de carga (litiación), algunas reacciones irreversibles pueden causar la descomposición de algunos constituyentes del electrolito formando una capa pasiva llamada interfaz de electrolito sólido (SEI). Una vez que esa capa SEI logra estabilizarse, funciona como un aislante eléctrico evitando cualquier transferencia de electrones desde el electrodo al electrolito, obstaculizando cualquier descomposición adicional del material electrolítico después de su formación [14]. Una corriente elevada podría romper esta capa exponiendo el electrodo y el electrolito, provocando reacciones entre ambos y, por tanto, la formación de una nueva capa SEI, consumiendo litio y reduciendo la capacidad del electrodo.

Un aumento de la superficie de los materiales carbonosos puede proporcionar más espacio para el alojamiento de iones de Li entre las capas y, por lo tanto, la obtención de más capacidad. Actualmente se estudia la posibilidad de utilizar nuevos materiales a base de carbono como alternativa al grafito, entre los que se encuentran: las nanofibras de carbono (CNF), los nanotubos de carbono (CNT) y el grafeno. La mayor conductividad eléctrica de estos materiales permite cargas y descargas a mayores razones de corriente [14].

4.4.2.- Titanato de litio (LTO).

El titanato de litio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), como material constituyente del electrodo negativo, se comenzó a utilizar en sustitución del grafito en las baterías comerciales de litio-ion desde la década de 1980. El material forma una estructura de espinela y el contraelectrodo puede ser LMO o NMC [8], [15].

El $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ no sufre cambios de volumen durante la litiación, lo que permite una vida útil extremadamente larga para el electrodo. Además, muestra una alta capacidad y una alta tasa de carga y descarga en comparación con el resto de tecnologías de litio-ion [15], [20].

Las baterías constituidas por este material pueden funcionar de manera segura y tienen un buen comportamiento a bajas temperaturas debido a una meseta de carga/descarga plana y, a que el electrodo de LTO no reacciona con el electrolito como en el caso del grafito. Sin embargo, su energía específica no es alta debido al bajo valor de tensión nominal que posee y a altos niveles de potencia el rendimiento disminuye [15]. En la Tabla 7 se muestra un resumen de las principales características de la tecnología de baterías de LTO [5][17][18].

Nombre	Titanato de litio (LTO)
Electrodo positivo	LMO, MNC
Electrodo negativo	$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$
Tensión de celda (V)	2.3–2.5
Energía específica	50–80 Wh/kg
Máxima Razón de descarga	10C, 30C en algunas celdas
Embalamiento térmico	Muy alto
Beneficios	Rango de temperatura de operación más amplio; ciclo de vida largo, alta seguridad y estabilidad, carga rápida
Vida cíclica	3000–7000
Inconvenientes	Bajo valor de tensión, baja densidad de energía

Tabla 7: Principales características del electrodo de $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$.

Debido a su alto nivel de seguridad, las baterías de titanato de litio se utilizan en dispositivos médicos y en aplicaciones de potencia donde la densidad de energía no es particularmente importante como los vehículos eléctricos. Las baterías de LTO se usan en ciertas versiones del vehículo eléctrico i-MiEV de Mitsubishi y en el Fit EV de Honda [15].

4.4.3.- Litio metálico.

El litio tiene una capacidad teórica casi 10 veces mayor que el grafito, además de tener un potencial electroquímico negativo más bajo y una densidad más baja. Por este motivo la sustitución del electrodo negativo de grafito por un litio metálico (Li^0) es una de las estrategias más prometedoras para avanzar hacia dispositivos de almacenamiento con una mayor densidad de energía. El electrodo negativo de Li^0 se suele utilizar con electrodos positivos de tipo

intercalación y/o conversión (por ejemplo, LiFePO_4 (LFP), $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ (NMC), LiCoO_2 (LCO) etc.), tal y como se muestra en la Figura 6 -a). También existen algunas tecnologías de baterías que lo combinan con azufre (Figura 6 - b) u oxígeno (Figura 6 - c) [23].

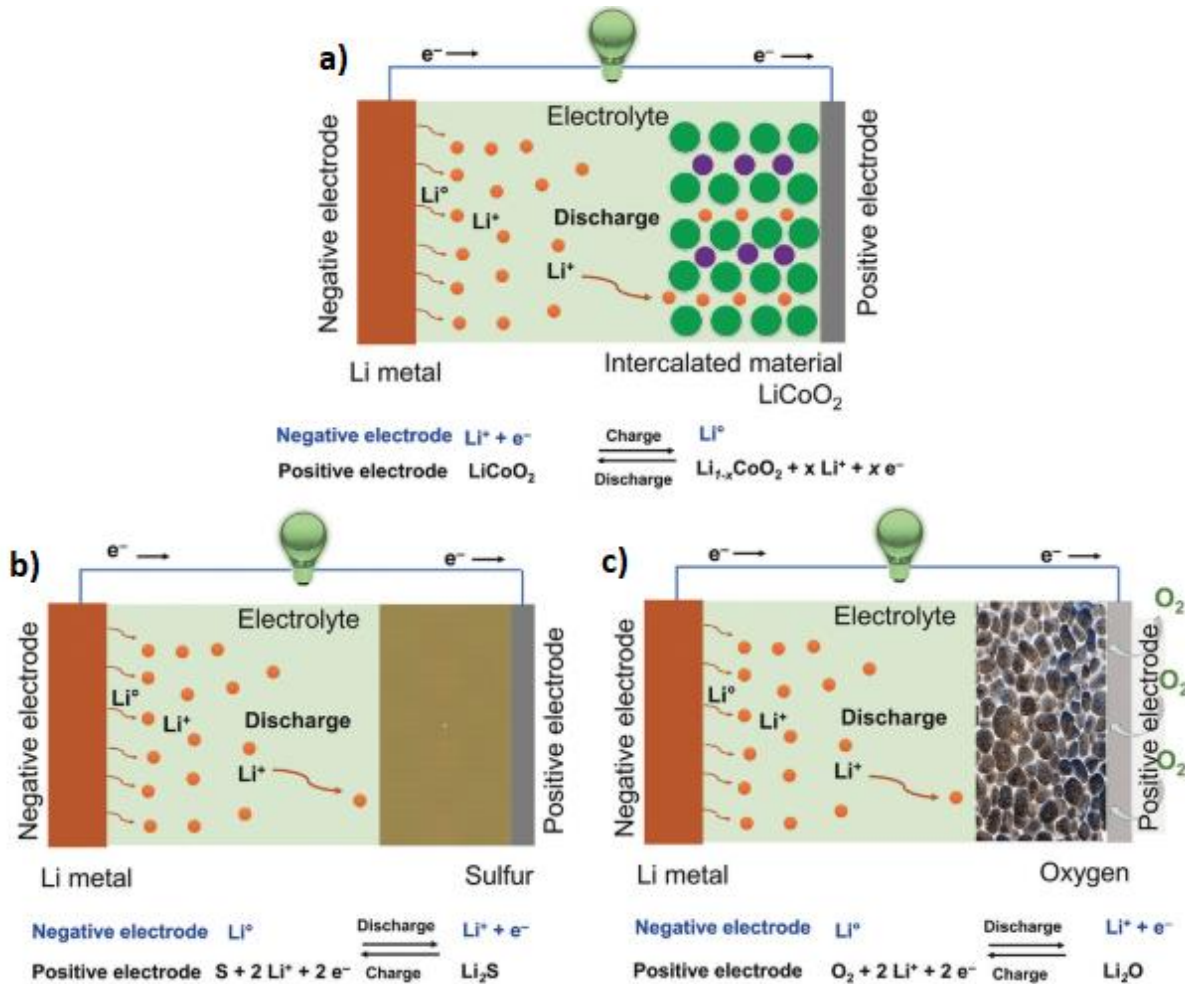


Figura 6: Baterías con electrodo negativo de litio-metal y electrodo positivo a) de intercalación c) azufre y d) aire. Fuente [23].

Sin embargo, los electrodos metálicos de Li en baterías secundarias han resultado ser un desafío debido al crecimiento de dendritas metálicas durante el recubrimiento y desprendimiento de litio, que provoca una baja eficiencia culómbica y energética. Estas dendritas también ocasionan problemas de seguridad debido a cortocircuitos que pueden causar riesgo de incendio o explosión [15], [23].

4.4.4.- Electrodos a base de aleación. Electrodos de litio-silicio.

La construcción del electrodo negativo a partir de metales que se alean electroquímicamente con litio a temperatura ambiente permite la obtención de baterías con una capacidad específica mayor, en comparación con los electrodos convencionales de grafito. Por este motivo se utilizan metales y metaloides, como el aluminio, el estaño y el silicio, que reaccionan con el litio para formar aleaciones mediante procesos electroquímicos que son parcialmente reversibles [15].

La acomodación de tanto litio provoca cambios de volumen en el metal anfitrión, lo que genera tensión mecánica durante los procesos de aleación/desaleación, ocasionando el agrietamiento y desmoronamiento del electrodo metálico. Esto provoca la pérdida de capacidad para almacenar carga en el transcurso de unos pocos ciclos [15]. En particular, los electrodos negativos que contienen silicio tienen una capacidad específica muy alta, pero sufren el cambio de volumen más extremo entre los materiales candidatos durante la litación (de aproximadamente el 280%) [24]. La utilización de silicio nanoestructurado y silicio fuertemente dopado mejora las propiedades mecánicas y eléctricas, acomodando de forma más eficaz la expansión del volumen [15].

4.5.- Electrólito.

El electrolito es un componente fundamental en la química de las baterías de litio ya que contribuye a la formación de vías conductoras de iones, permitiendo que los iones de litio se trasladen entre los dos electrodos.

Los electrolitos se dividen fundamentalmente en dos clases: electrolitos líquidos (acuoso y orgánico) y sólidos (polímero y cerámica). Los electrolitos líquidos presentan una alta conductividad iónica, son de fácil acceso y su excelente contacto con electrodos porosos permiten la construcción de vías iónicas altamente efectivas e interconectadas. Sin embargo, su alta volatilidad e inflamabilidad amenazan la seguridad de la batería, incluso con el uso de BMS (*Battery Management System*). Los electrolitos sólidos son más seguros, ya que su resistencia mecánica es mucho mayor que la de los electrolitos líquidos; pero su baja conductividad iónica dificulta su implementación práctica en baterías comerciales. También existen otros inconvenientes como el coste y la complejidad de la fabricación. Además, se

pueden producir reacciones secundarias en la superficie del electrolito sólido cuando se expone al agua o al aire húmedo, por lo que se requieren condiciones estrictas de conservación [25].

4.6.- Comparación entre las principales tecnologías de litio-ion.

Como se puede observar en los apartados anteriores, existen diferentes tecnologías de baterías de litio-ion dependiendo de sus propiedades químicas y de los materiales que conforman sus electrodos. Cada tecnología de baterías de litio tiene sus propias ventajas y desventajas en términos de energía y potencia específica, vida cíclica, seguridad, eficiencia y coste. La Figura 7 compara las características que brindan los principales materiales utilizados comercialmente en la fabricación de los electrodos de las baterías de litio-ion.



Figura 7: Comparación entre las principales tecnologías de baterías de litio-ion existentes en el mercado. Fuente [15].

Se puede concluir que LTO es la mejor tecnología de baterías de litio-ion en términos de seguridad, rendimiento y vida cíclica, pero sigue siendo pobre en potencia y energía específica, además de su elevado coste en el mercado. NCA, por ejemplo, tiene una alta energía específica, pero presenta un desafío de seguridad, mientras que las baterías de LFP son muy seguras, pero tienen una energía específica menor. NMC tiene un buen rendimiento general y una alta energía específica, siendo la candidata preferida para la utilización en vehículos

eléctricos. Las baterías de LCO poseen una alta energía específica, pero potencia específica moderada y seguridad baja; mientras que la tecnología de LMO mejora las características en cuanto a seguridad y potencia específica (respecto a las de LCO) pero su energía específica y rendimiento es menor.

Como se puede observar en la Figura 7, el tamaño de los gráficos de araña de cada una de las tecnologías de baterías de litio-ion, analizadas con anterioridad, es similar en volumen y diferente en forma, dependiendo de las características concretas de los materiales utilizados en su fabricación. Por este motivo, no se puede concluir que una tecnología es superior al resto y la elección del tipo de tecnología más adecuada depende de la aplicación concreta donde se vaya a utilizar.

4.7.- Conclusiones.

Las baterías de litio-ion tienen un papel fundamental en la transición energética hacia fuentes más limpias y confiables, que permitan la reducción de la quema de combustibles fósiles y, por tanto, la reducción de gases contaminantes en la atmósfera. Sus aplicaciones en vehículos eléctricos, dispositivos móviles, sistemas de almacenamiento masivo de energía y su integración con energías renovables, las convierten en un importante campo de estudio y desarrollo.

El crecimiento continuo y acelerado de las baterías de litio-ion en el mercado se debe fundamentalmente a sus características superiores, en comparación con el resto de tecnologías de baterías. Entre esas características se encuentran: mayor tensión por celda, mayor densidad de potencia, mayor energía específica y baja autodescarga.

Según los materiales utilizados en la fabricación sus electrodos, existen diferentes tecnologías de baterías de litio-ion, con diferentes características de funcionamiento y, por tanto, con diferentes campos de aplicación.

En este capítulo se realizó un resumen del principio de funcionamiento de una batería, haciendo énfasis en el funcionamiento de las baterías de litio-ion. También se realizó un resumen de los principales materiales utilizados en la fabricación de sus electrodos, así como, una breve descripción de las principales ventajas, desventajas, aplicaciones y características de cada uno de dichos materiales.

Además, se realizó una comparativa entre las diferentes tecnologías de baterías de litio existentes en el mercado en términos de rendimiento, seguridad, vida útil, energía específica y potencia específica.

5.- Modelo de baterías de MATLAB/Simulink®.

Los modelos dinámicos tienen un papel fundamental en el estudio y comprensión del comportamiento de los sistemas de almacenamiento de energía ante diferentes escenarios de funcionamiento, lo cual permite ahorrar tiempo y recursos valiosos.

Existen varios programas que incluyen modelos capaces de simular el comportamiento de una batería y predecir su comportamiento futuro a partir de un conjunto de ecuaciones. Entre ellos se encuentra el software matemático MATLAB® ("laboratorio de matrices"), el cual, es un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware [26]. Este programa se encuentra disponible en el portal de software corporativo de la universidad de Oviedo y su licencia es gratuita para los estudiantes y profesores, siempre que se utilice para fines académicos.

Incorporado en MATLAB® se encuentra Simulink®, que es un entorno de diagramas de bloques para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos. Posee un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y diferentes algoritmos de resolución, tanto continuos como discretos, para modelar y simular sistemas dinámicos. Este programa brinda un modelo de baterías bastante completo, fácil de parametrizar y capaz de simular el comportamiento de varias tecnologías de baterías, teniendo en cuenta los efectos de la temperatura y el envejecimiento.

En este capítulo se realiza una descripción del modelo de batería que proporciona Simulink®, explicando la gran variedad de parámetros ajustables a partir de los cuales se modela su comportamiento.

5.1.- Descripción del modelo.

En la literatura especializada se pueden encontrar varias formas de realizar modelos que permitan simular el comportamiento de una batería. Fundamentalmente los modelos de baterías suelen clasificarse en: modelos experimentales, modelos electroquímicos, modelos matemáticos y modelos de circuitos eléctricos equivalentes. Los modelos experimentales y

electroquímicos no son adecuados para representar la dinámica de la batería por sí solos, ya que requieren una amplia experimentación para determinar los parámetros adecuados del modelo, además se ser computacionalmente caros. Los modelos matemáticos se basan en ecuaciones empíricas y se utilizan para predecir el tiempo de carga/descarga, la eficiencia y la pérdida de capacidad de la batería. Sin embargo, el modelo matemático tiene un uso limitado para simular la relación entre varios parámetros del circuito de una batería. Los modelos basados en circuitos eléctricos equivalentes se utilizan para representar las características eléctricas de las baterías. El modelo eléctrico más simple de una batería consiste en una fuente de tensión ideal en serie con una resistencia interna y los parámetros del modelo se representan en términos de una ecuación polinómica, en función del estado de carga (SOC), la profundidad de descarga (DOD) y la velocidad de carga/descarga [27][28].

El modelo de baterías de MATLAB/Simulink® (Figura 8) se encuentra en la librería *Simscape /SimPowerSystems/ Specialized Technology/Electric Drives/Extra Sources* y parte del modelo de la resistencia eléctrica, completándolo con las ecuaciones del modelo electroquímico simple de *Shepherd* para tener en cuenta los fenómenos de polarización [6].

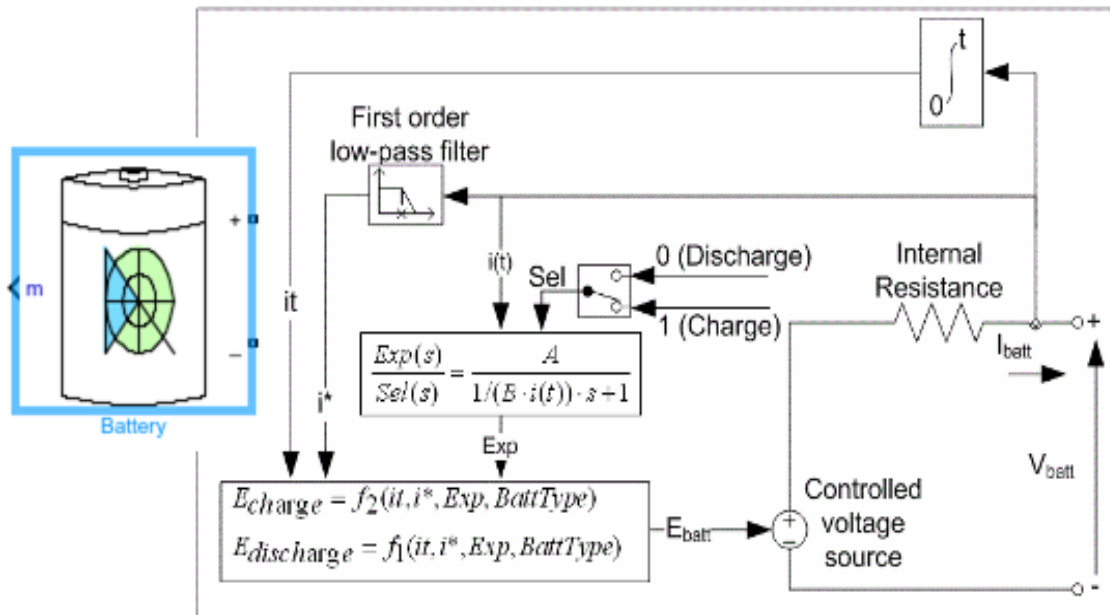


Figura 8: Modelo de baterías de MATLAB/Simulink® (Diagrama en bloques).

El modelo está compuesto por varios niveles de abstracción. En la Figura 9 se puede observar que el primer nivel está compuesto por una resistencia interna, que es un parámetro modificable desde las opciones de configuración, y por el modelo teórico matemático que

contiene la lógica que permite la simulación de distintos submodelos y de diferentes tecnologías de baterías en función de las propiedades seleccionadas en las opciones de configuración. A la entrada de dicho modelo matemático se tiene la temperatura ambiente que es un parámetro configurable desde el entorno de trabajo del Simulink® y la realimentación de corriente por la resistencia interna de la batería. El terminal *m* contiene los parámetros de salida del modelo (estado de carga, tensión instantánea, corriente instantánea, temperatura ambiente, temperatura de la celda, capacidad y vida cíclica).

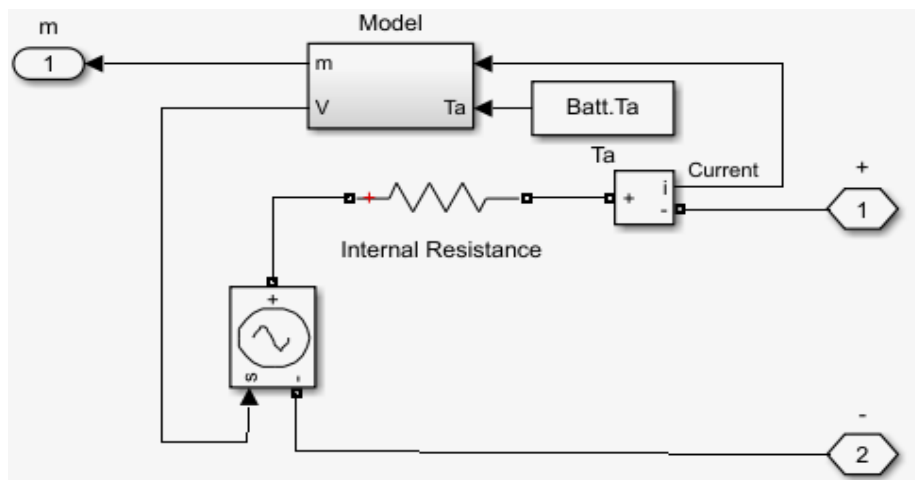


Figura 9: Modelo de baterías de MATLAB/Simulink® (Nivel 1).

Como se puede observar en la Figura 10, el segundo nivel del modelo está formado por una serie de ecuaciones, operaciones matemáticas y parámetros que unifican los submodelos encargados de simular los efectos provocados por la carga, la temperatura y el envejecimiento en la respuesta de la batería. El comportamiento de la batería se simula como el conjunto de: la tensión nominal, la parte de la curva exponencial de carga/descarga (submodelo *Exp*), la función de no linealidad de la tensión con el SOC en la zona exponencial (submodelo *E_NL*), la tensión en función de la dinámica de carga/descarga de la batería (submodelos *E_dyn Charge* y *E_dyn Discharge*) y la dinámica de la tensión en función de la influencia de la temperatura (submodelo *Termal Model*) y el envejecimiento (submodelo *Aging Model*).

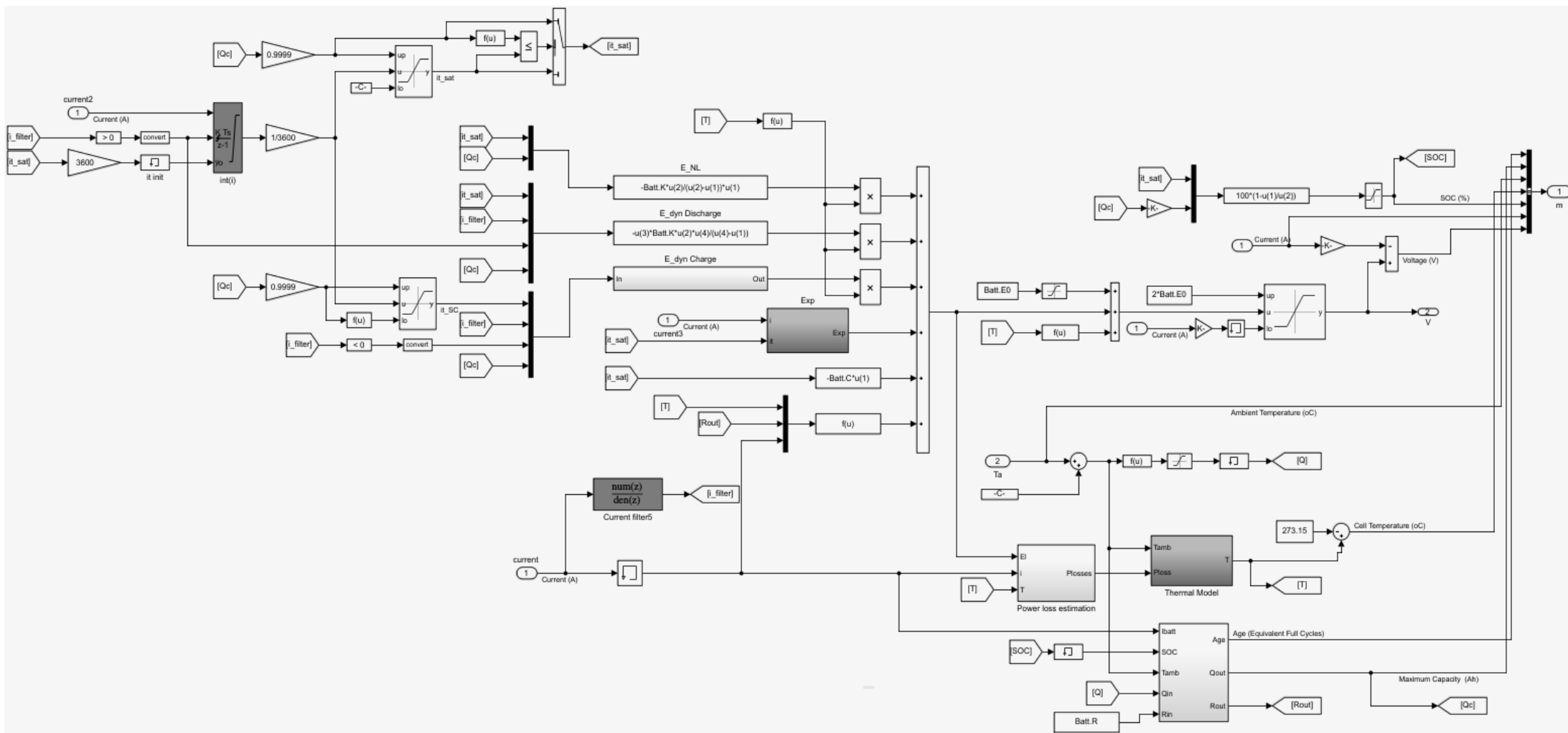


Figura 10: Modelo de baterías de MATLAB/Simulink® (Nivel 2).

El modelo brinda la posibilidad de simular el comportamiento de varias tecnologías de baterías (plomo-ácido, níquel-cadmio, níquel-metal-hidruro y lio-ion). Dependiendo del tipo de tecnología seleccionada el submodelo *E_dyn Charge* (Figura 11) implementa una serie de ecuaciones que representan la dinámica del proceso de carga/descarga de la batería.

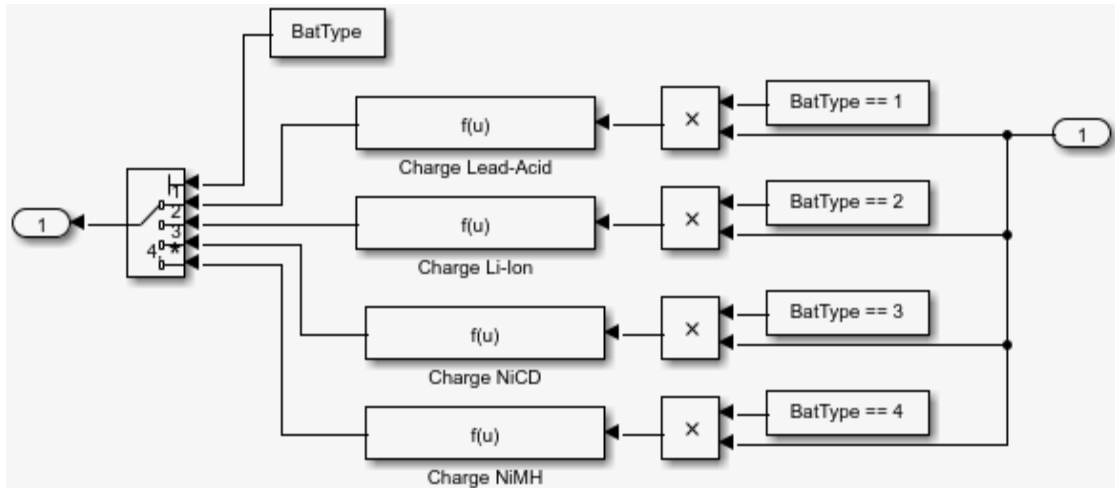


Figura 11: Modelo de baterías de MATLAB/Simulink®. Submodelo *E_dyn Charge*.

A continuación, se muestran las ecuaciones matemáticas que describen los procesos dinámicos de carga y descarga de las tecnologías de baterías implementadas en el modelo [29]:

Plomo-ácido:

Descarga ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (1)$$

Carga ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (2)$$

Litio-ion:

Descarga ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (3)$$

Carga ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (4)$$

Níquel-cadmio y Níquel-metal-hidruro:

Descarga ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (5)$$

Carga ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{|it|+0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (6)$$

Donde E_{Batt} es la tensión real que hay a la salida del modelo y E_0 es la tensión de circuito abierto de la celda totalmente cargada (Vfull), ambas en Voltios (V). El parámetro **Exp(s)** representa la dinámica de la zona exponencial, en Voltios (V); mientras que el parámetro **Sel(s)** representa el modo en que se encuentra la batería ($Sel(s) = 0$ durante la descarga, $Sel(s) = 1$ durante la carga). El valor **K** es la constante de polarización, en (Amperios-hora)⁻¹ (Ah⁻¹) y **i*** es la corriente filtrada por necesidades de implementación en MATLAB®. La variable **i** es la corriente de la batería en Amperios (A) y **it** es la capacidad extraída de la batería, en Amperios-hora (Ah). La variable **Q** es la capacidad máxima de la batería (Qmax) en Amperios-hora (Ah), **A** es la tensión exponencial (Vexp) en Voltios (V) y **B** es la capacidad exponencial (Qexp), en (Amperios-hora)⁻¹ (Ah⁻¹).

En la Figura 12 se puede observar la forma en que se obtienen algunas de las variables descritas con anterioridad en la curva de descarga típica de una batería. Los parámetros mostrados son los fundamentales a partir de los cuales se ajusta el modelo de carga/descarga de una batería en MATLAB/Simulink® y definen las tres zonas fundamentales de la curva de descarga: la zona donde la tensión cae de forma exponencial a medida que se descarga la batería, la zona donde la tensión cae de forma muy lenta hasta que su valor disminuye por debajo de la tensión nominal y, por último, la zona que representa la descarga total de batería, donde el valor de la tensión cae rápidamente. El resto de parámetros que influyen en el correcto funcionamiento del modelo, se explican en profundidad en los siguientes epígrafes.

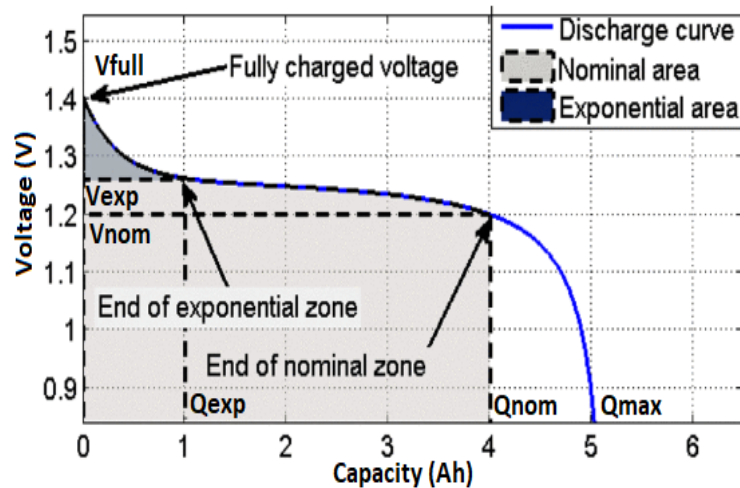


Figura 12: Curva de descarga típica. Parámetros fundamentales. Fuente [28].

La función de no linealidad (submodelo E_{NL}) se ajusta a partir de los parámetros de carga, mientras que el submodelo Exp , mostrado en la Figura 13, devuelve la curva exponencial de final de carga y principio de la descarga de la batería, dependiendo del tipo de batería seleccionada.

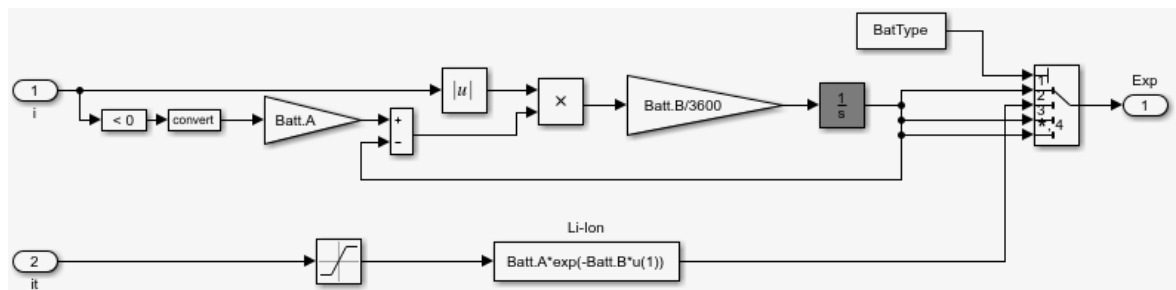


Figura 13: Modelo de baterías de MATLAB/Simulink®. Submodelo Exp .

Los submodelos que permiten simular los efectos de la temperatura y el envejecimiento en el comportamiento de la batería, solamente están disponibles cuando se selecciona la tecnología de litio-ion. Las baterías de litio-ion deben funcionar dentro de un margen de temperatura determinado, generalmente recomendado por el fabricante, ya que una temperatura elevada puede causar el embalamiento térmico de la celda y problemas de seguridad, mientras que una temperatura baja puede ocasionar la disminución de la capacidad de la batería. A continuación se describen las ecuaciones implementadas [29] en forma de lazos de control (Figura 10) que simulan el efecto de la temperatura sobre la respuesta de tensión y corriente, y en general sobre el resto de parámetros del modelo.

Descarga ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a) - it} \cdot (i^* + it) + A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it \quad (7)$$

$$V_{batt}(T) = f_1(it, i^*, i, T, T_a) - R(T) \cdot i \quad (8)$$

Carga ($i^* < 0$)

$$f_1(it, i^*, i, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{it + 0.1 \cdot Q(T_a)} \cdot i^* - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a) - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it \quad (9)$$

$$V_{batt}(T) = f_1(it, i^*, i, T, T_a) - R(T) \cdot i \quad (10)$$

$$E_0(T) = E_0|_{T_{ref}} + \frac{\partial E}{\partial T}(T - T_{ref}) \quad (11)$$

$$K(T) = K|_{T_{ref}} \cdot \exp\left(\alpha \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (12)$$

$$Q(T_a) = Q|_{T_a} + \frac{\Delta Q}{\Delta T} \cdot (T_a - T_{ref}) \quad (13)$$

$$R(T) = R|_{T_{ref}} \cdot \exp\left(\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (14)$$

Donde T_{ref} es la temperatura de referencia a la que se tienen los datos de la batería y T_a es la temperatura ambiente, ambas en Kelvin (K). Las razones $\frac{E}{T}$ y $\frac{\Delta Q}{\Delta T}$ indican las variaciones de tensión y de la capacidad máxima producidas por la temperatura en (Voltios/Kelvin) (V/K) y (Amperios-hora/Kelvin) (Ah/K), respectivamente. Las constantes α y β son las velocidades de Arrhenius para la resistencia de polarización y la resistencia interna, respectivamente. El parámetro C es la pendiente nominal de la curva de descarga en (Voltios/Amperios-hora) (V/Ah) y la variable T es la temperatura interna de la celda en un momento dado (t), expresada como:

$$T(t) = Laplace^{-1}\left(\frac{P_{loss}R_{th} + T_{ref}}{1 + s \cdot t_c}\right) \quad (15)$$

En la Figura 14 se pueden observar las operaciones matemáticas realizadas en el submodelo *Termal Model* para obtener la temperatura interna de la celda.

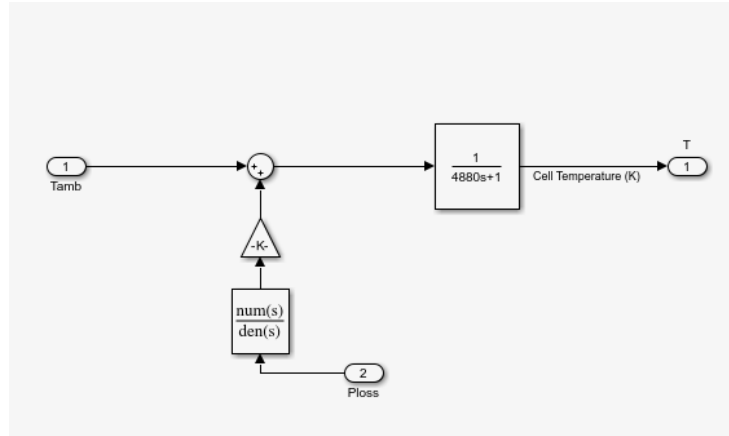


Figura 14: Modelo de baterías de MATLAB/Simulink®. Submodelo Termal Model.

En la ecuación 15, la variable R_{th} es la resistencia térmica entre la celda y el ambiente (Grados Celsius/Vatio) ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$), t_c es la constante térmica de tiempo entre la celda y el ambiente, en segundos (s) y P_{loss} es el calor total generado durante el proceso de carga/descarga, en Vatios (W) expresado por la siguiente ecuación:

$$P_{loss} = (E_0(T) - V_{batt}(T)) \cdot i + \frac{\partial E}{\partial T} \cdot i \cdot T \quad (16)$$

En la Figura 15 se puede observar el submodelo *Power loss estimation* que implementa la ecuación 16 dentro del modelo de baterías de Simulink®.

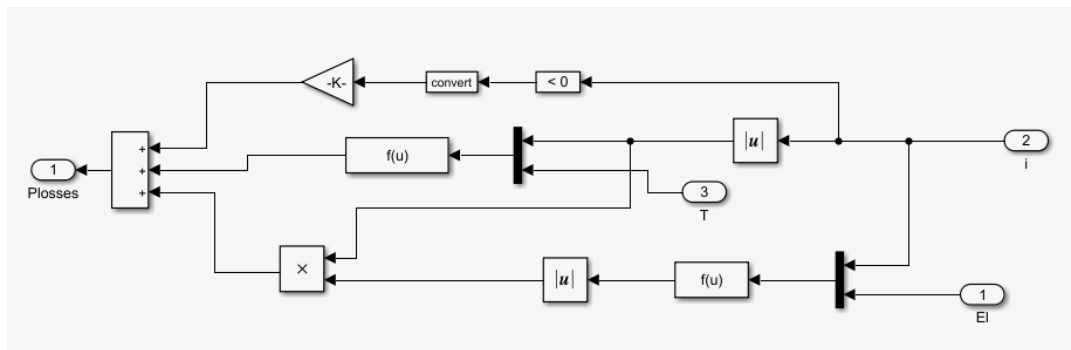


Figura 15: Modelo de baterías de MATLAB/Simulink®. Submodelo Power loss estimation.

El modelo también incorpora los efectos del envejecimiento sobre la capacidad y la resistencia interna en las baterías de litio-ion. Con el paso del tiempo y el uso, las baterías no se comportan de la misma forma que cuando eran nuevas ya que se ven afectadas por la pérdida progresiva de capacidad durante su vida útil. El envejecimiento no solo influye en la pérdida de

capacidad de la batería, también provoca un aumento del valor de la resistencia interna. En la Figura 16 se observan los bloques de cálculo de los diferentes parámetros y ecuaciones que simulan la influencia de dichos efectos sobre el comportamiento de la batería.

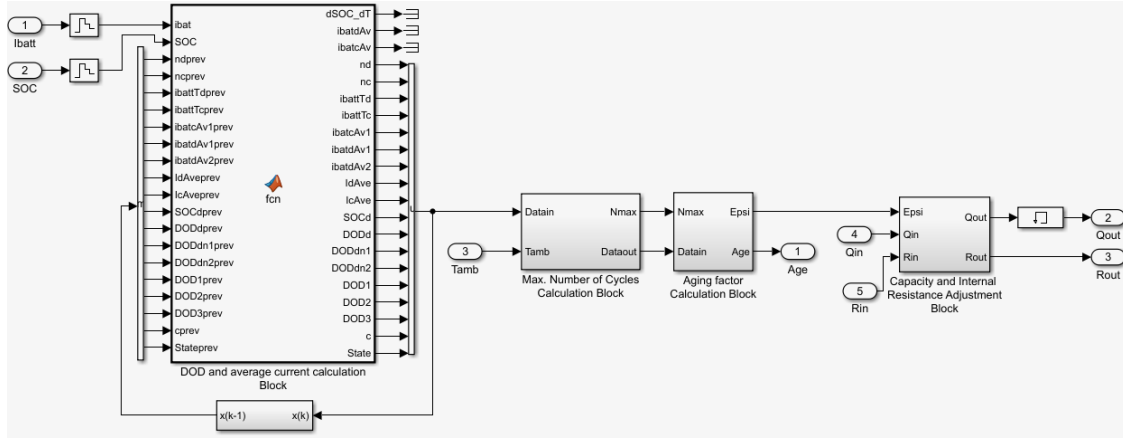


Figura 16: Modelo de baterías de MATLAB/Simulink®. Submodelo Aging Model.

Esta influencia del envejeciendo sobre la capacidad y la resistencia interna se representa a partir de las siguientes ecuaciones [29], las cuales se encuentran implementadas en el bloque de cálculo *Capacity and Internal Resistance*, tal y como se muestra en la Figura 17:

$$Q(n) = \begin{cases} Q_{BOL} - \varepsilon(n) \cdot (Q_{BOL} - Q_{EOL}) & \text{if } k/2 \neq 0 \\ Q(n-1) \end{cases} \quad (17)$$

$$R(n) = \begin{cases} R_{BOL} + \varepsilon(n) \cdot (R_{EOL} - R_{BOL}) & \text{if } k/2 \neq 0 \\ R(n-1) \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{Con } n = kT_h \quad (k = 1, 2, 3, \dots, \infty) \quad (19)$$

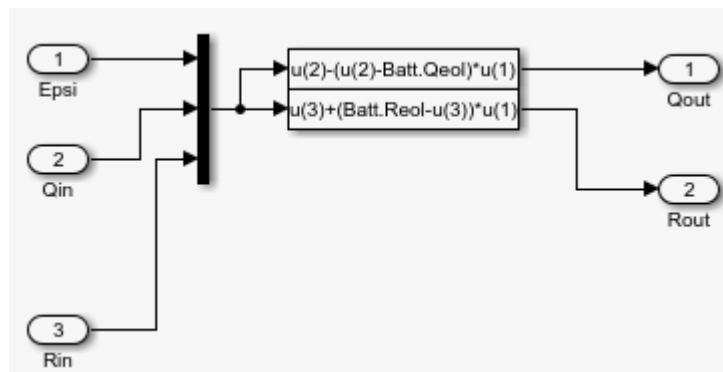


Figura 17: Modelo de baterías de MATLAB/Simulink®. Capacity and Internal Resistance Adjustment Block.

En las ecuaciones 17, 18 y 19 el parámetro T_h es la mitad de un ciclo de carga/descarga completo, en segundos (s). La variable Q_{BOL} es la capacidad máxima de la batería al inicio de la vida útil (BOL) y Q_{EOL} es la capacidad máxima de la batería al final de la vida útil (EOL), en Amperios-hora (Ah) y a temperatura ambiente nominal. El parámetro R_{BOL} es la resistencia interna de la batería al inicio de la vida útil (BOL) y R_{EOL} es la resistencia interna de la batería al final de la vida útil (EOL), en Ohmios (Ω) y a temperatura ambiente nominal. El factor de envejecimiento de la batería se define mediante la variable ε , igual a cero y la unidad en el BOL y EOL, y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon(n) = \begin{cases} \varepsilon(n-1) + \frac{0.5}{N(n-1)} \left(2 - \frac{DOD(n-2) + DOD(n)}{DOD(n-1)} \right) & \text{if } k/2 \neq 0 \\ \varepsilon(n-1) & \end{cases} \quad (20)$$

Esta ecuación se encuentra implementada en el bloque *Aging factor*, dentro del modelo de envejecimiento, tal y como se puede observar en la Figura 18.

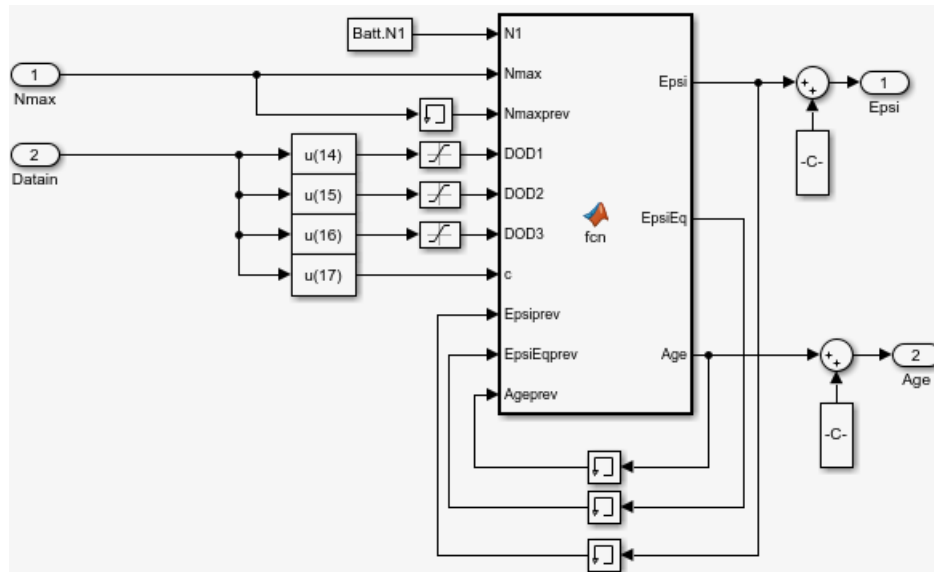


Figura 18: Modelo de baterías de MATLAB/Simulink®. Aging factor Calculation Block.

En la ecuación 20 el parámetro DOD es la profundidad de descarga de la batería en (%) y N es el máximo número de ciclos que admite la celda, dado por la siguiente ecuación:

$$N(n) = H \left(\frac{DOD(n)}{100} \right)^{-\xi} \cdot \exp \left(-\psi \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_a(n)} \right) \right) \cdot (I_{dis_ave}(n))^{-\gamma_1} \cdot (I_{ch_ave}(n))^{-\gamma_2} \quad (21)$$

Donde H es el número total de ciclos acumulados hasta el momento y ξ es un factor empírico que refleja la vida cíclica potencial de la batería en función del DOD. La variable ψ es la constante de velocidad de Arrhenius para el número de ciclo. Los parámetros I_{dis_ave} y I_{ch_ave} son las corrientes de descarga y carga media durante la duración de medio ciclo, en Amperios (A). Las variables γ_1 y γ_2 son factores empíricos que reflejan la vida cíclica de la batería en función de la corriente de descarga y carga respectivamente.

En la Figura 19 se observa la implementación dentro del bloque *Max. Number Cycle* de la ecuación 21.

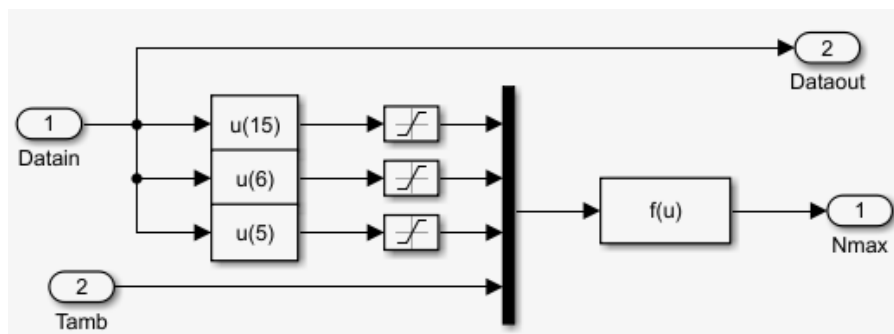


Figura 19: Modelo de baterías de MATLAB/Simulink®. *Max. Number Cycle Calculation Block*.

El modelo presentado asume que la resistencia interna es constante durante los ciclos de carga/descarga y que no varía con los cambios en la amplitud de la corriente. Además, no tiene en cuenta los efectos de autodescarga, y considera que la capacidad de la batería no cambia con la amplitud de la corriente y el ajuste del modelo se realiza a partir de las características de descarga (supone que las características de descarga y carga son las mismas). En cuanto a limitaciones propias del modelo destaca la simulación de sobrecargas ya que solo se pueden simular tensiones de hasta el doble de la nominal definida [6], [29].

El modelo analizado ha demostrado, en varias investigaciones, su fiabilidad para simular del funcionamiento de varias tecnologías de baterías, con un error inferior al 5% [6], [28], [30]. Por lo que se puede concluir que se trata de un modelo muy completo para la simulación y análisis de sistemas de almacenamiento de energía, de forma rápida, sin necesidad de equipos y experimentos costosos y difíciles de realizar, a pesar de las limitaciones que presenta por las suposiciones realizadas y a los efectos que no considera.

5.2.- Parámetros de entrada del modelo.

El modelo de batería de MATLAB/Simulink® requiere que se introduzcan una serie de parámetros a partir de los cuales se modela el comportamiento de la misma. Es importante que estos parámetros sean ajustados correctamente para lograr que la simulación se aproxime lo mejor posible a la realidad.

Los parámetros de entrada del modelo se pueden obtener de la hoja de características de la batería y de su curva de descarga a corriente nominal, aunque en muchas ocasiones los fabricantes no brindan la información necesaria para realizar el ajuste de forma correcta. En estos casos el ajuste del modelo se puede mejorar o completar con curvas reales obtenidas de forma experimental, lo que permite la obtención de resultados más fiables.

5.2.1.- Parámetros generales.

La primera ventana de parámetros a configurar en el modelo de baterías de MATLAB/Simulink® se titula *Parameters* y permite definir el tipo de tecnología que se quiere modelar, así como la posibilidad de poder activar los submodelos de temperatura y envejecimiento en el caso de que la tecnología seleccionada sea de litio-ion. Además, en esta ventana se requieren una serie de parámetros característicos de cada batería en concreto como su tensión nominal, capacidad nominal y el estado de carga en el momento de iniciar la simulación. También brinda la posibilidad de utilizar una serie de configuraciones de baterías de litio-ion cuyos parámetros se encuentran predeterminados dentro del propio modelo. En la Figura 20 se pueden observar los parámetros generales requeridos por el modelo en la pestaña *Parameters*.

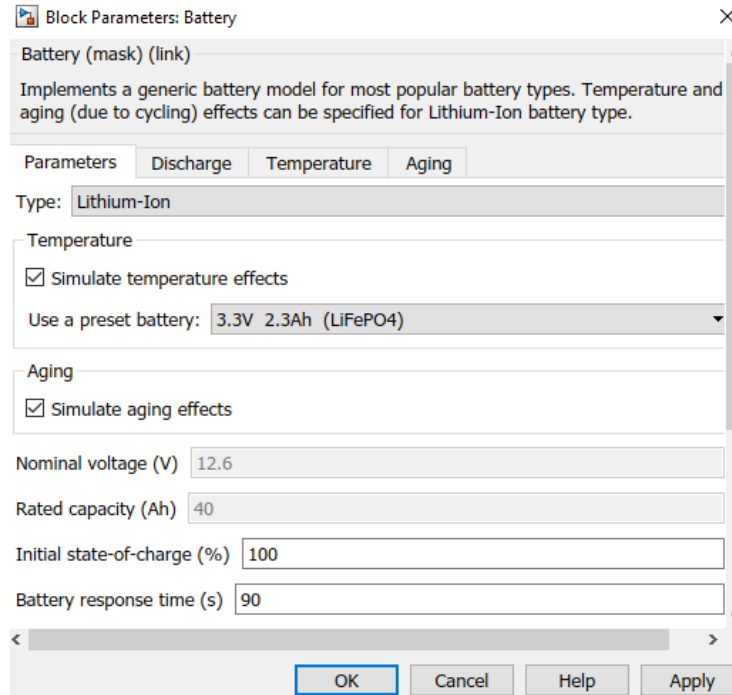


Figura 20: Configuración de la pestaña de parámetros generales.

A continuación, se explica cómo configurar cada uno de los parámetros mostrados en la Figura 20:

Type: es un desplegable que permite seleccionar entre diferentes tecnologías de baterías: Plomo-ácido, Litio-Ion, Níquel-Cadmio o Níquel-Metal-Hidruro. Esto hará que el modelo ejecute las ecuaciones que describen el comportamiento de la tecnología escogida. Para el caso en que se seleccione el tipo de baterías de litio-ion, el bloque proporciona la posibilidad de elegir si se quieren simular los efectos de temperatura y envejecimiento.

Simulate temperatura effect: al marcar esta opción dentro del bloque *Temperature*, la pestaña donde se configuran los parámetros del modelo de temperatura se vuelve visible y el puerto de entrada T_a se hace visible para suministrar la temperatura ambiente.

Simulate aging effects: al marcar esta opción dentro del bloque *Aging*, la pestaña donde se configuran los parámetros del modelo de envejecimiento se vuelve visible.

Use a preset battery: es un desplegable que contiene una lista de 10 modelos de baterías de litio-ion configurados para modelar los efectos de la temperatura y las características de la curva de descarga. Se puede elegir una de estas configuraciones predeterminadas, en cuyo caso, los parámetros de la pestaña temperatura no se podrán modificar. El valor predeterminado de esta opción es "No". Este desplegable sólo está disponible si el parámetro *Type* está configurado en litio-ion y seleccionada la opción *Simulate Temperature effects*.

Nominal voltage: es el valor de la tensión nominal al final de la zona lineal de la curva de descarga de la batería (V_{nom}), tal y como se puede observar en la Figura 12, en Voltios (V).

Rated capacity: es el valor de la capacidad nominal dado por el fabricante en la hoja de característica de la batería, en Amperios-hora (Ah).

Initial State of charge: indica el estado inicial de carga (SOC) de la batería, en tanto por ciento (%). Un SOC del 100% indica una batería completamente cargada y el 0% indica una batería completamente descargada.

Battery response time: indica el tiempo que tardan las reacciones químicas en activarse cuando la batería es cargada o descargada partiendo del reposo y representa la dinámica de la tensión, en segundos (s).

5.2.1.- Parámetros para el ajuste de la curva de descarga.

La segunda ventana de parámetros a configurar en el modelo de baterías de MATLAB/Simulink® se titula *Discharge* y permite ajustar la dinámica de carga/descarga a partir de los valores de tensión y capacidad que delimitan las tres zonas fundamentales de la curva de descarga de la batería objeto de estudio, como se explicó en el epígrafe 5.1.-. Esta curva de descarga a la corriente nominal se puede obtener de la hoja de características brindada por el fabricante o de los resultados de los ensayos reales obtenidos mediante experimentación en el laboratorio. En este último caso se consigue un mejor ajuste del modelo ya que en ocasiones las curvas brindadas por los fabricantes, por motivos comerciales, no se ajustan de manera precisa a la realidad. En la Figura 21 se pueden observar los parámetros requeridos por el modelo en la pestaña *Discharge*.

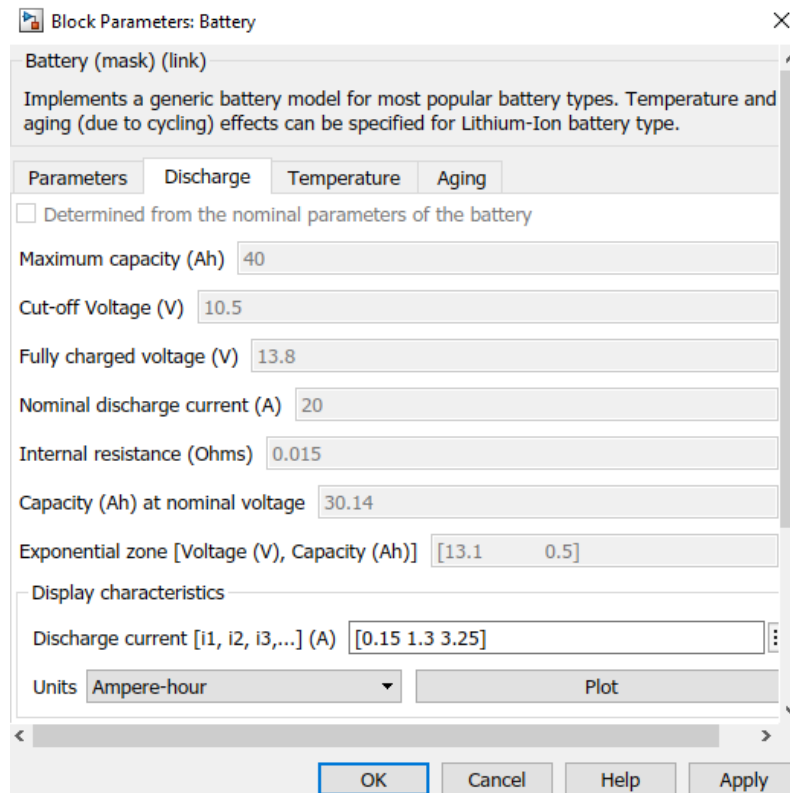


Figura 21: Configuración de la pestaña de parámetros de la curva de descarga.

A continuación, se realiza un resumen de cómo configurar cada uno de los parámetros mostrados en la Figura 21:

Determined from the nominal parameters of the battery: al marcar esta opción el resto de parámetros de esta pestaña se ajusta a partir de los valores introducidos en la ventana “Parameters”. En el caso de haber elegido una de las baterías predeterminadas no se podrán modificar los parámetros establecidos por defecto para el ajuste de la curva de descarga.

Maximum Capacity: es la capacidad que se puede descargar de la batería plenamente cargada hasta llegar a su tensión mínima y se recomienda un valor igual al 105% de la capacidad nominal (Q_{max}), en Amperios (Ah), como se puede observar en la Figura 12.

Cut off Voltage: representa la tensión al final de la curva de descarga, en Voltios (V). Cuando la tensión de la batería es la tensión de corte, se considera que se encuentra totalmente descargada.

Fully Charged Voltage: es la tensión a plena carga en reposo (V_{full}), en Voltios (V), como se puede observar en la Figura 12.

Nominal Discharge current: es el valor de corriente para la que se define la capacidad nominal, en Amperios (A).

Internal resistance: es la resistencia interna de la batería en ohmios (Ω). Cuando se utiliza un modelo preestablecido se carga un valor genérico de resistencia interna, que corresponde al 1% de la potencia nominal (tensión nominal multiplicada por la capacidad nominal de la batería).

Capacity at nominal voltage: indica la capacidad (Q_{nom}) que se tiene que descargar a partir de la batería completamente cargada para llegar a la tensión nominal, en Amperios-hora (Ah), tal y como se puede observar en la Figura 12.

Exponential zone [Voltage, Capacity]: se define con los valores de la tensión y la capacidad correspondiente al final de la zona exponencial, V_{exp} y Q_{exp} , en Voltios (V) y en Amperios-hora (Ah), tal y como se puede observar en la Figura 12.

Discharge current [i1, i2, i3, ...]: permite especificar diferentes valores de corriente de descarga para mostrar gráficamente varias curvas de descarga de la batería en la parte inferior del gráfico que se obtiene mediante el botón *Plot*.

Plot: permite trazar dos gráficos, el primero representa la curva de descarga a la corriente de descarga nominal y el segundo representa las curvas de descarga a las corrientes de descarga especificadas, como se puede observar en la Figura 22.

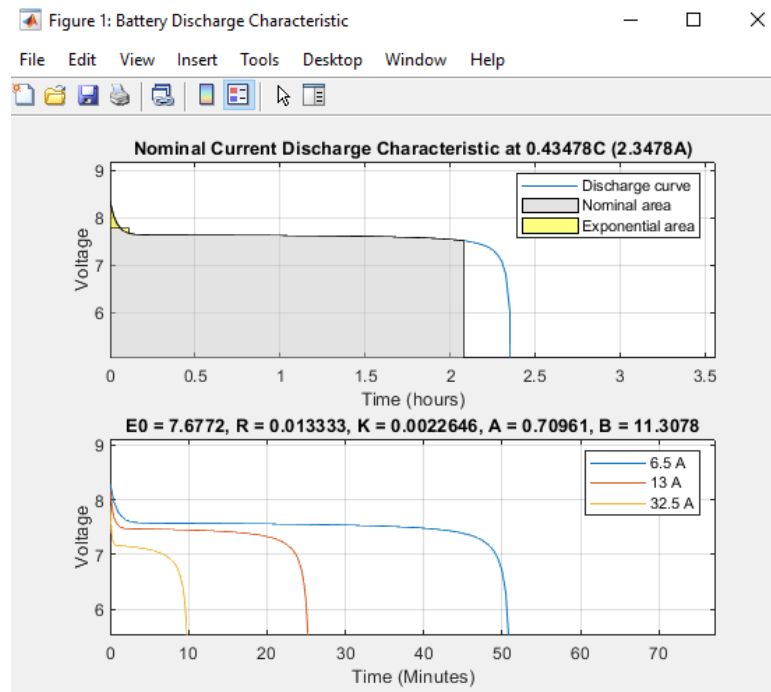


Figura 22: Gráficos trazados por el botón *Plot*.

Units: el desplegable permite seleccionar las unidades del eje X en la previsualización gráfica de la curva de descarga de la batería que se obtiene mediante el *Plot*. Se puede elegir entre mostrar el tiempo (predeterminado) o la capacidad descargada, en Amperios-hora (Ah).

5.2.2.- Parámetros del modelo de temperatura.

La tercera ventana de parámetros a configurar en el modelo de baterías de MATLAB/Simulink® se titula *Temperature* y permite simular el efecto de los cambios de temperatura ambiente y de temperatura interna en el comportamiento de las baterías de litio-ion. Para ajustar el modelo de temperatura se requiere una curva de descarga adicional a una segunda temperatura de funcionamiento, diferente de la temperatura nominal, además de algunos parámetros de la respuesta térmica de la batería durante los procesos de carga y descarga.

La curva de descarga y parámetros térmicos adicionales generalmente no se proporcionan en la hoja de características de la batería y pueden requerir la realización de experimentos simples para su obtención. En la Figura 23 se muestran los parámetros que permiten ajustar el modelo de temperatura.

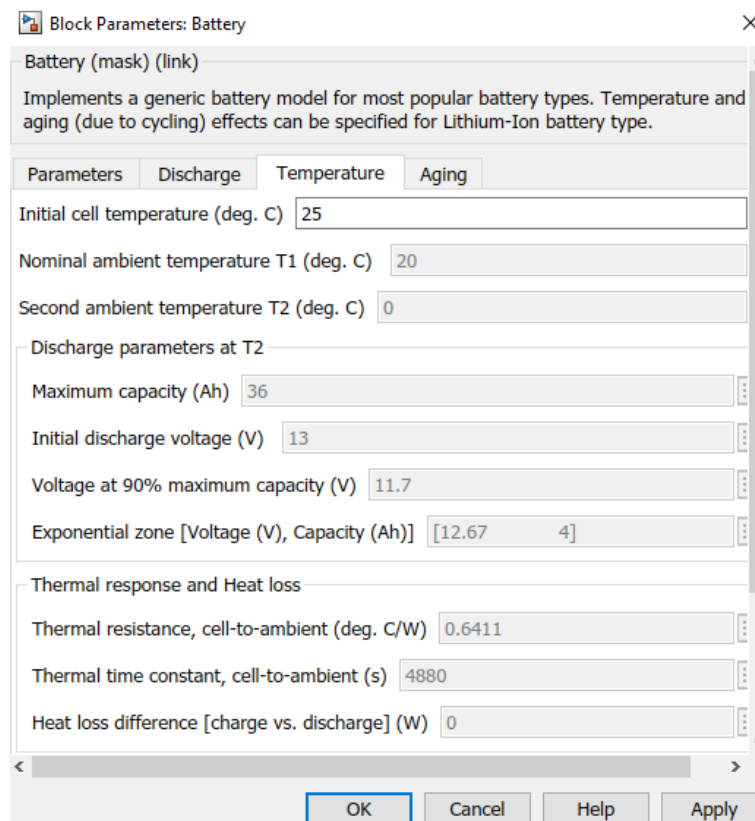


Figura 23: Configuración de la pestaña de parámetros del modelo de temperatura.

A continuación, se realiza un resumen de cómo configurar cada uno de los parámetros mostrados en la Figura 23:

Initial cell temperature: es la temperatura inicial de la batería, en Grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Nominal ambient temperature T1: es la temperatura a la que se dan las características de la ventana “Discharge”, en Grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Second ambient temperature T2: es la temperatura de la celda en una segunda condición de funcionamiento, preferiblemente por debajo de la temperatura ambiente nominal, en Grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

A la segunda temperatura de funcionamiento es necesario aportar una serie de parámetros, los cuales se explican a continuación:

Maximum capacity: es la capacidad máxima de la batería, en Amperios-hora (Ah).

Initial discharge voltaje: es la tensión a plena carga a la segunda temperatura de funcionamiento, en Voltios (V).

Voltage at 90% maximum capacity: es el valor de tensión cuando la batería se ha descargado un 90% de la capacidad máxima, en Voltios (V).

Exponential zone [Voltage,Capacity]: son los valores de tensión y capacidad correspondiente al final de la zona exponencial, en Voltios (V) y Amperios-hora (Ah) respectivamente, como se explicó en el epígrafe 5.2.1.-.

Además, es necesario introducir otros parámetros de la respuesta térmica de la batería durante la descarga, los cuales se explican a continuación:

Thermal resistance, cell-to-ambient: es la resistencia térmica entre la celda y el ambiente, en (Grados Celsius/Vatios) ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$).

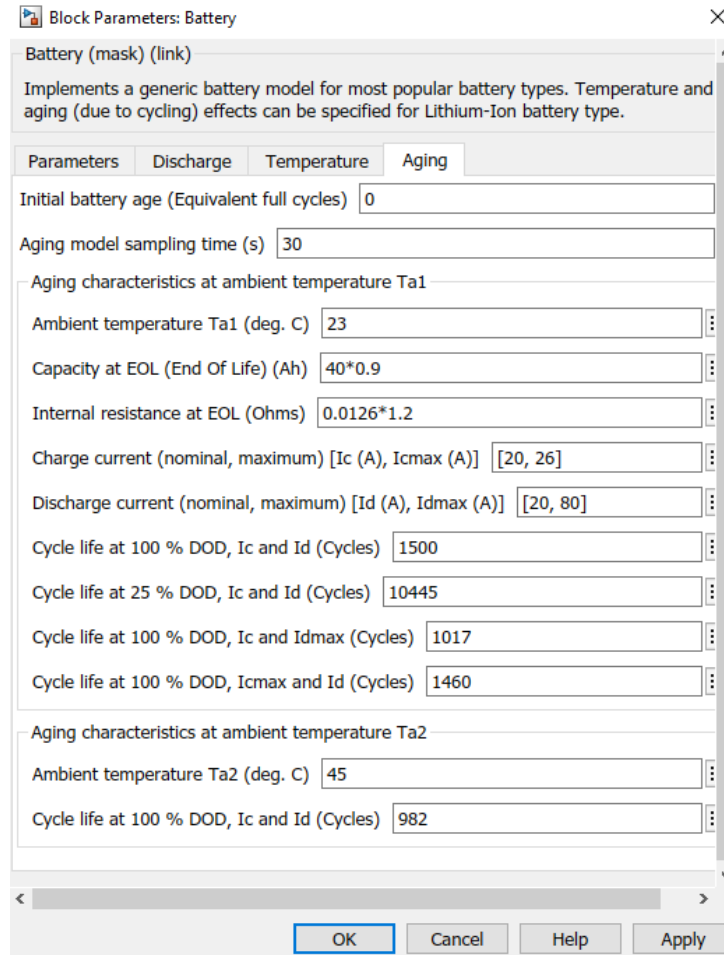
Thermal time constant, cell-to-ambient: indica la respuesta de la temperatura entre la celda y el ambiente, en segundos (s).

Heat loss difference [charge vs. discharge]: es la diferencia de pérdida de calor entre carga y descarga, cuando la batería se carga y descarga a la misma razón C y temperatura ambiente, en Vatios (W).

5.2.3.- Parámetros del modelo de envejecimiento.

La cuarta ventana de parámetros a configurar en el modelo de baterías de MATLAB/Simulink® se titula *Aging* y permite simular el efecto del envejecimiento por ciclado

en la capacidad y la resistencia interna de las baterías de litio-ion. En la Figura 24 se muestran los parámetros que permiten ajustar el modelo de envejecimiento.



Block Parameters: Battery

Battery (mask) (link)

Implements a generic battery model for most popular battery types. Temperature and aging (due to cycling) effects can be specified for Lithium-Ion battery type.

Parameters Discharge Temperature Aging

Initial battery age (Equivalent full cycles) 0

Aging model sampling time (s) 30

Aging characteristics at ambient temperature Ta1

Ambient temperature Ta1 (deg. C) 23

Capacity at EOL (End Of Life) (Ah) 40*0.9

Internal resistance at EOL (Ohms) 0.0126*1.2

Charge current (nominal, maximum) [Ic (A), Icmx (A)] [20, 26]

Discharge current (nominal, maximum) [Id (A), Idmax (A)] [20, 80]

Cycle life at 100 % DOD, Ic and Id (Cycles) 1500

Cycle life at 25 % DOD, Ic and Id (Cycles) 10445

Cycle life at 100 % DOD, Ic and Idmax (Cycles) 1017

Cycle life at 100 % DOD, Icmx and Id (Cycles) 1460

Aging characteristics at ambient temperature Ta2

Ambient temperature Ta2 (deg. C) 45

Cycle life at 100 % DOD, Ic and Id (Cycles) 982

OK Cancel Help Apply

Figura 24: Configuración de la pestaña de parámetros del modelo de envejecimiento.

A continuación, se realiza un resumen de cómo configurar cada uno de los parámetros mostrados en la Figura 24:

Initial battery age (Equivalent full cycles): es la edad de la batería expresada en ciclos completos de carga/descarga, teniendo en cuenta que un ciclo completo se define como una descarga y carga completas a 100% de DOD, a una temperatura ambiente nominal y a una corriente nominal de descarga y carga.

Aging model sampling time: es el paso de tiempo de simulación del modelo de envejecimiento, en segundos (s).

A continuación, hay que introducir una serie de parámetros a dos temperaturas de funcionamiento diferente. A la primera temperatura de funcionamiento se requieren los parámetros que se explican a continuación:

Ambient temperature Ta1: es la primera temperatura de funcionamiento de la batería a la que se dan los parámetros de envejecimiento de la celda, en Grados Celsius (°C).

Capacity at EOL (End Of Life): es la capacidad máxima al final de la vida útil de la batería, en Amperios-hora (Ah).

Internal resistance at EOL: es la resistencia interna al final de la vida útil de la batería, en ohmios (Ω).

Charge current (nominal, maximum) [Ic (A), Icmx (A)]: son las corrientes de carga nominal y máxima, en Amperios (A).

Discharge current (nominal, maximum) [Id (A), Idmx (A)]: son las corrientes de descarga nominal y máxima, en Amperios (A).

Cycle life at 100% DOD, Ic and Id: es el número de ciclos al 100% de DOD con corrientes de carga y descarga nominales.

Cycle life at 25% DOD, Ic and Id: es el número de ciclos al 25% de DOD con corrientes de carga y descarga nominales.

Cycle life at 100% DOD, Ic and Idmx: es el número de ciclos al 100% de DOD con corriente de carga nominal y corriente de descarga máxima.

Cycle life at 100 % DOD, Icmx and Id: es el número de ciclos al 100% de DOD con corriente de carga máxima y corriente de descarga nominal.

A la segunda temperatura de funcionamiento se requieren los parámetros que se explican a continuación:

Ambient temperature Ta2: es la segunda temperatura de funcionamiento, en Grados Celsius (°C), durante el ensayo de envejecimiento.

Cycle life at 100% DOD, Ic and Id: es el número de ciclos al 100% de DOD con corrientes de carga y descarga nominales.

5.3.- Conclusiones.

En este capítulo se ha realizado una descripción del modelo de baterías que brinda el programa MATLAB/Simulink®, comprobando que es un modelo robusto que permite la

simulación y el estudio del funcionamiento de diferentes tecnologías de baterías, sin la necesidad de equipos o ensayos costosos.

En este modelo, es necesario definir una serie de parámetros de entrada a partir de los cuales se simula el comportamiento de la batería. Del correcto ajuste de estos parámetros de entrada dependerá que los resultados de las simulaciones sean lo más realistas posible.

6.- Prácticas de laboratorio virtual.

El estudio del funcionamiento de los sistemas de almacenamiento y en especial de las baterías, en diferentes aplicaciones y bajo diferentes condiciones de trabajo, permite evaluar el rendimiento de las mismas a partir de los resultados obtenidos y evitar posibles fallos. Por este motivo, es de vital importancia disponer de herramientas que a nivel docente permitan transmitir a los estudiantes conocimiento sobre el funcionamiento de las distintas tecnologías de baterías y sus aplicaciones. El uso de herramientas informáticas como complemento a las clases teóricas y prácticas que se imparten en las aulas, permiten mejorar el proceso de formación de los alumnos de varias ramas de ingeniería. En varias asignaturas técnicas, se ha observado la imposibilidad de realizar prácticas de laboratorio que aborden ciertas materias, ya que requieren de equipos costosos o de mucho tiempo para poder observar los efectos deseados. Este es el caso de varias asignaturas de la rama de electrónica donde se abordan temas relacionados con el funcionamiento de las baterías. Una solución a esta problemática puede ser la realización de laboratorios virtuales, gracias a la existencia de varios programas, entre ellos MATLAB®, que brindan modelos capaces de simular de forma rápida y precisa, diferentes características del funcionamiento de las baterías en diferentes aplicaciones.

En este capítulo se propone el diseño de una serie de prácticas de laboratorio en ordenador, utilizando el modelo de baterías de MATLAB/Simulink® para simular diferentes condiciones de trabajo y observar su influencia en la respuesta de la batería, ajustando dicho modelo para baterías reales de las que se disponen en el laboratorio según el procedimiento descrito en el capítulo anterior. Estas prácticas permitirán el desarrollo de una serie de habilidades tales como: elaboración de razonamientos científicos, construcción e interpretación de gráficos, elaboración y evaluación de argumentos para el análisis de resultados, etc.

6.1.- PL#1: Diseño de un banco de ensayos virtual usando MATLAB/Simulink®.

El objetivo de esta práctica es familiarizar a los alumnos con el modelo de baterías de MATLAB/Simulink® y crear una estructura que simule un banco de ensayos que permita programar una serie de cargas y descargas de la misma forma en la se harían en los ensayos reales. También se observarán las diferencias en las curvas de carga/descarga de dos tecnologías de baterías de litio-ion (NMC y LFP) ajustadas en el modelo y se simularán conexiones en serie

y paralelo entre varias celdas. Para la realización de estas actividades se recordarán conceptos básicos relacionados con el campo de las baterías y se analizará la influencia de algunos de ellos en la respuesta de la misma.

El comportamiento de las baterías generalmente se evalúa a partir de curvas de tensión y capacidad obtenidas a partir de los procesos de carga y descarga bajo diferentes condiciones de funcionamiento. Para ello se necesitan equipos especializados (bancos de ensayos) que permitan simular las condiciones de trabajo requeridas. Los bancos de ensayos permiten la monitorización de parámetros de operación durante los procesos carga y descarga tales como: tensión, corriente, capacidad, temperatura ambiente, resistencia interna y temperatura de la batería.

En el caso del modelo de baterías presente en el programa MATLAB/Simulink®, es necesario la implementación de estructuras y funciones que permitan simular los procesos de carga/descarga bajo diferentes condiciones de trabajo, tal y como se realizarían en un banco de ensayos real. Para la implementación del banco de ensayos simulado, se parte de la creación de una estructura que permita realizar la descarga de la batería, a la cual se le van incorporando varias funciones y códigos de programación para simular la carga y varios estados de funcionamiento (reposo, carga a corriente constante, carga a tensión constante, descarga y fin de simulación), con el objetivo de simular un protocolo de ensayos similar a los realizados en los bancos de ensayos reales.

Para validar el banco de ensayos virtual creado durante esta práctica se realiza una comparativa entre los resultados de un protocolo simulado y los resultados obtenidos mediante los ensayos reales realizados a una celda de NMC en el equipo Arbin LBT-5V-30A (Figura 37), disponible en el Laboratorio de Baterías del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas de la Universidad de Oviedo.

Al inicio de la práctica será necesario realizar una explicación del funcionamiento del modelo y de cada uno de los parámetros necesarios para su configuración, tal y como se realizó en el capítulo 4 de este trabajo. Una vez que los alumnos están familiarizados con el modelo se propone la realización de las actividades descritas a continuación:

6.1.1.- Diseño de un banco de ensayos virtual. Etapas de carga y descarga.

Los procesos de carga y descarga permiten determinar parámetros importantes a partir de los cuales se evalúa el comportamiento de la batería ante una serie de condiciones de funcionamiento. Los bancos de ensayos permiten la realización de estos procesos, ya que incluyen etapas de potencia para cargar y descargar las baterías. Además, permiten el monitoreo y control de dichos procesos.

Para la creación de la etapa de potencia que permitirá la realización de la descarga de la batería en el banco de ensayos virtual, se parte de un análisis de las características fundamentales de dicho proceso. En la Figura 25 se pueden observar las tres zonas fundamentales de la curva de descarga típica de una batería.

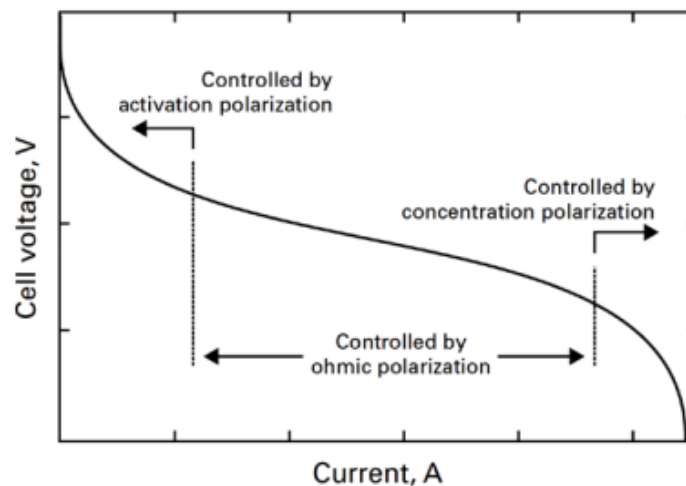


Figura 25: Curva de descarga típica de una batería. Fuente [6].

La primera zona de la curva se conoce como activación por polarización y la tensión en bornes de la batería evoluciona de forma exponencial. Por lo general, ocupa una zona muy pequeña de la curva de descarga y tiene su origen en los procesos químicos de activación de la propia batería. La segunda zona se conoce como óhmica o lineal y suele ocupar la mayor parte de la curva. En este tramo, la tensión continúa disminuyendo lentamente antes de alcanzar el valor nominal (V_{nom}), mostrado en la Figura 12. La tercera zona se denomina de caída libre de tensión, donde la tensión desciende abruptamente debido a la reducción de la concentración de iones en el cátodo. Este proceso ocurre cuando la batería está próxima a descargarse.

completamente y la polarización no es capaz de mantener la tensión entre los bornes de la celda [6].

Los procesos de carga y descarga se pueden realizar a diferentes velocidades o, en términos técnicos, a diferentes C-Rate. El índice C-Rate indica la rapidez con la que se está cargando o descargando una batería con relación a su capacidad nominal, independientemente del valor de ésta. Se suele utilizar en forma de múltiplos o fracciones, dependiendo de la corriente de carga o descarga de que se trate. Ejemplo: una batería de 2,5Ah de capacidad, la tasa de descarga C es equivalente a descargar la batería con una corriente de 2,5A y una tasa de descarga 0,5C equivale a descargar la batería con 1,25A.

En los procesos de descarga, un C-Rate alto provoca una descarga rápida de la batería, aumentando las pérdidas por la resistencia interna, lo que se traduce en una cantidad menor de energía que si se hubiese descargado la misma batería a un C-Rate menor [6].

En los bancos de ensayos, la etapa de potencia que realiza la descarga de la batería suele tener incorporados limitadores de tensión para evitar los problemas de seguridad que pueden ocasionar las descargas profundas. Estos dispositivos suelen desconectar la batería cuando la tensión o la corriente de la misma alcanza determinados valores fijados por el fabricante.

Con el objetivo de simular el proceso de descarga de una batería en el programa Matlab/Simulink® se crea la estructura mostrada en la Figura 26. Como se puede observar, dicha estructura está formada por una serie de bloques que permiten realizar la descarga de la batería mediante una fuente de corriente conectada en los terminales del modelo; cada uno de los bloques se puede obtener poniendo su nombre en el buscador de la librería de herramientas del propio Simulink® y arrastrándolo hasta el espacio de trabajo. A continuación, se realiza una descripción de cada uno de los bloques y de la función programada dentro de esta estructura.

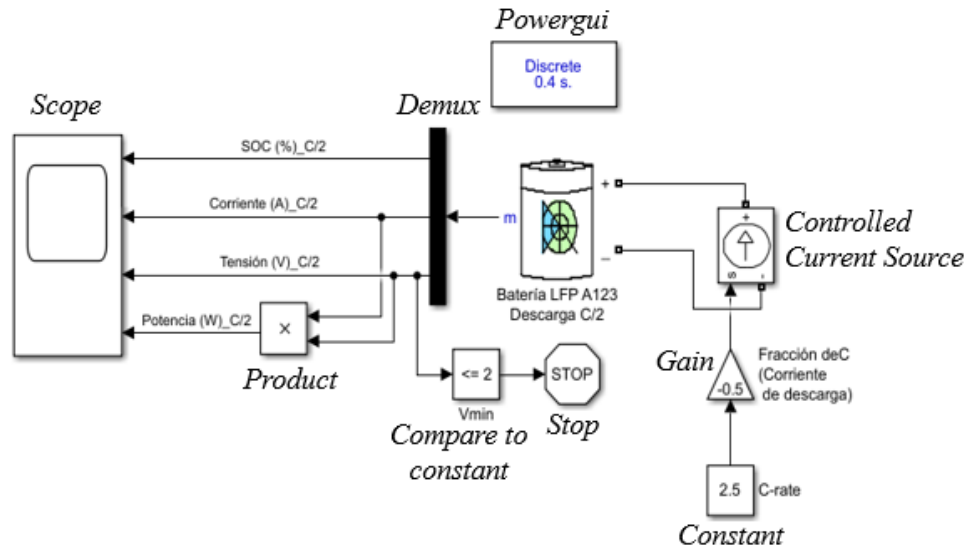


Figura 26: Estructura para simular el proceso de descarga de una batería.

El bloque *Powergui* es necesario para poder trabajar con los diferentes elementos de la librería *SimPowerSystems* (donde se encuentra el modelo de batería en cuestión) y poder resolver las ecuaciones de espacio estado del modelo, seleccionando uno de los siguientes métodos para resolver el circuito: continuo (utiliza pasos variables, generados por Simulink® para encontrar la solución), discretización del sistema eléctrico para una solución a pasos de tiempo fijos o solución fasorial.

El bloque *Controlled Current Source* genera una señal de corriente constante que simula la descarga de la batería, los terminales de esta fuente están conectados al modelo de baterías y como parámetros de entrada tiene un bloque *Constant* que indica la capacidad nominal de la batería, que se multiplicará por el bloque *Gain* que será la fracción del índice C-Rate a la que se quiere realizar la descarga.

La descarga de la batería se realizará hasta que la tensión a la salida del modelo tome un valor menor que la tensión de corte fijada por el fabricante en la hoja de características. Esta condición de fin de descarga se implementa con el bloque *Compare to constant* (que compara con la tensión de corte) y el bloque *Stop* detendrá la simulación si la tensión llega al valor de corte.

Por último, el bloque *Demux* permite separar las diferentes señales de salida del bus *m* del modelo y el bloque *Scope* permite observar gráficamente cada una de esas señales de salida del modelo. La potencia a la salida de la batería se obtiene mediante un bloque *Product* al que entran las señales de tensión y corriente a la salida del modelo.

A continuación, se propone la realización de una simulación que permitirá observar la respuesta de la batería de LFP ANR26650M1-B del fabricante A123 SYSTEMS cuando se descarga a diferentes razones de C ($C/2$, C, 4C), lo que permitirá comprobar el funcionamiento de la estructura creada con anterioridad. El modelo de baterías se parametriza a partir de los datos extraídos de la hoja de características brindada por el fabricante y de la curva de descarga a la corriente nominal de 0.5C del Anexo 1-a). Para este análisis solo se trabaja con el modelo de descarga. Además, no se activan las casillas que permiten tener en cuenta la influencia de la temperatura y el envejecimiento porque no son objeto de estudio en esta primera práctica. En la Figura 27 se pueden observar los parámetros de entrada establecidos en el modelo de baterías. Como se puede apreciar se trabaja con dos pestañas distintas, una de parámetros generales donde se define la tecnología de batería, la tensión nominal, la capacidad nominal especificada por el fabricante, el estado de carga inicial, etc; y otra donde se establecen valores típicos de la curva de descarga de la batería en cuestión, tal y como se explicó en el epígrafe 5.2.-.

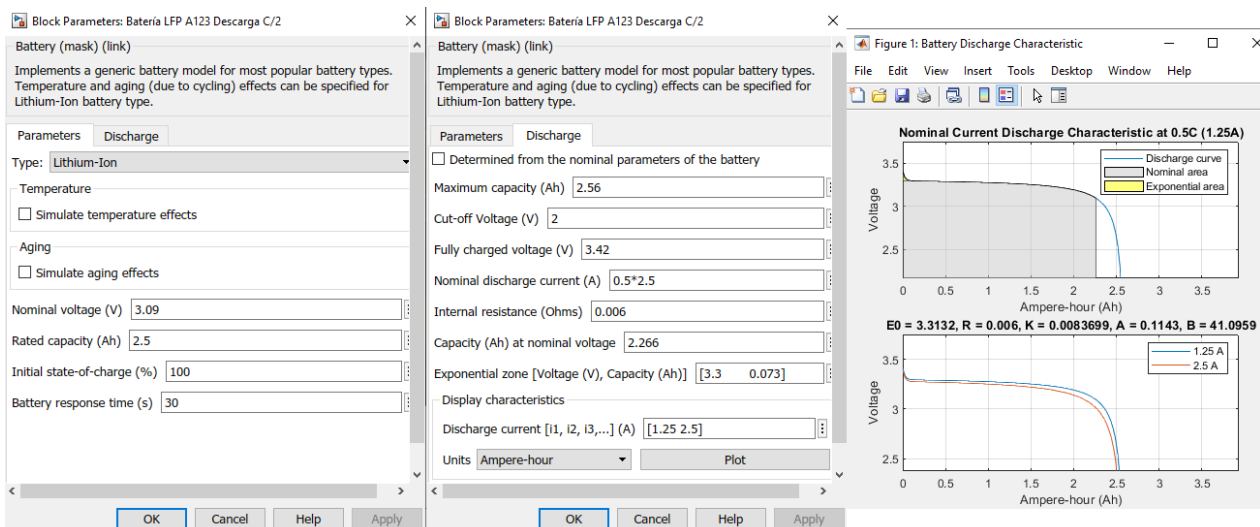


Figura 27: Parámetros de entrada al modelo para la batería LFP ANR26650M1-B.

Una de las características importantes en un banco de ensayos de baterías es poder observar la evolución de los parámetros de salida de la batería: tensión, corriente, capacidad, temperatura, etc. Por tal motivo, es de especial relevancia poder observar cada una de las variables de salida del modelo en una gráfica de forma independiente. Para ello, en el bloque *Scope* se selecciona la pestaña *View/Layout* y se escogen 4 casillas que son las salidas del modelo en este caso (SOC, Corriente, Tensión y Potencia). Además, dado que se pretende utilizar la misma estructura para simular la descarga de la batería a diferentes corrientes, es necesario

guardar los resultados obtenidos después de cada simulación para su posterior análisis y comparación, para ello, dentro del propio bloque *Scope* se va a la pestaña *Configuration Properties/Logging*, se marca la opción *Log data to workspace* y se le asigna un nombre al conjunto de variables de salida del modelo, tal y como se muestra en la Figura 28. A la simulación de descarga a la razón de corriente de C/2 se le ha asignado el nombre DescargaC2, esta operación se realizará para cada una de las razones de corriente a las que se quiere realizar la simulación.

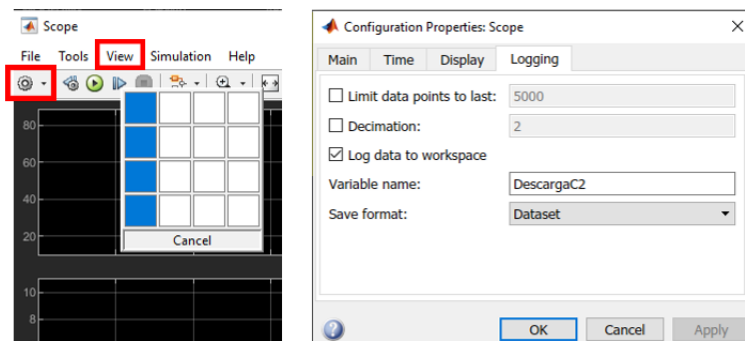


Figura 28: Configuración del bloque Scope.

Cada vez que se simula un proceso de descarga a una razón de corriente diferente se abre la aplicación *Data Inspector* cuya funcionalidad es la de importar las variables de salida del modelo guardadas con anterioridad, lo que brinda la posibilidad de visualizar y comparar las variables de salida de diferentes simulaciones. Dicha aplicación, es accesible a través del menú principal del entorno de trabajo de Simulink®, como se muestra en la Figura 29.

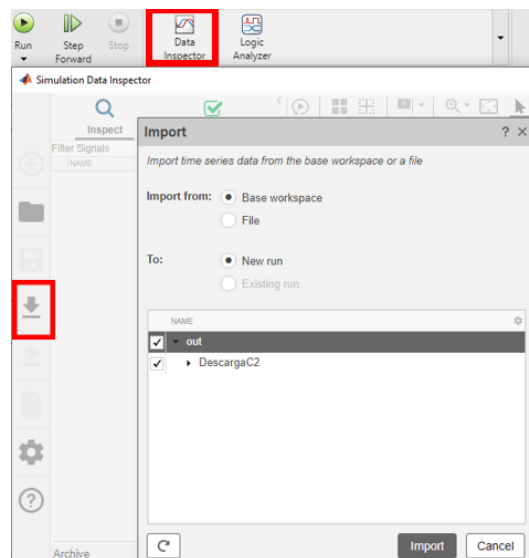


Figura 29: Data Inspector. Pestaña para importar variables de salida del modelo.

Al confirmar la opción de importar la variable de salida deseada, se abre una ventana donde se puede ver cada una de las mediciones que contiene dicha variable, lo que permite elegir el parámetro que se quiera representar gráficamente contra el tiempo, en segundos, en el eje de las x. Con *click* derecho sobre la línea se puede cambiar el color con que se quiere representar los parámetros de salida del modelo para cada una de las variables que se quiera analizar, como se muestra en la Figura 30.

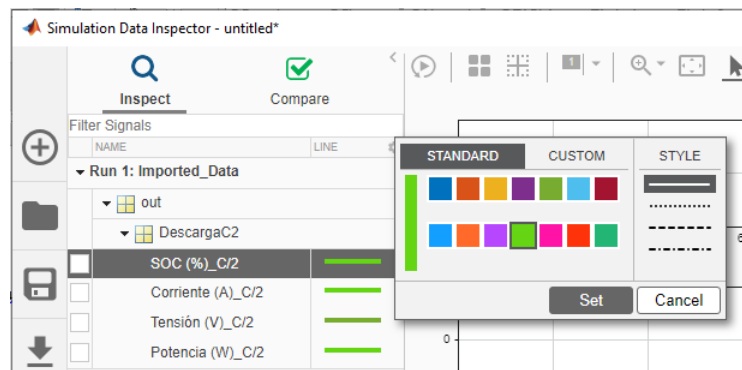


Figura 30: Data Inspector. Pestaña de selección de variables de salida del modelo.

El procedimiento descrito con anterioridad se realiza, también, para simular la curva de descarga de la batería a las razones de corriente C y 4C. Los resultados obtenidos muestran en la Figura 31.

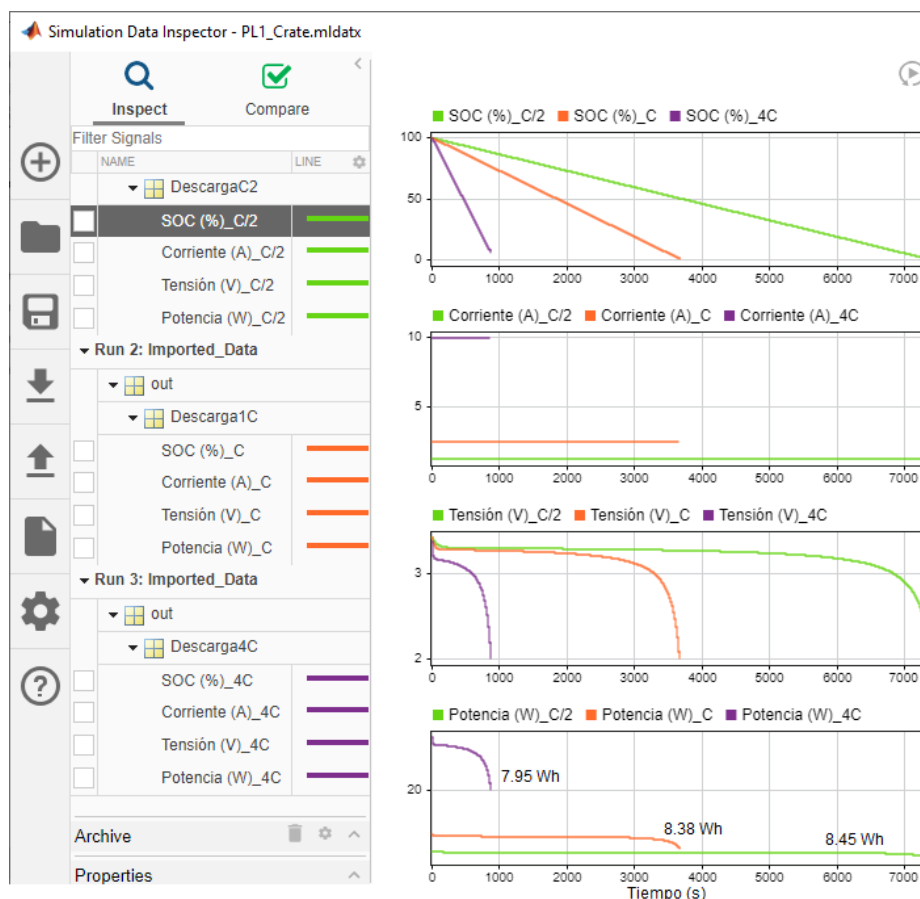


Figura 31: Curvas de descarga a C/2, C y 4C para la batería LFP ANR26650M1-B.

Como se puede observar en la Figura 31, a corrientes de descarga más bajas la evolución del perfil de tensiones de la batería es más alto. A la razón de 4C se puede observar que la batería se descarga rápidamente y la curva de tensión es mucho más baja que en el resto de razones, lo que provoca que se necesiten más celdas conectadas en serie cuando se trabaje en aplicaciones donde la corriente de descarga sea elevada. También se puede concluir que la energía obtenida es mayor cuanto más lenta sea la descarga, es decir, con razones de C bajas. Por contrapartida, cuanto más rápida es la descarga (razones de C altas) menor energía puede proporcionar la batería, hasta alcanzar la tensión mínima prefijada.

Otra etapa de potencia importante en un banco de ensayos es la carga de la batería. Para incorporar esta etapa al banco de ensayos virtual se parte de un análisis del método de carga más recomendado en la bibliografía especializada para las baterías de litio-ion.

El método más recomendado por los fabricantes para realizar el proceso de carga de una batería es el conocido como corriente constante - tensión constante (CC-CV), como se muestra en la Figura 32. Consiste en aplicar una corriente de carga constante hasta que la batería alcanza

el valor de tensión máximo fijado en su hoja de características. Una vez que se ha alcanzado el valor de tensión máximo, se mantiene ese valor de forma constante (se mantiene la batería en flotación), lo que provoca que la corriente de carga comience a disminuir hasta un valor cercano a cero. La carga termina cuando el valor de la corriente llegue al valor mínimo fijado en la hoja de características del fabricante. Al término de esta etapa, se considera que la batería está completamente cargada.

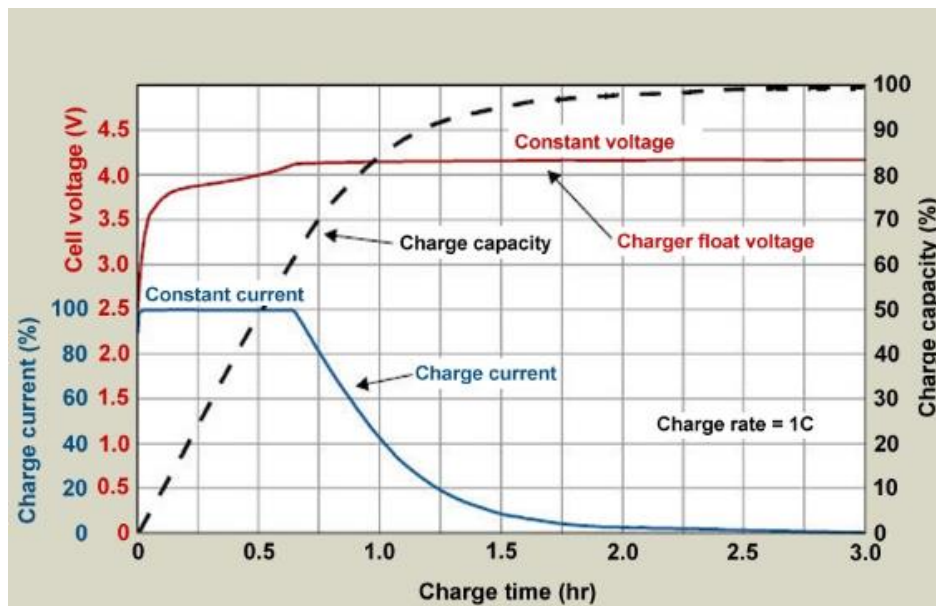


Figura 32: Curva de carga típica de una batería. Método CC-CV. Fuente [31].

Después de haber explicado los procesos fundamentales que tienen lugar en el estudio de los sistemas de almacenamiento y en este caso específico, las baterías, es decir los procesos de carga y descarga que se realizan mediante la utilización de bancos de ensayos, se propone la creación de una estructura que permita la simulación del proceso de carga y descarga de diferentes tecnologías de litio-ion.

Para incorporar esta etapa de carga al banco de ensayos virtual se parte de la estructura creada para realizar la descarga de la batería. La fuente de corriente encargada de realizar el proceso de descarga de la batería (bloque *Controlled Current Source*) también se utilizará para realizar la etapa de carga a corriente constante, mientras que para realizar la etapa de carga a tensión constante se agrega el bloque *Controlled Voltage Source* que permitirá mantener la batería en flotación hasta que se complete el proceso de carga. También se agrega el bloque *MATLAB Function*, en el que se implementan una serie de sentencias que permitirán cargar y descargar la batería, controlando las fuentes de tensión y corriente respectivamente.

Para conmutar entre las dos fuentes es necesario el bloque *Ideal Switch* que permitirá activar y desactivar la fuente de tensión encargada de realizar la etapa CV durante el método de carga CC-CV. En el parámetro *Snubber resistance Rs* de este último bloque se pone *inf* para que la corriente por el interruptor sea muy pequeña y no afecte el resultado de la simulación. Además, se incluye el bloque *Unit Delay* por necesidades de implementación del MATLAB® para poder inicializar los parámetros de entrada de la función *Cargador*. La estructura creada se muestra en la Figura 33.

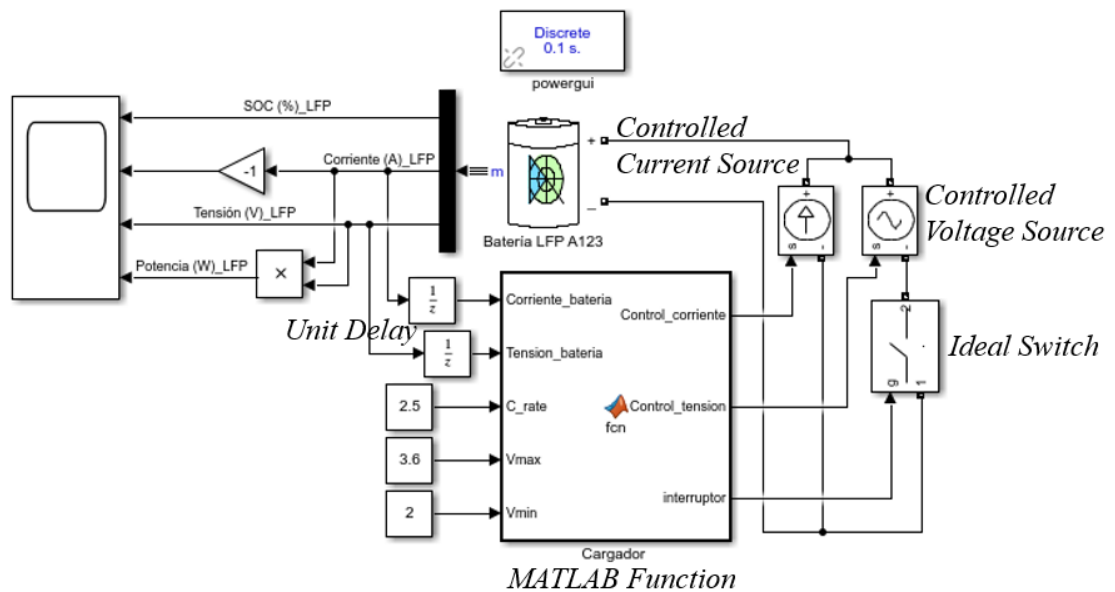


Figura 33: Estructura para simular los procesos de carga(CC-CV) – descarga de una batería.

La función creada en el bloque *MATLAB Function* es de gran importancia ya que constituye el eje principal del banco de ensayos virtual, permitiendo la realización de los procesos de carga/descarga mediante el control de las fuentes de tensión y de corriente, encargadas de establecer las corrientes o tensiones necesarias para realizar dichos procesos. Esta función se detalla a continuación:

```
function [Control_corriente,Control_tension,interruptor] = fcn(Corriente_bateria,Tension_bateria,C_rate,Vmax,Vmin)
```

//Con esta instrucción se crea la función que realiza el control de las fuentes de tensión o de corriente, dependiendo de la conmutación de interruptor. Esta función dependerá de varios parámetros de entrada como: la corriente y la tensión a la salida de la batería, el C-Rate, la tensión máxima y la tensión mínima de la batería.

```
coder.extrinsic('set_param')
```

//declara la función como una función extrínseca lo que permite que se ejecute con la simulación.

```
persistent puntero_carga; //es una variable que permitirá recorrer el vector de corriente de carga
```

```
if isempty(puntero_carga)
```

```
    puntero_carga=1;
```

```
end
```

```
persistent puntero_descarga; //es una variable que permitirá recorrer el vector de corriente de descarga
```

```
if isempty(puntero_descarga)
```

```
    puntero_descarga=1;
```

```
end
```

```
persistent puntero_estado; //es una variable que permitirá recorrer el vector de estado
```

```
if isempty(puntero_estado)
```

```
    puntero_estado=1;
```

```
end
```

//Se declaran una serie de variables de tipo persistente para que mantengan su valor al término de los bucles y se inicializan (Se les asigna a las variables punteros la condición de que inicialmente están vacías mediante la sentencia *isempty*).

```
vector_corriente_descarga=[C_rate/2];
```

```
vector_corriente_carga=[C_rate/2];
```

```
vector_estado=[2 3 1 4];
```

//Se crean los *vectores corriente de carga y corriente de descarga*, donde se pone la razón de C-rate a la que se quieren realizar dichos procesos. También se crea un *vector estado* donde el estado 2 es una carga a corriente constante (etapa CC), el estado 3 es una carga a tensión constante (etapa CV), el estado 1 es una descarga a corriente constante y el estado 4 permitirá detener la simulación.

```
if vector_estado(puntero_estado)==1
```

```
    interruptor=0;
```

```
    Control_tension=0;
```

```
    Control_corriente= -vector_corriente_descarga(puntero_descarga);
```

```
    if Tension_bateria <= Vmin
```

```
        puntero_estado=puntero_estado+1;
```

```
        puntero_descarga=puntero_descarga+1;
```

```
    end
```

//Se comprueba el valor del vector de estado al que indica la variable *puntero_estados*. Si el valor del vector de estados es igual a uno, la fuente de tensión se mantendrá desconectada (Control de tensión e interruptor a cero), mientras que la fuente de corriente realiza la descarga de la batería según el primer valor del vector de corriente de descarga. Si la tensión a la salida de la batería alcanza el valor de tensión mínimo establecido, termina la descarga y se incrementan los punteros de estado y de descarga para ir a la segunda posición de los vectores de estado y de corriente de descarga, respectivamente. En caso de que el valor del vector de estado no fuera uno, se pasa a la siguiente instrucción.

```
elseif vector_estado(puntero_estado)==2
    interruptor=0;
    Control_tension=0;
    Control_corriente=vector_corriente_carga(puntero_carga);
    if Tension_bateria >= Vmax
        puntero_estado=puntero_estado+1;
        puntero_carga=puntero_carga+1;
    end
```

//Se comprueba el valor del vector de estado al que indica la variable *puntero_estados*. Si el valor del vector de estados es igual a dos, la fuente de tensión se mantendrá desconectada (Control de tensión e interruptor a cero), mientras que la fuente de corriente realiza la carga de la batería según el primer valor del vector de corriente de carga. Si la tensión a la salida de la batería alcanza el valor de tensión máximo establecido, termina la carga y se incrementan los punteros de estado y de carga para ir a la segunda posición de los vectores de estado y de corriente de carga, respectivamente. En caso de que el valor del vector de estado no fuera dos, se pasa a la siguiente instrucción.

```
elseif vector_estado(puntero_estado)==3
    interruptor=1;
    Control_tension=Vmax;
    Control_corriente=0;
    if (-Corriente_bateria <= 0.04*C_rate) && (Corriente_bateria ~ = 0)
        puntero_estado=puntero_estado+1;
        interruptor=0;
    end
```

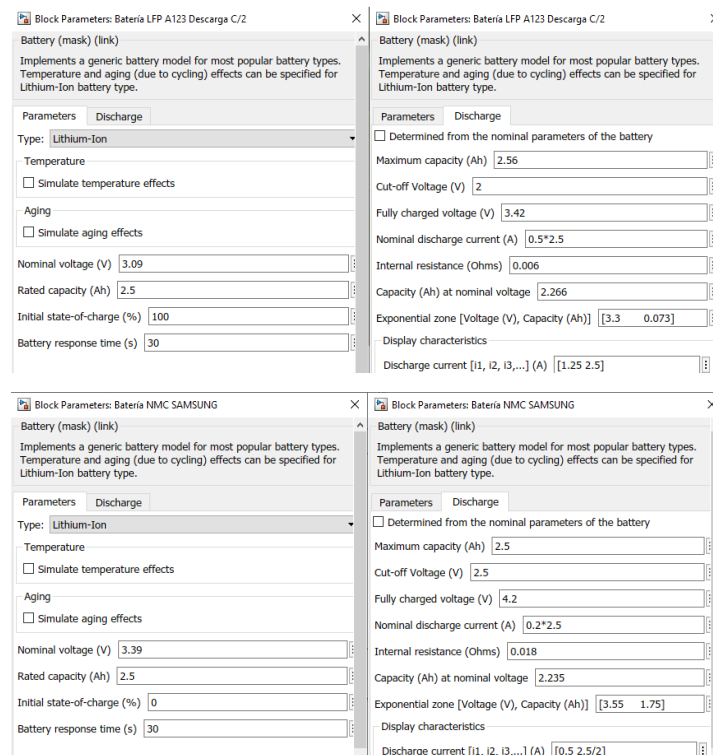
//Se comprueba el valor del vector de estado al que indica la variable *puntero_estados*. Si el valor del vector de estados es igual a tres, la fuente de tensión se activa fijando el valor de la tensión máxima y se desconecta la fuente de corriente (Control de corriente a cero e interruptor a uno). Si la corriente de carga a la salida de la batería alcanza el valor mínimo establecido por el fabricante en la hoja de características o está muy próxima a cero, termina la carga a tensión constante y se incrementa el puntero de estado. En caso de que el valor del vector de estado no fuera tres, se pasa a la siguiente instrucción.

```
elseif vector_estado(puntero_estado)==4
    set_param('PL1_CargaCCCV_Descarga', 'SimulationCommand', 'stop')
    interruptor=0;
    Control_tension=0;
    Control_corriente=0;
else
    interruptor=0;
    Control_tension=0;
    Control_corriente=0;
end
end
```

//Se comprueba el valor del vector de estado al que indica la variable *puntero_estados*. Si el valor del vector de estados es igual a cuatro, todas las variables de salida de la función se ponen a cero y se detiene la simulación.

A continuación, se propone la realización de una simulación que permitirá comprobar el funcionamiento de las etapas de carga y descarga por las que se conforma el banco de ensayos virtual creado mediante la estructura explicada con anterioridad. Para ello, se simulan dos tecnologías diferentes de litio-ion, la batería de LFP ANR26650M1-B del fabricante A123 SYSTEMS y la batería NMC SAMSUNG INR18650-25R cuando se carga y descarga a la razón de C/2.

El ajuste de parámetros de entrada del modelo para la tecnología de baterías de LFP es el mostrado en la Figura 27 y la batería de NMC SAMSUNG INR18650-25R se parametriza a partir de los datos extraídos de su hoja de características y de la curva de descarga a corriente nominal del Anexo 1-b). Los parámetros de entrada al modelo para cada una de las tecnologías de baterías mencionadas con anterioridad, se detallan a continuación en la Figura 34.



The figure displays four screenshots of battery parameter configuration windows, arranged in a 2x2 grid. Each window is titled 'Block Parameters: Batería [Technology] A123 Descarga C/2' or 'Block Parameters: Batería NMC SAMSUNG'. The windows are organized into two main tabs: 'Parameters' and 'Discharge'. The 'Parameters' tab is active in all four windows. Each window contains a 'Type' dropdown menu set to 'Lithium-Ion'. The 'Parameters' tab includes sections for 'Temperature' (with a checkbox for 'Simulate temperature effects'), 'Aging' (with a checkbox for 'Simulate aging effects'), and a list of numerical parameters: 'Nominal voltage (V)', 'Rated capacity (Ah)', 'Initial state-of-charge (%)', and 'Battery response time (s)'. The 'Discharge' tab includes a checkbox for 'Determined from the nominal parameters of the battery' and a list of numerical parameters: 'Maximum capacity (Ah)', 'Cut-off Voltage (V)', 'Fully charged voltage (V)', 'Nominal discharge current (A)', 'Internal resistance (Ohms)', 'Capacity (Ah) at nominal voltage', 'Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]', 'Display characteristics', and 'Discharge current [I1, I2, I3,...] (A)'. The values for these parameters vary between the four battery types shown.

Parameter	Batería LFP A123 Descarga C/2	Batería LFP A123 Descarga C/2	Batería NMC SAMSUNG	Batería NMC SAMSUNG
Type	Lithium-Ion	Lithium-Ion	Lithium-Ion	Lithium-Ion
Nominal voltage (V)	3.09	3.09	3.39	3.39
Rated capacity (Ah)	2.5	2.5	2.5	2.5
Initial state-of-charge (%)	100	100	0	0
Battery response time (s)	30	30	30	30
Maximum capacity (Ah)	2.56	2.56	2.5	2.5
Cut-off Voltage (V)	2	2	2.5	2.5
Fully charged voltage (V)	3.42	3.42	4.2	4.2
Nominal discharge current (A)	0.5*2.5	0.5*2.5	0.2*2.5	0.2*2.5
Internal resistance (Ohms)	0.006	0.006	0.018	0.018
Capacity (Ah) at nominal voltage	2.266	2.266	2.235	2.235
Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]	[3.3 0.073]	[3.3 0.073]	[3.55 1.75]	[3.55 1.75]
Discharge current [I1, I2, I3,...] (A)	[1.25 2.5]	[1.25 2.5]	[0.5 2.5/2]	[0.5 2.5/2]

Figura 34: Parámetros de entrada al modelo para las baterías de LFP ANR26650M1-B y NMC SAMSUNG INR18650-25R.

Para comprobar que la función creada es capaz de simular de forma correcta el proceso de carga y descarga de una batería, se analiza en un primer momento, la respuesta obtenida con la simulación de la batería de LFP A123. En la Figura 35 se puede observar que la carga CC-CV se realiza de forma correcta. La batería se va cargando a corriente constante por lo que el valor de tensión va aumentando hasta que llega a su valor máximo, una vez alcanzado dicho valor se fija, provocando que la corriente comience a disminuir mientras la batería permanece en ese estado de flotación. Cuando la corriente alcanza un valor muy pequeño cercano a cero, en este caso C/25, termina el proceso de carga y comienza la descarga de la batería, en este caso ambos procesos se realizan a la razón de corriente C/2. Al inicio de la etapa de carga a tensión constante se puede observar un pico que se produce por la conmutación del interruptor al activar la fuente de tensión de la estructura creada en la Figura 33.

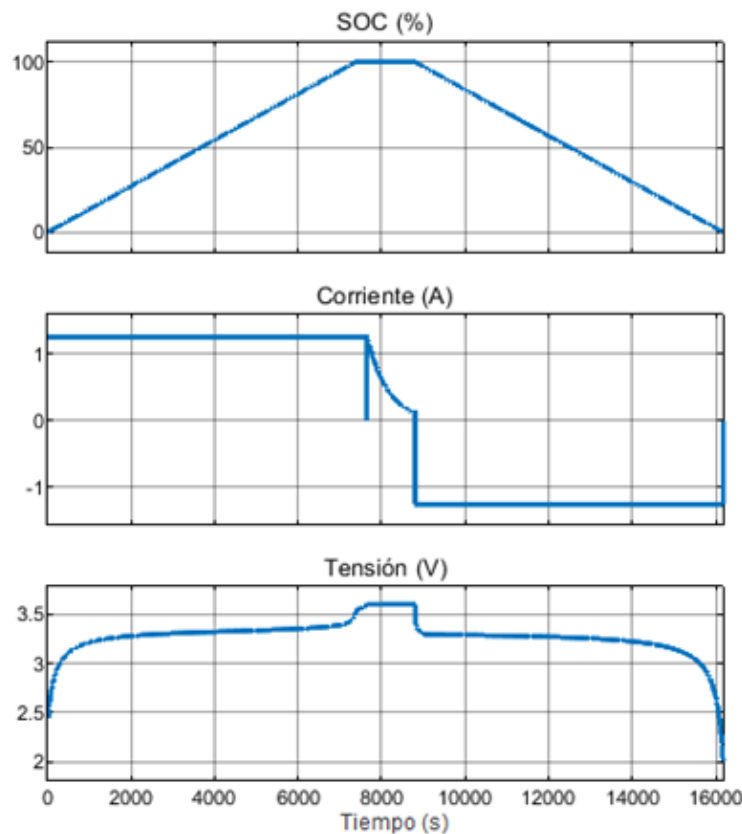


Figura 35: Proceso de carga/descarga de la batería de LFP A123.

También se realiza una comparación entre las curvas de carga/descarga obtenidas para las dos tecnologías diferentes de litio-ion (LFP ANR26650M1-B y NMC SAMSUNG INR18650-25R) ajustadas con anterioridad, con capacidades y corrientes de carga y descarga similares. En la Figura 36 se puede observar que a pesar de ser ambas tecnologías de litio-ion,

presentan características diferentes. La batería de NMC poseen un mayor valor de tensión por celda respecto a las baterías de LFP, además de un perfil de tensión con una gran zona exponencial y una casi inexistente zona lineal, mientras que el perfil de tensión de la curva de carga/descarga en el caso de la tecnología de LFP es más plano.

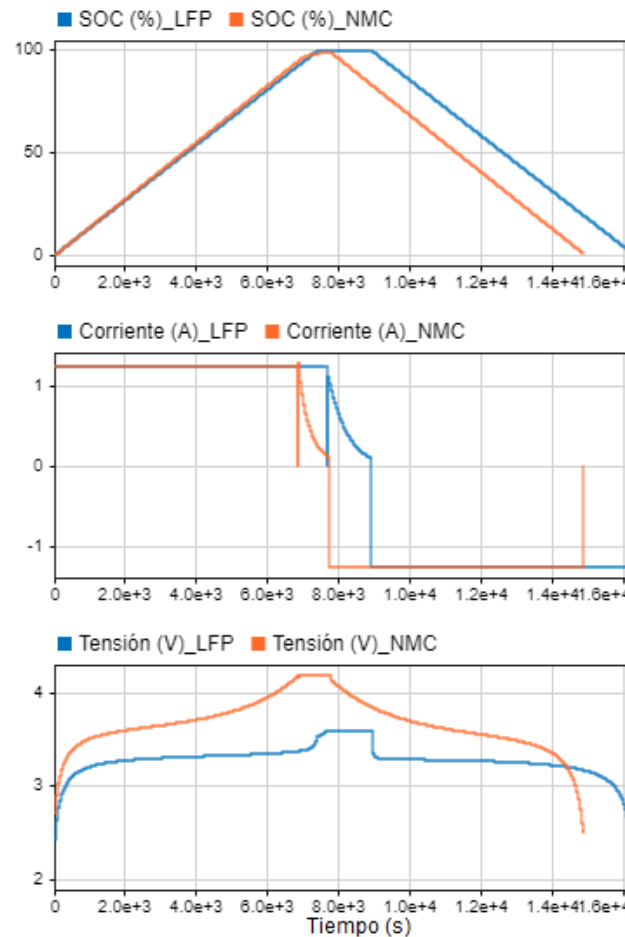


Figura 36: Comparación de la curva de carga/ descarga de dos tecnologías de baterías de litio-ion diferentes (LFP A123 y NMC SAMSUNG)

6.1.2.- Simulación de un protocolo de ensayos. Comparación con resultados reales.

En las investigaciones relacionadas con el campo de los sistemas de almacenamiento, y en especial las baterías, es de vital importancia estudiar su comportamiento ante una serie de condiciones de trabajo, por lo que se necesitan equipos especializados que permitan simular las condiciones requeridas, en entornos controlados y bajo monitorización permanente.

Los resultados de los ensayos permiten la detección de fallas a tiempo, proporcionando seguridad a los usuarios finales de las baterías como pueden ser en aplicaciones industriales, en vehículos eléctricos, etc. Los bancos de ensayos permiten la monitorización de parámetros de operación durante los procesos carga y descarga tales como: la tensión, la corriente, la temperatura ambiente, resistencia interna, el estado de salud o la temperatura de la batería.

Además del propio equipo especializado en la realización de los ensayos, es necesario la instalación y ajuste de todos los elementos electrónicos necesarios para la conexión de la batería al banco de ensayos, así como la programación del conjunto de operaciones que implementará el banco de ensayos sobre la batería a estudiar. Cada protocolo de ensayos dependerá de los procesos (carga/descarga) y condiciones de funcionamiento a los que se quiera someter la batería objeto de estudio. También dependerá de las propias características de la batería como los límites de seguridad y las recomendaciones establecida por los fabricantes en su hoja de características.

Como se puede observar en la Figura 37, dada la imposibilidad de poder realizar de forma práctica un ensayo real de baterías en el tiempo asignado a la asignatura de prácticas de laboratorio, se propone la implementación de un banco de ensayos virtual que sea capaz de simular un protocolo de ensayos como los reales, utilizando el modelo de baterías del MATLAB/Simulink® para simular el comportamiento de la batería. Además, se compararán los resultados obtenidos mediante la simulación y los ensayos reales, comprobando la veracidad del modelo para simular el comportamiento de un sistema real.

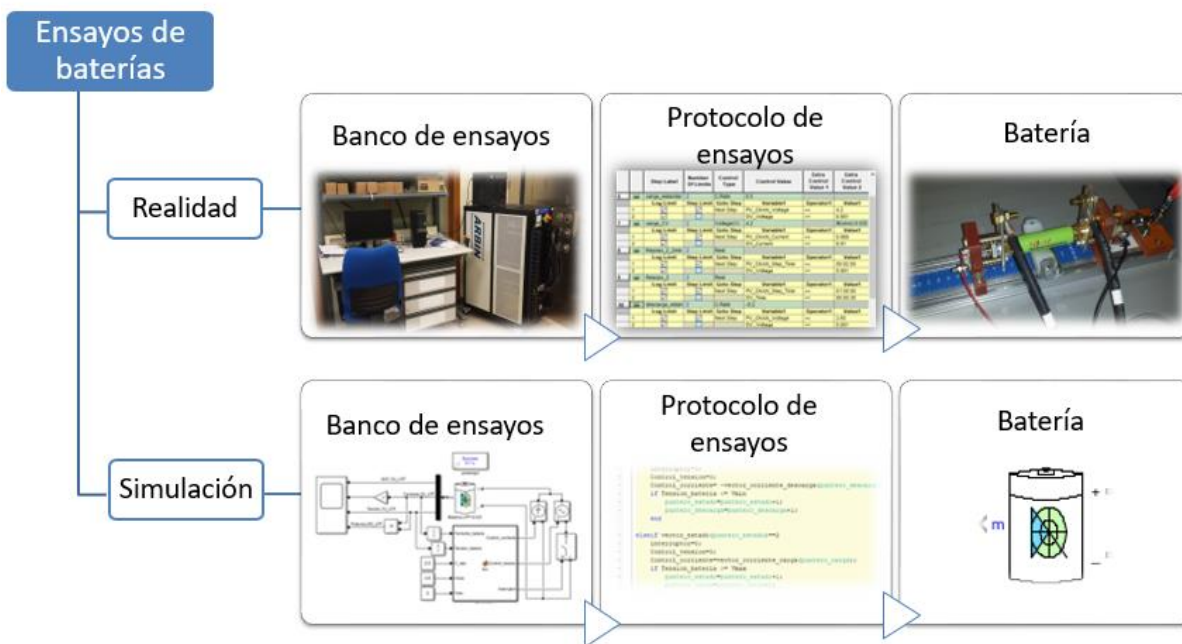


Figura 37: Ensayos de baterías de forma real y simulada.

A continuación, en la Figura 38, se muestra un protocolo de ensayos realizado en el laboratorio a la batería de NMC SAMSUNG INR18650-35E. El protocolo consiste en un reposo de dos horas, seguido de un ciclo que tiene dos repeticiones de una carga a $C/2$ (la carga CC_CV recomendada por el fabricante en la hoja de características) y una descarga a $C/5$, con un reposo de dos horas entre carga y descarga. Posteriormente se realizan dos repeticiones de un ciclo de carga y descarga a $C/25$, y en este caso la carga se realiza a corriente constante (sin la fase CV). La realización de este protocolo en el banco de ensayos real tiene una duración aproximada de cuatro días, lo que demuestra la dificultad de realizar un ensayo demostrativo similar en un contexto docente, sin embargo, mediante simulación duraría apenas unos segundos.

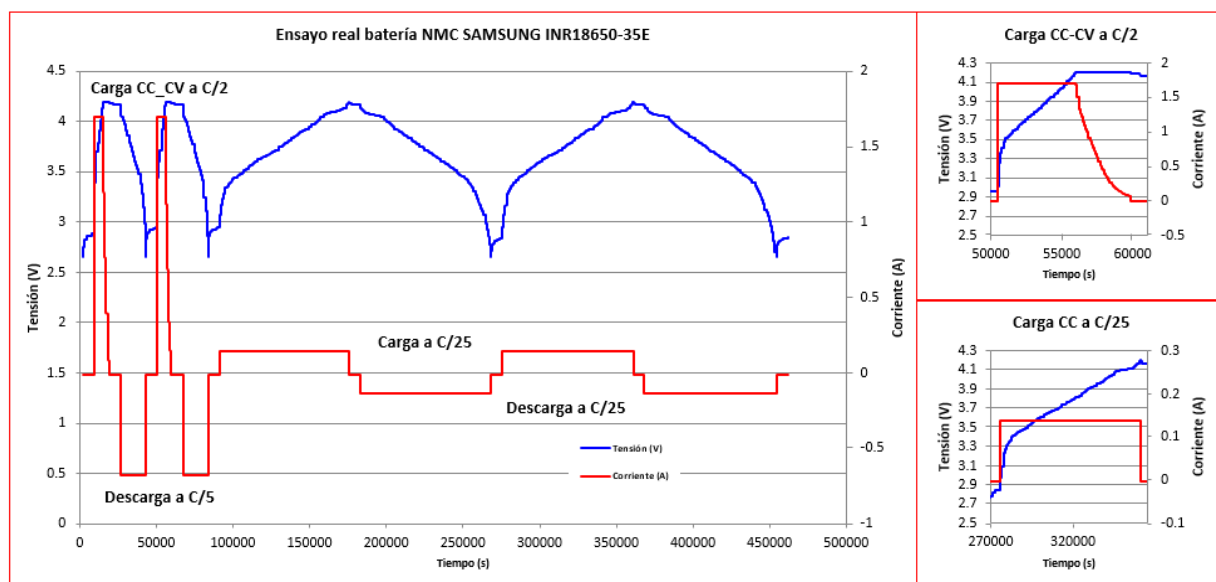


Figura 38: Ensayo real batería NMC SAMSUNG INR18650-35E.

Para crear el banco de ensayos virtual que permita realizar el protocolo descrito, se parte de la función creada en el bloque *MATLAB Function* en el epígrafe anterior (6.1.1.-), la cual realizaba la carga y descarga de la batería mediante la implementación de tres estados: uno de descarga, otro de carga a corriente constante CC y otro de carga a tensión constante CV. A esta función se añade el estado de reposo y los vectores de estado, corriente de carga y corriente de descarga según el protocolo a ejecutar, como se muestra en la Figura 39.

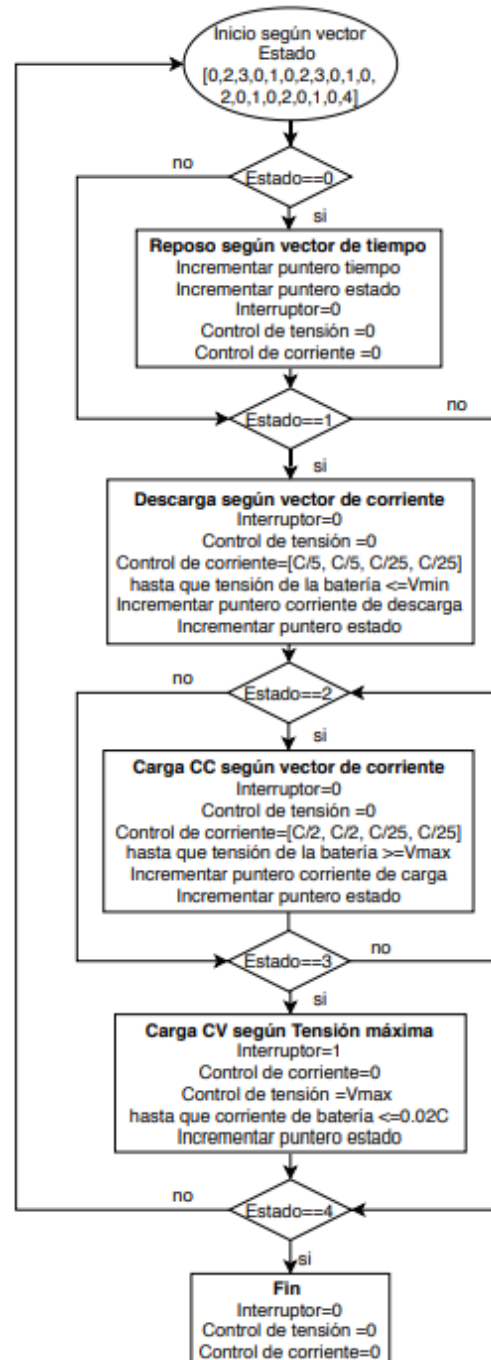


Figura 39: Lógica de programación del Banco de ensayos virtual (Bloque MATLAB Function).

Para añadir el estado de reposo se declaran las siguientes variables:

```

persistent puntero_tiempo; //es una variable que permitirá recorrer el vector de tiempo
if isempty(puntero_tiempo)
    puntero_tiempo=1;
end
  
```

persistente tiempo; //es una variable que permitirá calcular el tiempo de simulación transcurrido (tiempo acumulado)

```
if isempty(tiempo)
    tiempo=0;
end
```

A continuación, se declara el vector de tiempo donde, cada una de las posiciones de dicho vector serán 2 horas de reposo (7200 segundos).

```
vector_tiempo=[3600*2 3600*2 3600*2 3600*2 3600*2 3600*2 3600*2];
```

Posteriormente se declara el estado de reposo, donde se comprueba si el valor del vector estado donde se encuentra el *puntero_estado* es igual a cero, el control de tensión y corriente estarán a cero, por lo que el interruptor que acciona la fuente de tensión también estará a cero (desconectado) provocando que la batería se encuentre en reposo. La variable tiempo irá calculando el tiempo de simulación transcurrido, sumando el periodo de muestreo del bloque *powergui* que en este caso es 0.1s, si el tiempo de la simulación es mayor o igual que el tiempo definido en el *vector_tiempo*, se incrementa el *puntero_tiempo* y se reinicia la variable *tiempo*.

```
if vector_estado(puntero_estado)==0
    interruptor=0;
    Control_tension=0;
    Control_corriente=0;
    tiempo=tiempo+0.1;
    if tiempo>=vector_tiempo(puntero_tiempo)
        puntero_estado=puntero_estado+1;
        tiempo=0;
    end
```

elseif vector_estado(puntero_estado)=1...//continúa el resto de la función programada en el epígrafe anterior (6.1.1.-)

Una vez completada la estructura del banco de ensayos virtual con todos los estados necesarios para simular un protocolo como los realizados en la realidad, se procede a la simulación del ensayo realizado a la batería NMC SAMSUNG INR18650-35E, mostrado en la Figura 38. Los parámetros de entrada al modelo para la batería de MNC SAMSUNG INR18650-35E se obtienen a partir de la hoja de características y de la curva de descarga a corriente nominal del Anexo 1-c). Estos parámetros de entrada se muestran en la Figura 40.

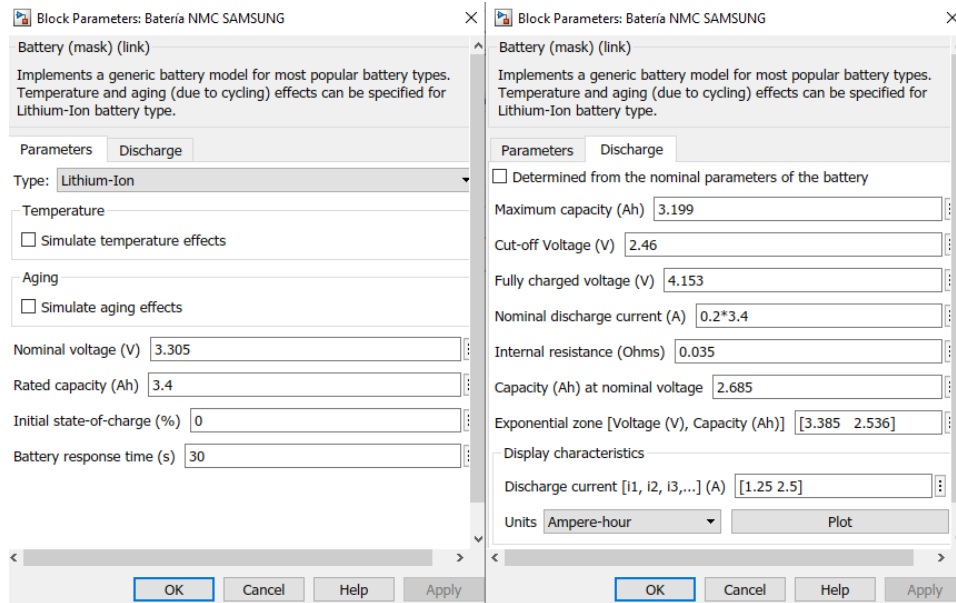


Figura 40: Parámetros de entrada al modelo para la batería de MNC SAMSUNG INR18650-35E.

En la Figura 41 se muestran los resultados obtenidos mediante la simulación del protocolo descrito en la Figura 38. En el centro de la figura se puede observar la etapa de carga a corriente constante y la etapa de carga a tensión constante realizada a la razón de corriente de $C/2$, mientras que a la razón de corriente $C/25$ se realiza solamente la etapa de carga a corriente constante como estaba previsto (extremo izquierdo de la figura). Se puede comprobar que cada uno de los estados definidos en la función de MATLAB® (carga, descarga, reposo) se ejecutan de forma correcta y en su conjunto permiten la simulación de un protocolo de ensayos como los realizados en los equipos especializados del laboratorio.

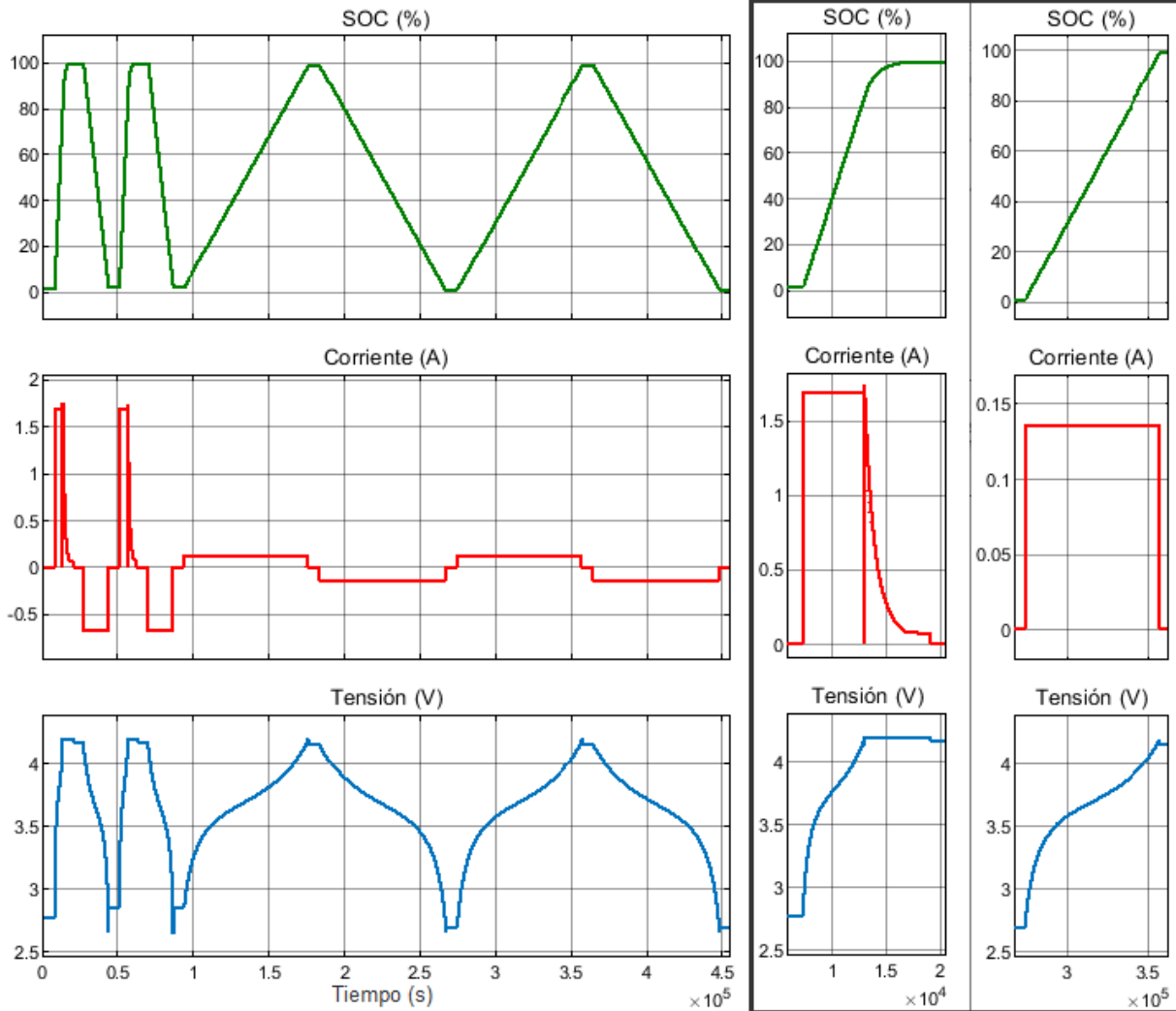


Figura 41: Resultados de ensayos simulados batería NMC SAMSUNG INR18650-35E (Izquierda), carga CC-CV a C/2 (Centro) y carga CC a C/25 (Derecha).

A continuación, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos mediante la simulación y los obtenidos mediante los ensayos reales. Para ello se extraen los valores del vector tiempo y tensión resultantes de la simulación y que se pueden ver en el espacio de trabajo del MATLAB® (*workspace*) una vez terminada la simulación. Los resultados se copian en un documento Excel y se grafican junto con los obtenidos de los ensayos reales, como se muestra en la Figura 42. Se puede observar que los resultados de la simulación se aproximan mucho a los resultados reales en los primeros ciclos de carga/descarga realizados a las razones de corriente C/2 y C/5 respectivamente, mientras que a C/25 los perfiles de tensión (simulado y real) no coinciden del todo. Esto se debe a que el modelo se ajustó a la razón de corriente nominal de C/5, por lo que una corriente tan pequeña como C/25 ya se aleja mucho de los parámetros de ajuste establecidos. A pesar de las diferencias a esta corriente, se muestra la validez del modelo para

simular de forma rápida el comportamiento de la batería, además del correcto funcionamiento de la estructura de banco de ensayos virtual creada en este capítulo.

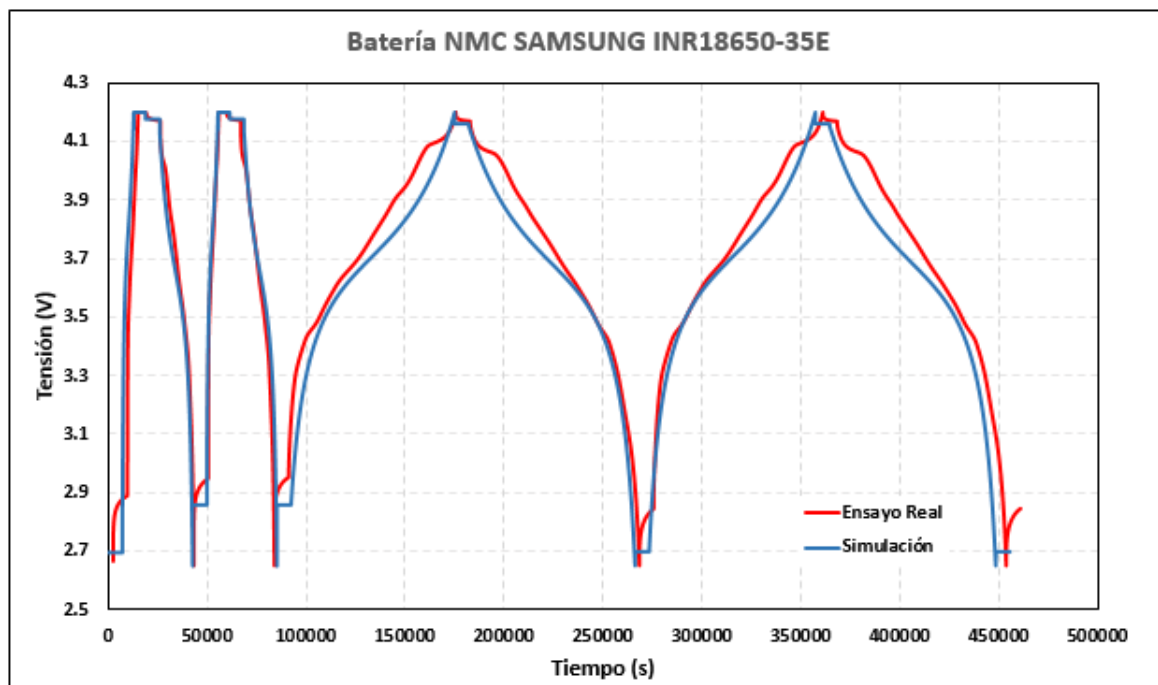


Figura 42: Perfil de tensión de la batería NMC SAMSUNG INR18650-35E obtenido mediante ensayos reales y simulación.

6.1.3.- Conexión de celdas en serie y paralelo.

En la mayoría de las aplicaciones donde se utilizan baterías, estas se encuentran en forma de packs, es decir asociaciones de baterías conectadas en serie y/o paralelo para alcanzar los requisitos de corriente y tensión de la aplicación en cuestión.

Para la realización de dichas conexiones es importante utilizar baterías del mismo tipo (igual marca y tamaños), con igual tensión y capacidad (Ah) ya que una celda con diferente capacidad o características causaría un desequilibrio. Una celda con menor capacidad se carga antes, permaneciendo en sobrecarga más tiempo que las otras, generando calor y haciendo que pierda aún más capacidad. Al descargar, dicha celda tendrá menos capacidad que el resto por lo que descarga primero. Con el uso y el tiempo, en las celdas de un pack de baterías se comenzarán a observar desequilibrios [12].

Conexión serie

La conexión serie entre celdas se utiliza cuando se requiere mayor tensión a la salida del pack de baterías, tal y como se observa en la Figura 43.



Figura 43: Conexión de dos celdas en serie. Fuente [12].

Con el banco de ensayos virtual desarrollado anteriormente en el epígrafe 6.1.2.- se quiere simular el comportamiento de un pack de baterías compuesto por dos celdas conectadas en serie considerando, en un primer momento, que ambas celdas tienen características idénticas y posteriormente, considerando que una de las celdas tiene parámetros diferentes a la primera como consecuencia del desgaste o por necesidades de la aplicación en concreto donde se quiera utilizar.

A la estructura de banco de ensayos desarrollada se agregan dos celdas en serie y a la entrada del *Bloque MATLAB Function* se tendrá la suma de las tensiones a la salida de ambas celdas, como se muestra en la Figura 44.

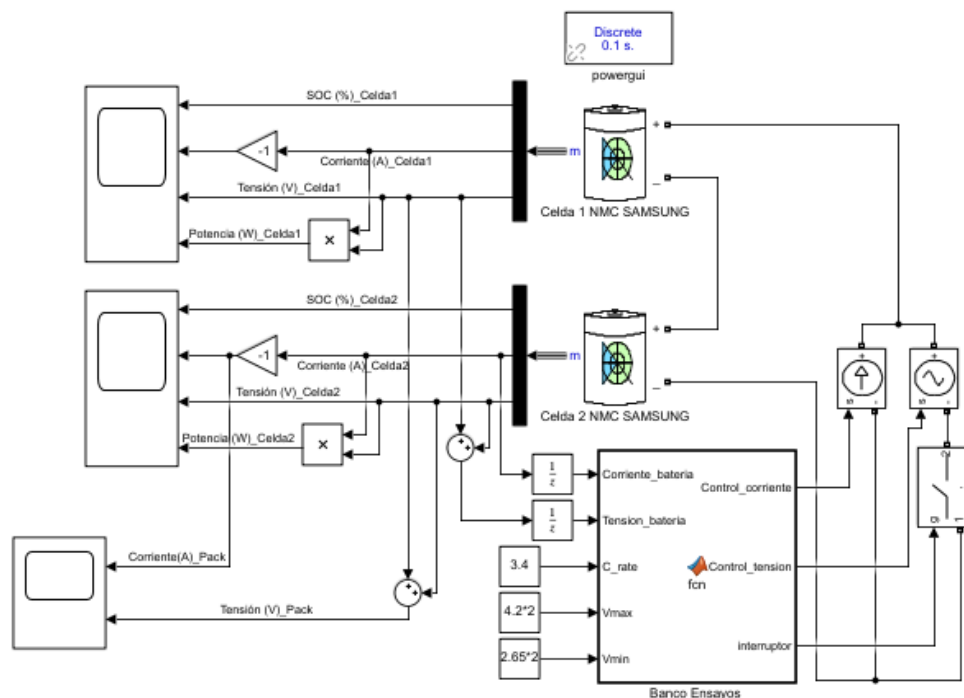


Figura 44: Estructura para simular un pack de baterías, conexión serie.

Con la estructura anterior, se simula una conexión en serie entre dos celdas idénticas de NMC SAMSUNG INR18650-35E ajustadas en la Figura 40 y con un ciclo de carga (CC-CV)/descarga a C/5 y reposo de dos horas entre cada proceso. Es decir, la definición de los vectores del *Bloque MATLAB Function* quedaría de la siguiente forma:

```
vector_corriente_descarga=[C_rate/5];
vector_corriente_carga=[C_rate/5];
vector_tiempo=[3600*2 3600*2 3600*2];
vector_estado=[0 2 3 0 1 0 4];
```

Como se puede observar en la Figura 45, el perfil de tensión de ambas celdas es idéntico como era de esperar con las celdas parametrizadas de forma similar, mientras que la tensión a la salida del pack de baterías es el doble del de una única celda. También se comprueba que los valores de corriente del ensayo no se ven afectados por este tipo de conexión.

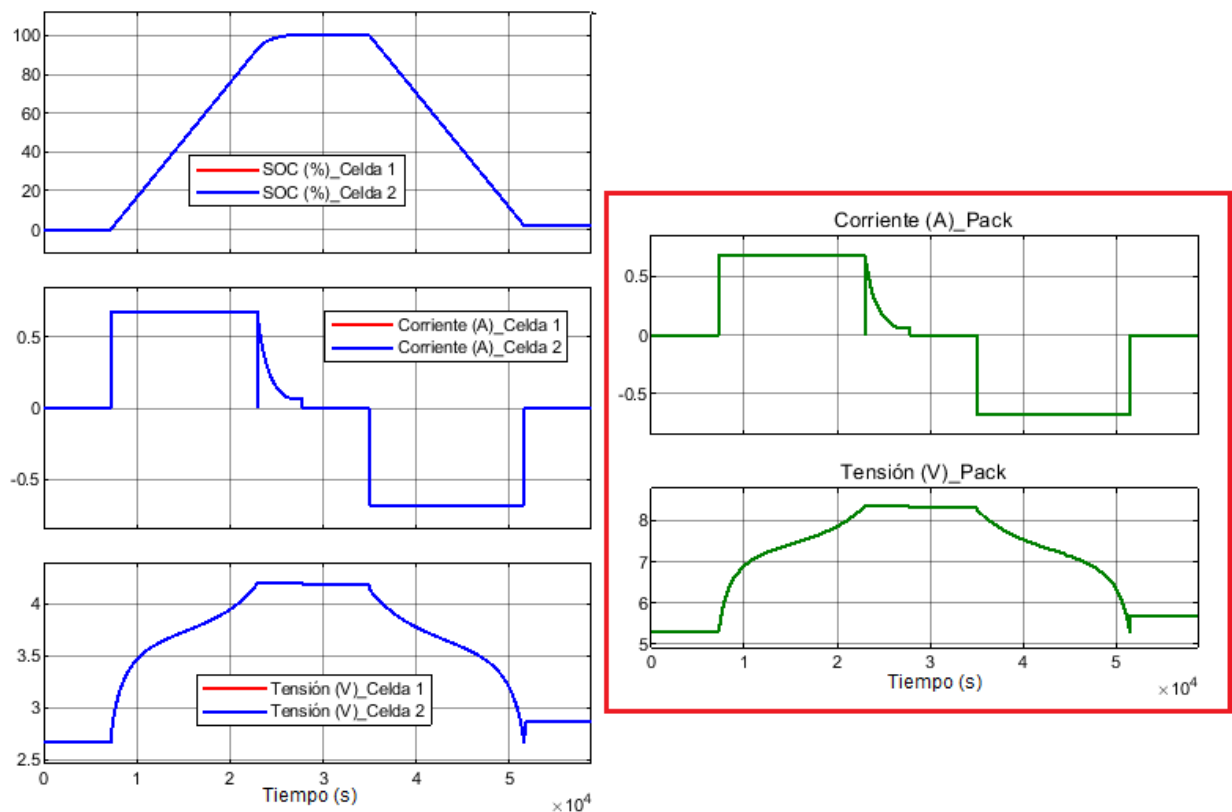
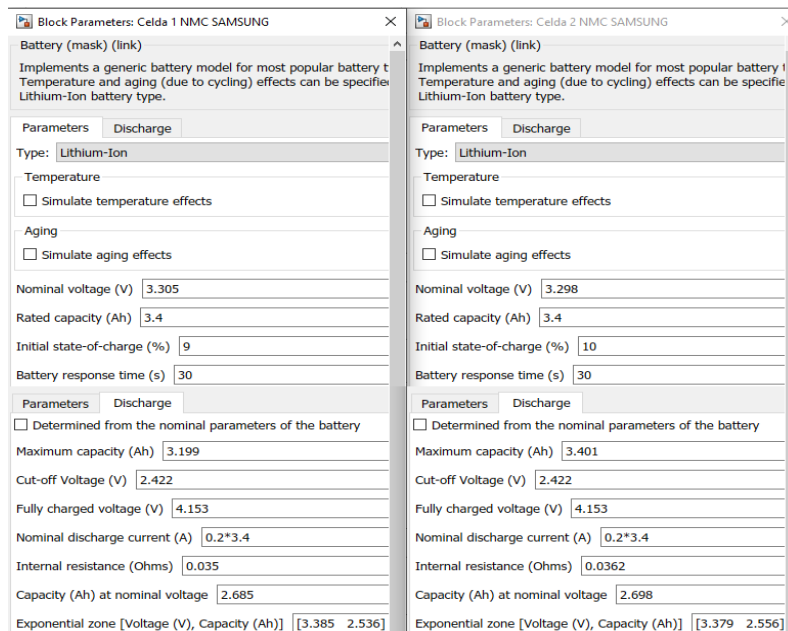


Figura 45: Simulación de configuración en serie, celdas 1 y 2 de NMC SAMSUNG INR18650-35E idénticas.

Posteriormente se vuelve a simular esta conexión en serie suponiendo que una de las celdas tiene valores de tensión, resistencia interna y estado de carga diferentes a la primera, lo

cual es común en la práctica debido al envejecimiento o por la sustitución de celdas averiadas dentro del pack. Como se observa en la Figura 46, se considera que la tensión nominal de la segunda celda es un poco menor que el de la primera (Celda 1: 3.05V, Celda 2: 3.298V), mientras que los valores de resistencia interna y capacidad máxima de la batería serán ligeramente superiores en la segunda celda (Celda 1: 3.199Ah-0.035Ω, Celda 2: 3.401Ah-0.0362Ω). También se considera que ambas celdas comienzan con valores de SOC diferentes, 9% en el caso de la primera celda y 10% en la segunda celda.



Parameter	Celda 1 NMC SAMSUNG	Celda 2 NMC SAMSUNG
Type	Lithium-Ion	Lithium-Ion
Nominal voltage (V)	3.305	3.298
Rated capacity (Ah)	3.4	3.4
Initial state-of-charge (%)	9	10
Battery response time (s)	30	30
Maximum capacity (Ah)	3.199	3.401
Cut-off Voltage (V)	2.422	2.422
Fully charged voltage (V)	4.153	4.153
Nominal discharge current (A)	0.2*3.4	0.2*3.4
Internal resistance (Ohms)	0.035	0.0362
Capacity (Ah) at nominal voltage	2.685	2.698
Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]	[3.385 2.536]	[3.379 2.556]

Figura 46: Parámetros de entrada al modelo, Celdas 1 y 2 NMC SAMSUNG INR18650-35E.

En el caso de la simulación con la segunda celda configurada con valores ligeramente diferentes a la primera (Figura 47), se puede observar que la tensión de corte al final de la descarga no se encuentra en el mismo punto en ambas celdas. Esto se debe a que el pack de baterías no ha llegado a la tensión de corte, por lo que una de las celdas se sigue descargando más allá del límite establecido por el fabricante en la hoja de características, en este caso por debajo de los 2.65V. Por este motivo los packs de baterías incorporan BMS que permiten el control celda a celda, evitando que se superen los límites de seguridad de tensión, corriente y temperatura.

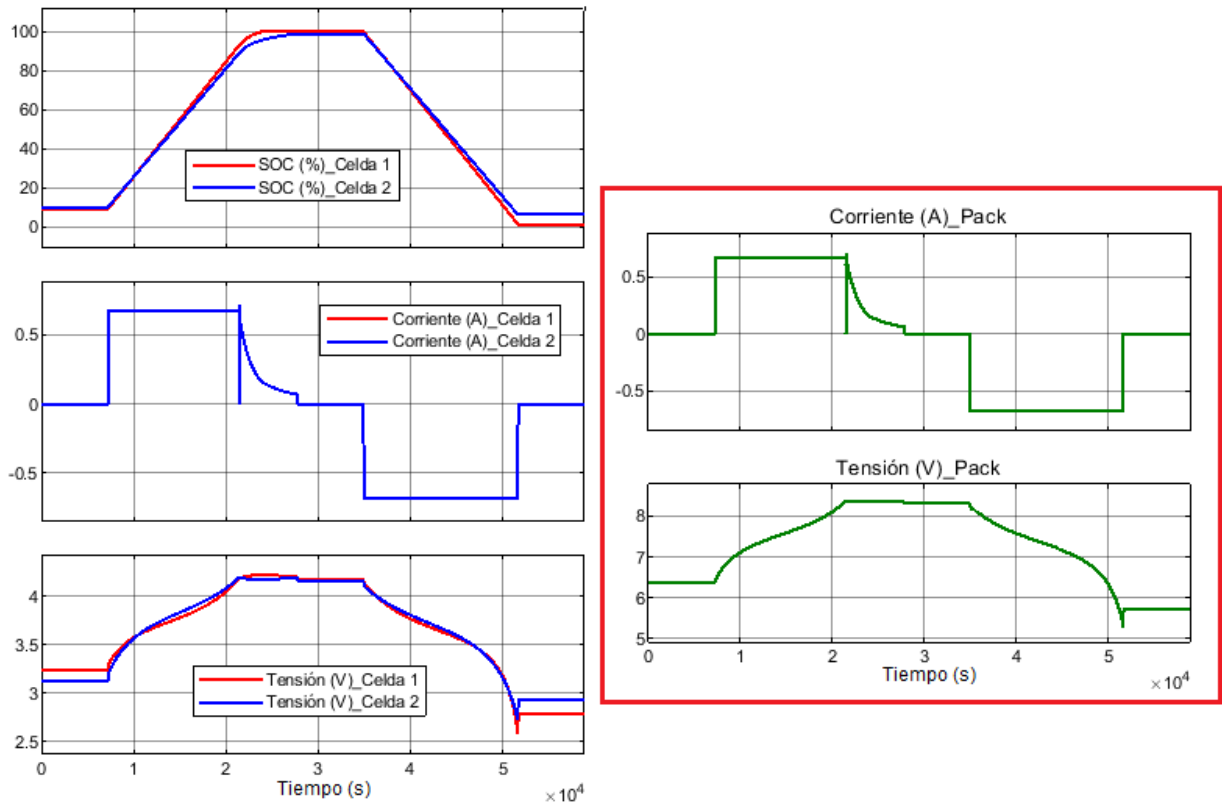


Figura 47: Simulación de configuración en serie, celdas 1 y 2 de NMC SAMSUNG INR18650-35E diferentes.

Conexión paralelo

La conexión en paralelo se realiza cuando se requiere mayor potencia, capacidad (mayor autonomía) o mayor corriente que la que puede ofrecer una única celda, tal y como se muestra en la Figura 48.

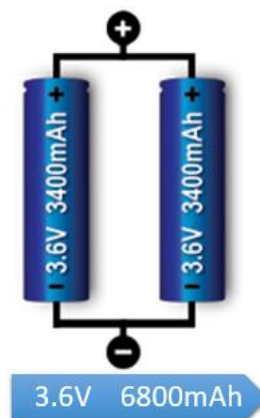


Figura 48: Conexión de dos celdas en paralelo. Fuente [12].

Al igual que el análisis realizado en el apartado anterior cuando existe una conexión serie, se quiere simular el comportamiento de un pack de baterías compuesto por dos celdas conectadas en paralelo, considerando, en un primer momento, que ambas celdas tienen características idénticas y posteriormente, que una de las celdas tiene parámetros diferentes a la primera. Para ello, se parte de la estructura creada para simular la conexión de dos celdas en serie y se modifica, precisamente, el tipo de conexión entre las celdas, poniéndolas en paralelo como se muestra en la Figura 49. Además, en este tipo de conexión, a la entrada del *Bloque MATLAB Function* se tendrá la suma de las corrientes a la salida de ambas celdas, en lugar de la tensión.

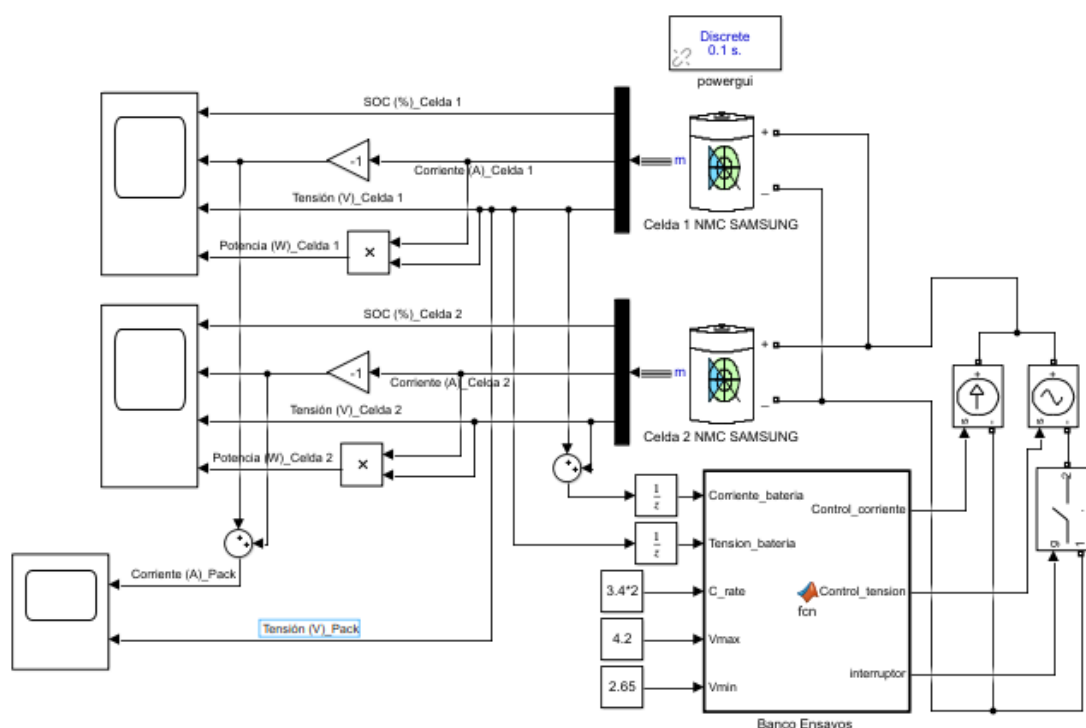


Figura 49: Estructura para simular un pack de baterías, conexión paralelo.

Con la estructura creada, se propone la simulación de una conexión en paralelo entre dos celdas idénticas de NMC SAMSUNG INR18650-35E (ajustadas en la Figura 40), con el mismo protocolo de carga/descarga a C/5 planteado para la conexión en serie en el apartado anterior.

En los resultados de la simulación con este ajuste de celdas idénticas (Figura 50) se puede observar que, como era de esperar en este tipo de conexión en paralelo, el perfil de tensión a la salida del pack de baterías se ha mantenido igual que el de una sola celda, mientras que el perfil de corriente se ha duplicado respecto al obtenido con la configuración serie.

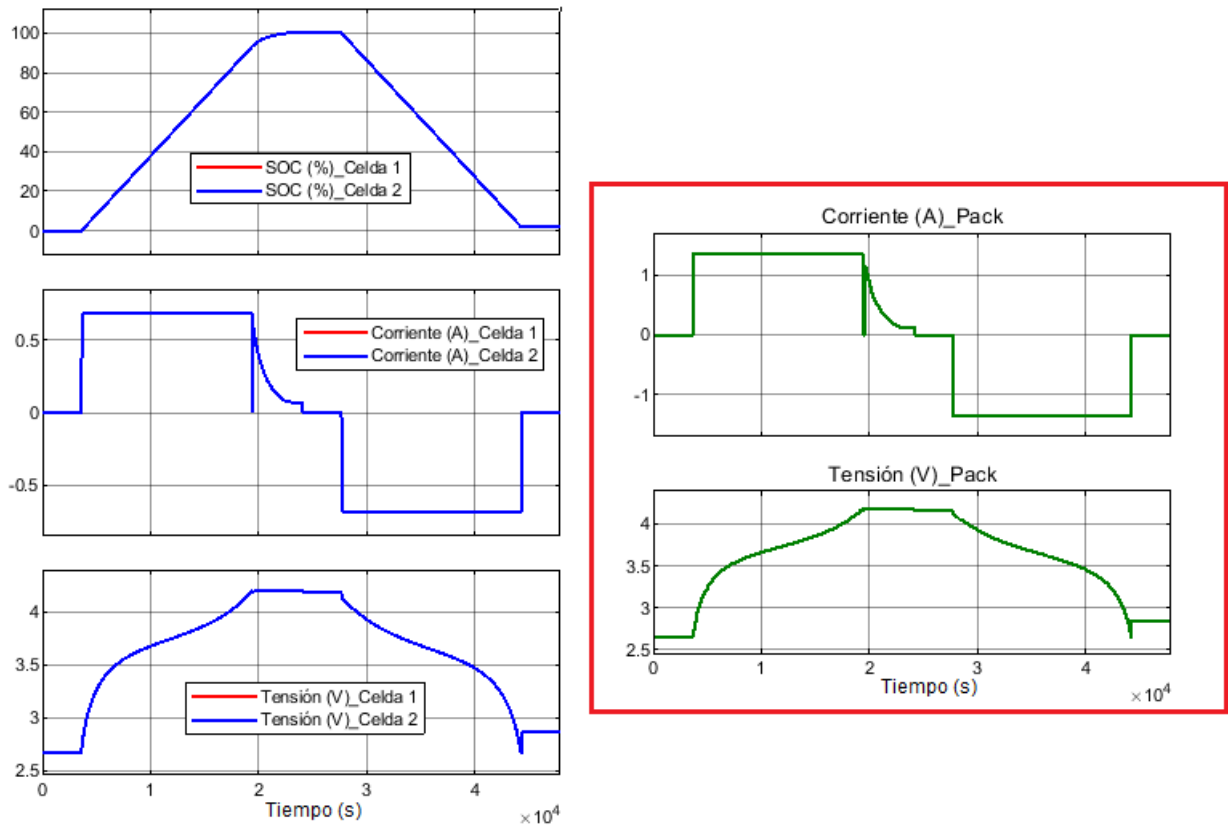


Figura 50: : Simulación de configuración en paralelo, celdas 1 y 2 de NMC SAMSUNG INR18650-35E idénticas.

Posteriormente, se vuelve a simular esta conexión en paralelo suponiendo que la segunda celda de NMC SAMSUNG INR18650-35E tiene valores de tensión, resistencia interna y estado de carga diferentes a la primera. Los valores modificados en el ajuste de la segunda celda se pueden observar en la Figura 46. En la Figura 51 se muestran los resultados de dicha simulación. Se puede observar la diferencia en la evolución de la corriente de ambas celdas para compensar las diferencias existentes entre ellas.

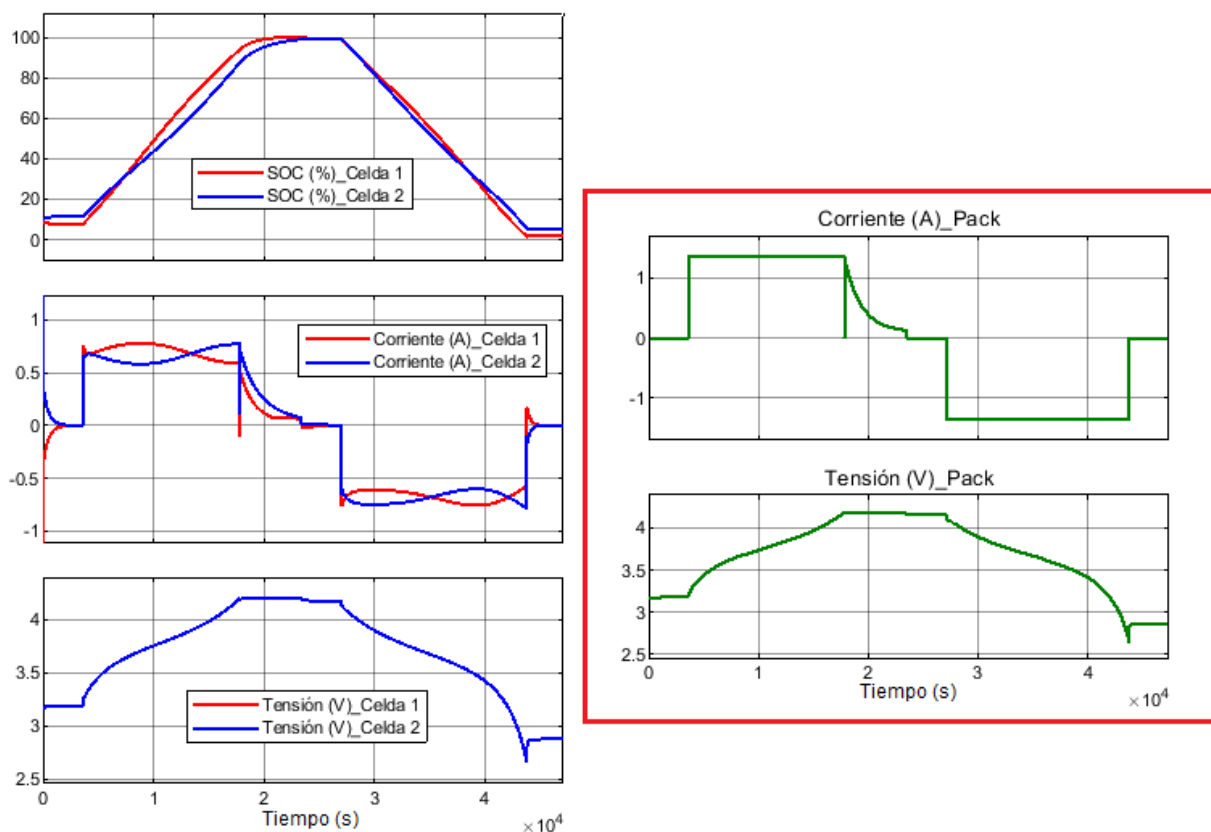


Figura 51: Simulación de configuración en paralelo, celdas 1 y 2 de NMC SAMSUNG INR18650-35E diferentes.

6.2.- PL#2: Factores que influyen en la vida útil la batería.

El objetivo de esta práctica es comprender los principales factores de uso que influyen en la vida útil de una batería. En este aspecto se pondrá mayor atención a la influencia de la temperatura y el envejecimiento por ciclado en el funcionamiento de las baterías. Estos conocimientos son fundamentales para poder evaluar y predecir el comportamiento de la batería ante una serie de condiciones de funcionamiento, evitando de esta forma, posibles fallos o permitiendo la adopción temprana de estrategias que permitan alargar su vida útil.

El envejecimiento de la batería es complejo y no siempre es predecible. Está dado por la influencia de una serie de factores entre los que se encuentran: el propio envejecimiento por el paso del tiempo y el almacenamiento, la cantidad de ciclos de cargas/descargas, la temperatura, velocidad de los procesos de carga/descarga y el estado o nivel de carga [32]. Es necesario destacar que el análisis del envejecimiento por calendario está fuera del alcance de este proyecto, dado la imposibilidad de simular este fenómeno con el modelo en cuestión.

La degradación del rendimiento de las baterías, y por tanto de su estado de salud (SOH), puede caracterizarse por la pérdida de capacidad, que se puede describir en términos de pérdida de energía o potencia disponible en la batería. El SOH informa del estado de envejecimiento y degradación de la batería. Cuando la capacidad se degrada al 80% de la capacidad nominal, se considera que la batería no es utilizable para aplicaciones vehiculares y debe reemplazarse [5].

A continuación, se propone la realización de una serie de simulaciones, utilizando el modelo de baterías de MATLAB/Simulink® para observar la influencia de la temperatura y el envejecimiento por ciclado en el estado de salud de la batería.

6.2.1.- Influencia de la temperatura.

Uno de los factores claves que afectan el rendimiento, y por tanto la vida útil de la batería es la temperatura de funcionamiento. Las baterías funcionan en un amplio rango de temperatura que varía según la química utilizada en la construcción de sus electrodos. El proceso de carga es más delicado que la descarga y se debe tener especial cuidado. El funcionamiento fuera de su rango de temperatura ideal puede afectar negativamente la capacidad y reducir el número total de ciclos que puede proporcionar una batería [15]. La evaluación del efecto de la temperatura sobre el estado de salud de la batería es una tarea compleja, ya que tanto las fuentes de calor externas como la generación interna de calor influyen en su comportamiento, activando diferentes procesos en función del tipo de batería y el rango de temperatura considerado [6].

Dependiendo de la aplicación y de las condiciones ambientales concretas donde se utilicen, las baterías funcionan a bajas y altas temperaturas. Cuando la temperatura de funcionamiento es baja, la capacidad de la batería se reduce debido a la disminución de la velocidad de las reacciones químicas. Por otro lado, una temperatura elevada acelera las reacciones exotérmicas, aumentando aún más la temperatura y activando reacciones más dañinas que disminuyen la vida útil de la batería [18] [32].

Con el objetivo de analizar la influencia de la disminución de la temperatura ambiente en el comportamiento de la batería, se utiliza la estructura de banco de ensayos virtual creada en el epígrafe 6.1.1.- y se añade el cálculo de la energía. La energía a la salida de la batería se obtiene mediante un bloque *Product* al que entra la capacidad cargada y descargada en cada ciclo de carga/descarga y la tensión nominal de la batería en cuestión, como se muestra en la Figura 52.

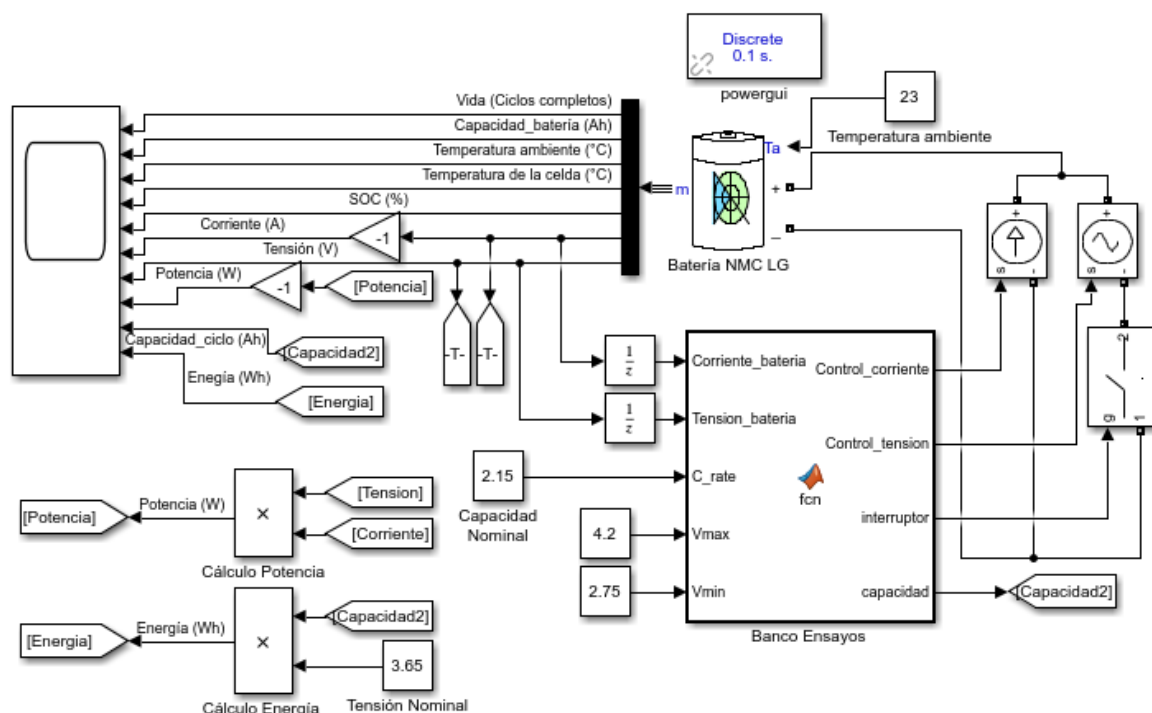


Figura 52: Estructura para analizar los efectos de la temperatura en el comportamiento de la batería.

Para obtener la capacidad en cada una de las razones de corriente de carga y descarga se añade a la función creada en el bloque *Matlab Function* (epígrafe 6.1.2.-) la variable de salida *capacidad*. Esta variable calcula la capacidad que se va acumulando durante la simulación en cada uno de los ciclos de carga/descarga a partir de la corriente a la salida de la batería, por el tiempo de muestreo que en este caso es de 0.1 segundos, dividido por los 3600 segundos que tiene una hora para obtener la capacidad en Amperios-hora, como se muestra a continuación:

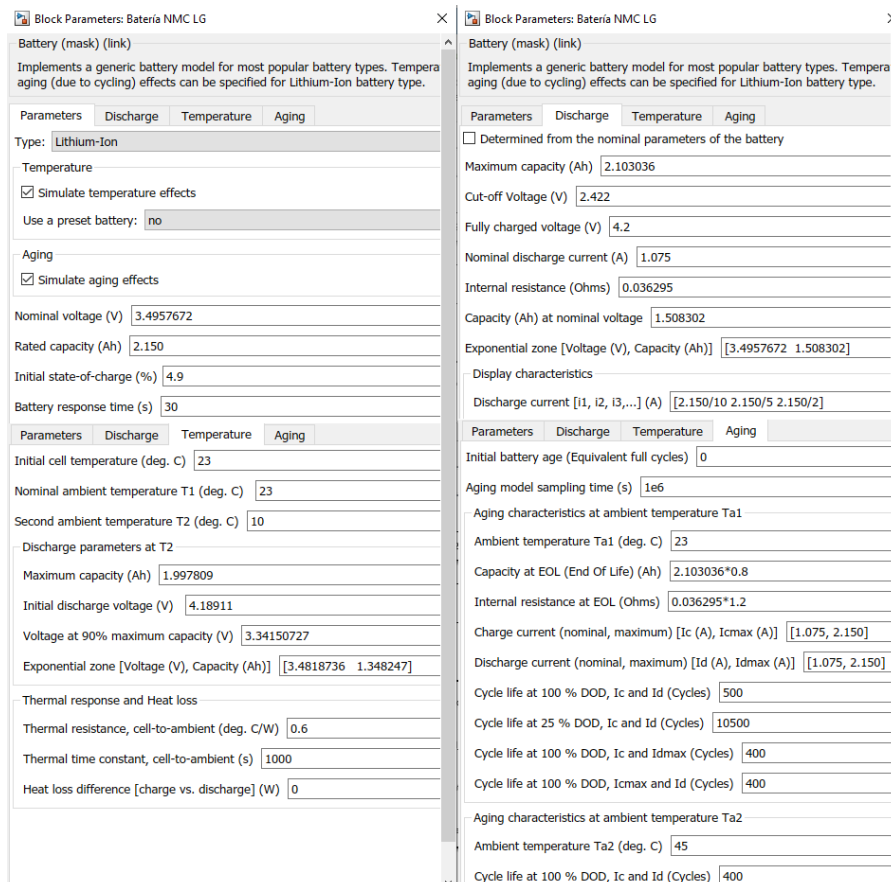
```
persistent capacidadciclo; //es una variable que permitirá calcular la capacidad acumulada en cada
ciclo de carga/descarga
if isempty(capacidadciclo)
    capacidadciclo=0;
end
capacidadciclo=capacidadciclo-Corriente_bateria*0.1/3600;
capacidad=capacidadciclo;
```

Con la estructura creada, se simula el comportamiento de la batería NMC LG ICR18650 MF1 ante dos temperaturas de funcionamiento diferentes (10°C y 23°C) y con un protocolo que consiste en una carga a corriente constante seguido de una descarga, ambos procesos a C/5. Para

ello, el vector de estados y los vectores de corriente de carga y descarga del bloque *Matlab Function* se definen de la siguiente forma:

(vector_estado=[2 1 4]; vector_corriente_descarga=[C_rate/5];vector_corriente_carga=[C_rate/5])

Los parámetros de entrada del modelo para la batería de NMC LG ICR18650 MF1 se obtienen a partir de la hoja de características y de las curvas de descarga a corriente nominal, a dos temperaturas de funcionamiento diferentes según el Anexo 1-d). Dichos parámetros se muestran en la Figura 53. Los valores mostrados en el ajuste de las pestañas *Temperature* y *Aging* se obtienen a partir de los resultados de ensayos reales realizados en el laboratorio a 10°C y a 23°C. También se puede observar que, en este caso, se marcan dentro de la pestaña de parámetros generales la opción de simular los efectos de la temperatura y el envejecimiento. Lo cual es fundamental para que el modelo pueda activar los bloques de los diferentes parámetros y ecuaciones que simulan la influencia de dichos efectos sobre el comportamiento de la batería.



Block Parameters: Batería NMC LG

Battery (mask) (link)
Implements a generic battery model for most popular battery types. Temperature aging (due to cycling) effects can be specified for Lithium-Ion battery type.

Parameters Discharge Temperature Aging

Type: Lithium-Ion

Temperature

☒ Simulate temperature effects

Use a preset battery: no

Aging

☒ Simulate aging effects

Nominal voltage (V) 3.4957672

Rated capacity (Ah) 2.150

Initial state-of-charge (%) 4.9

Battery response time (s) 30

Parameters Discharge Temperature Aging

Initial cell temperature (deg. C) 23

Nominal ambient temperature T1 (deg. C) 23

Second ambient temperature T2 (deg. C) 10

Discharge parameters at T2

Maximum capacity (Ah) 1.997809

Initial discharge voltage (V) 4.18911

Voltage at 90% maximum capacity (V) 3.34150727

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)] [3.4818736 1.348247]

Thermal response and Heat loss

Thermal resistance, cell-to-ambient (deg. C/W) 0.6

Thermal time constant, cell-to-ambient (s) 1000

Heat loss difference [charge vs. discharge] (W) 0

Block Parameters: Batería NMC LG

Battery (mask) (link)
Implements a generic battery model for most popular battery types. Temperature aging (due to cycling) effects can be specified for Lithium-Ion battery type.

Parameters Discharge Temperature Aging

☐ Determined from the nominal parameters of the battery

Maximum capacity (Ah) 2.103036

Cut-off Voltage (V) 2.422

Fully charged voltage (V) 4.2

Nominal discharge current (A) 1.075

Internal resistance (Ohms) 0.036295

Capacity (Ah) at nominal voltage 1.508302

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)] [3.4957672 1.508302]

Display characteristics

Discharge current [I1, I2, I3,...] (A) [2.150/10 2.150/5 2.150/2]

Parameters Discharge Temperature Aging

Initial battery age (Equivalent full cycles) 0

Aging model sampling time (s) 1e6

Aging characteristics at ambient temperature Ta1

Ambient temperature Ta1 (deg. C) 23

Capacity at EOL (End Of Life) (Ah) 2.103036*0.8

Internal resistance at EOL (Ohms) 0.036295*1.2

Charge current (nominal, maximum) [Ic (A), Icmx (A)] [1.075, 2.150]

Discharge current (nominal, maximum) [Id (A), Idmx (A)] [1.075, 2.150]

Cycle life at 100 % DOD, Ic and Id (Cycles) 500

Cycle life at 25 % DOD, Ic and Id (Cycles) 10500

Cycle life at 100 % DOD, Ic and Idmx (Cycles) 400

Cycle life at 100 % DOD, Icmx and Id (Cycles) 400

Aging characteristics at ambient temperature Ta2

Ambient temperature Ta2 (deg. C) 45

Cycle life at 100 % DOD, Ic and Id (Cycles) 400

Figura 53: Parámetros de entrada al modelo para la batería NMC LG ICR18650 MF1.

Una vez completado el ajuste, se simula la batería en cuestión a las dos temperaturas de trabajo fijadas y se comparan mediante el *Data Inspector*, tal y como se muestra en la Figura 54.

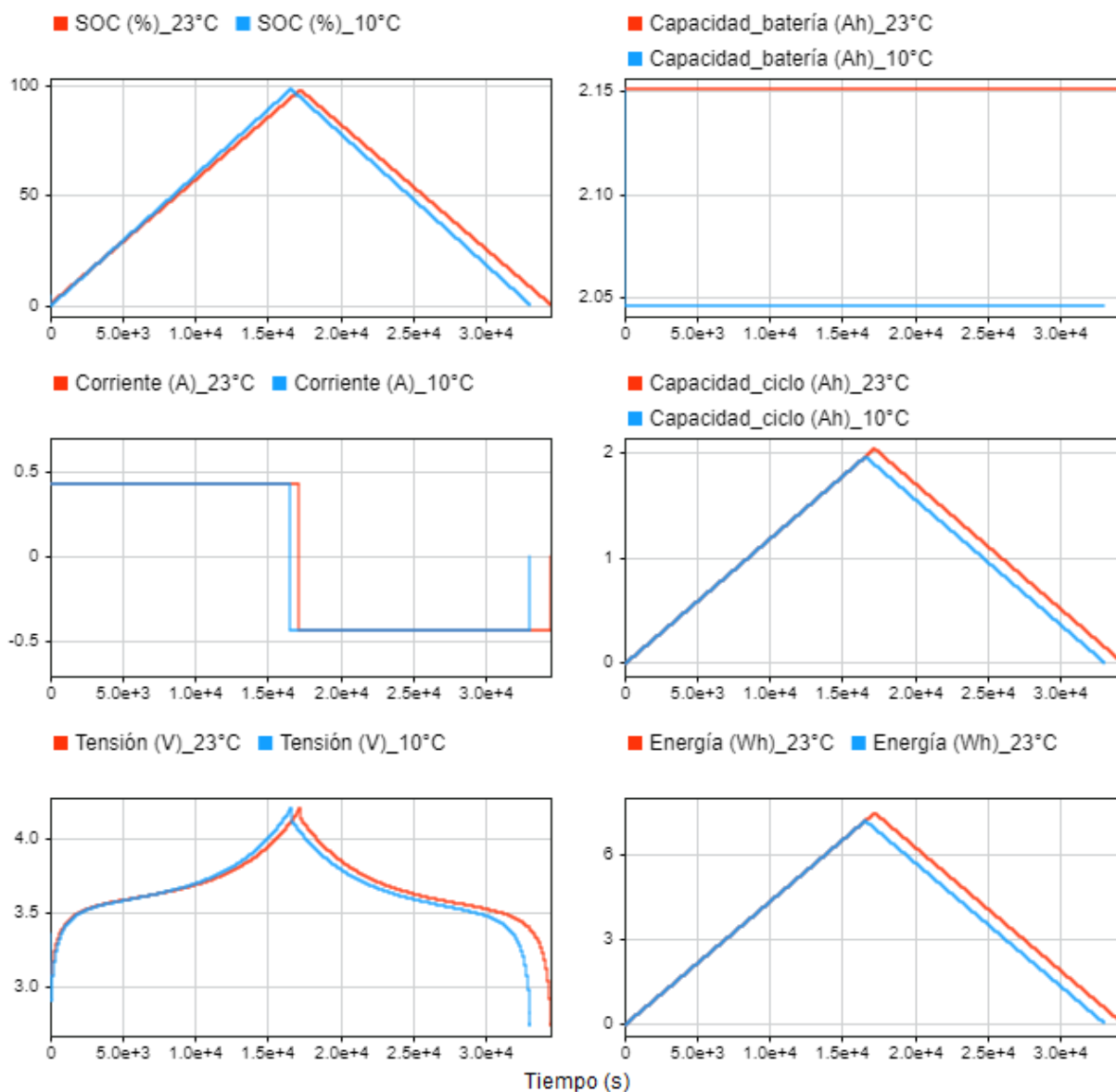


Figura 54: Efectos de la temperatura en la respuesta de la batería NMC LG ICR18650 MF1.

Comparando los resultados de las simulaciones a 23°C y 10°C respectivamente, se puede observar que la disminución de la temperatura ha provocado una caída en la capacidad de la batería, haciendo que el tiempo de simulación a 10°C sea menor. Esta pérdida de capacidad también provoca que la energía que se puede extraer de la batería al disminuir la temperatura sea menor que a 23°C.

Con el objetivo de realizar un análisis de la respuesta térmica de la batería ante los procesos de carga y descarga a diferentes índices C-Rate, se utiliza la estructura anterior y el ajuste realizado para la celda NMC LG ICR18650 MF1 (Figura 53), para simular un protocolo que consiste en dos ciclos de carga/descarga a dos corrientes diferentes ($C/5$ y $C/2$) y a una temperatura ambiente de 23°C . Para ello, el vector de estados y los vectores de corriente de carga y descarga del bloque *Matlab Function* se definen de la siguiente forma:

(vector_estado=[2 1 2 1 4]; vector_corriente_descarga=[$C_{\text{rate}}/5$ $C_{\text{rate}}/2$];vector_corriente_carga=[$C_{\text{rate}}/5$ $C_{\text{rate}}/2$])

En la Figura 55 se muestran los resultados de la simulación con las condiciones definidas anteriormente. Se puede observar que la temperatura interna de la celda se incrementa con el aumento de la velocidad de carga/descarga ya que la celda está sometida a un mayor esfuerzo para realizar dichos procesos en un menor tiempo, la temperatura aumenta cuadráticamente con la corriente (efecto Joule) y como consecuencia se calienta más la batería. También se puede observar que los picos de temperatura interna se alcanzan cuando el SOC está llegando a sus valores máximos y mínimos ya que la aceptación de carga de la batería es menor.

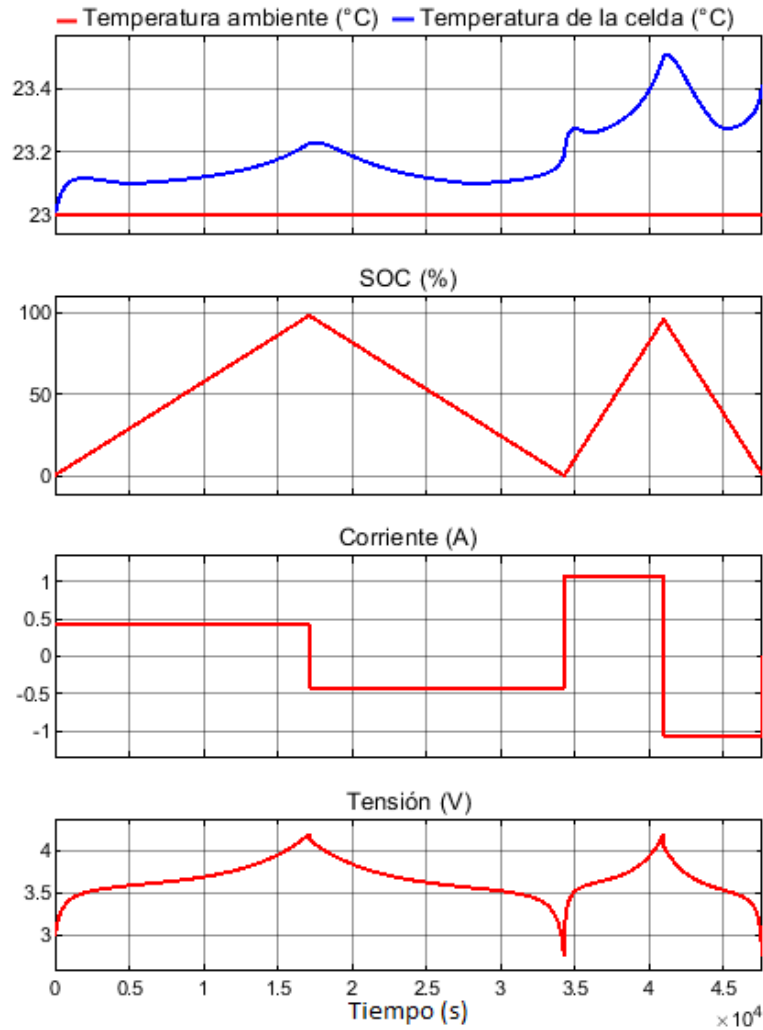


Figura 55: Respuesta térmica de la batería NMC LG ICR18650 MF1 ante carga y descarga a diferentes C-Rate.

La temperatura también determina qué tan rápido se puede realizar el proceso de carga de una batería. Durante la carga, la resistencia interna de la celda aumenta con la disminución de la temperatura, prolongando notablemente los tiempos de carga [32]. Con el objetivo de comprobar el efecto provocado por la disminución de la temperatura durante un proceso de carga, se utiliza el ajuste realizado a la celda NMC LG ICR18650 MF1 (Figura 53) y la estructura creada en este epígrafe, para simular un protocolo de carga CC-CV a C/2 a dos temperaturas de funcionamiento diferentes (5°C y 30°C). Para ello, el vector de estados y el vector de corriente de carga del bloque *Matlab Function* se definen de la siguiente forma:

(vector_estado=[2 3 4];vector_corriente_carga=[C_rate/2]).

Los resultados obtenidos a ambas temperaturas de funcionamiento se muestran en la Figura 56. Como se puede observar a 30°C la batería se carga completamente en dos horas aproximadamente, mientras que a 5°C demora tres horas y media aproximadamente en completar la carga. Esta demora se produce durante la etapa de carga a tensión constante (CV) debido a una disminución en la conductividad iónica del electrolito y a una desaceleración de las reacciones electroquímicas dentro de la celda provocada por la bajada de la temperatura. No obstante, esta etapa de CV generalmente aporta un porcentaje pequeño a la capacidad total cargada de la batería.

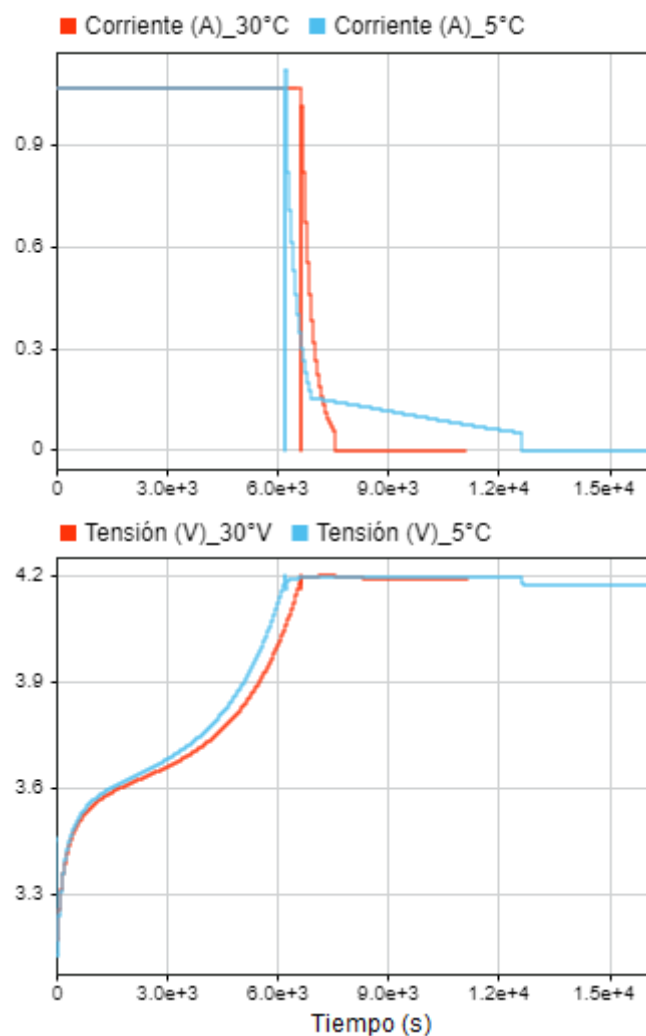


Figura 56: Tiempo de carga CC_CV en función de la temperatura, batería NMC LG ICR18650 MF1.

6.2.2.- Influencia del envejecimiento por ciclado.

Otro factor que influye de forma significativa en la pérdida de capacidad de una batería es el uso al que esté sometida. El efecto del envejecimiento por ciclado causa una pérdida irreversible de la capacidad de la batería con el aumento de los ciclos de carga/descarga [33].

El modelo de baterías disponible en el programa Matlab/Simulink® tiene en cuenta el envejecimiento por ciclado en la respuesta de la batería modificando el parámetro de ajuste *Initial battery age (Equivalent full cycles)*, pero lo realiza de forma interna y solo se podría observar la influencia final de los ciclos completados en los parámetros de salida del modelo, sin poder observar la repercusión y evolución de cada uno de los ciclos de carga/descarga durante el funcionamiento de la celda. Para hacer este análisis más atractivo y realista, se generan una serie de bloques y funciones capaces de realizar varios de ciclos de carga/descarga en un tiempo establecido y mostrar la evolución del comportamiento de la batería durante todo el proceso de ciclado. La estructura creada se muestra en la Figura 57. A continuación, se realiza una explicación de los bloques incorporados a esta estructura.

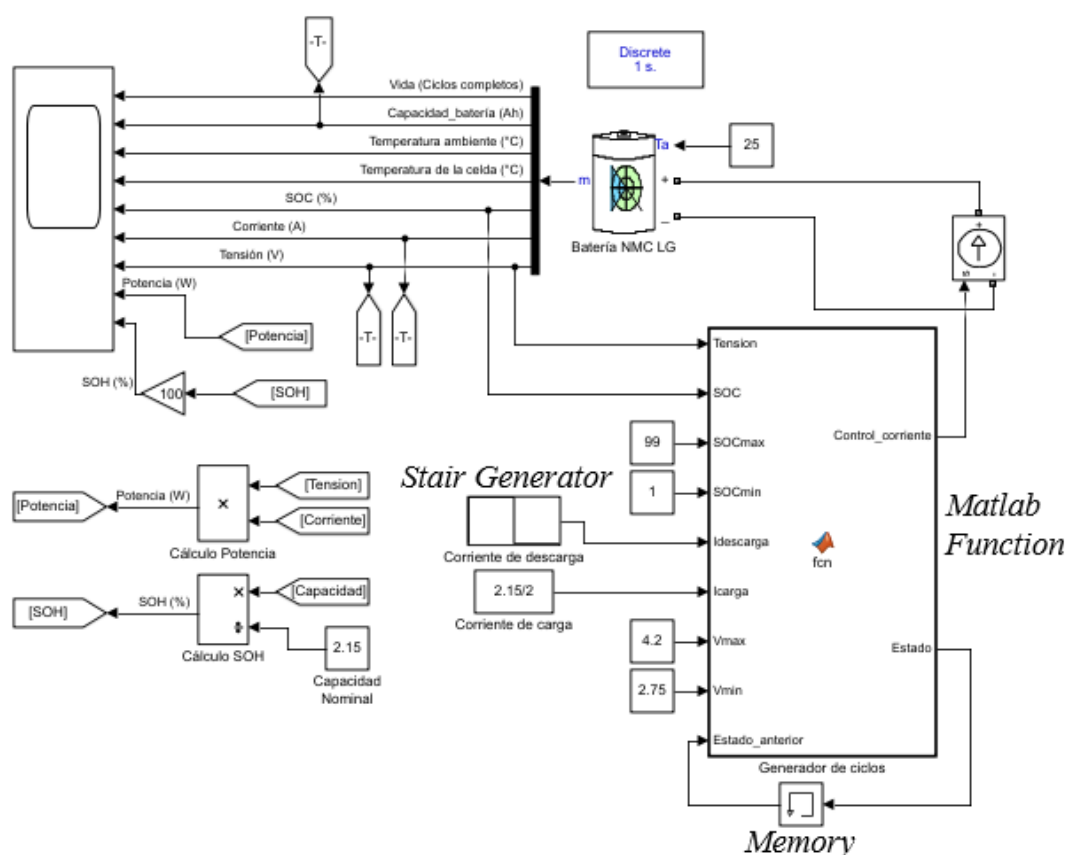


Figura 57: Estructura para simular el efecto del envejecimiento por ciclado en el comportamiento de la batería.

El bloque *Matlab Function* se utiliza para crear la función llamada *Generador de ciclos*, que es la encargada de controlar la fuente de corriente que permite realizar la carga o descarga de la batería dependiendo del valor de la variable *estado*. A la entrada de la función se tiene el valor de tensión a la salida de la batería, el valor del SOC a la salida de la batería, el perfil de corriente de carga y descarga, los valores de tensión mínimo y máximos de tensión recomendados por el fabricante en la hoja de características y una variable que almacena el valor de la variable *estado* que indicará si anteriormente se está realizando un proceso de carga (0) o de descarga (1). Para almacenar el valor de esta variable se incorpora el bloque *Memory*. Como se puede observar en el código que se muestra a continuación, si la variable *Estado_anterior* es igual a 1 se realizará la descarga de la batería, por contrario, si su valor es cero se realizará la carga de la batería. Si el estado anterior era una descarga, se realizará la carga de la batería hasta que la tensión o el SOC superen los valores máximos, establecidos a la entrada de la función. El procedimiento contrario ocurre durante la descarga de la batería.

El código completo que compone la función *Generador de ciclos* es el siguiente:

```
function [Control_corriente,Estado] = fcn(Tension,SOC,SOCmax,SOCmin,Idescarga,Icarga,Vmax,Vmin,Estado_anterior)
Estado=Estado_anterior;
if (Estado_anterior==1 && Tension>=Vmax) || (Estado_anterior==1 && SOC>=SOCmax)
    Estado=0;
end
if (Estado_anterior==0 && Tension<=Vmin) || (Estado_anterior==0 && SOC<=SOCmin)
    Estado=1;
end
if (Estado_anterior==1)
    Control_corriente=Idescarga;
else
    Control_corriente=-Icarga;
end
```

Los valores de corriente a los que se quiere realizar el proceso de descarga, se introducirán a la función *Generador de ciclos* mediante el bloque *Stair Generator* que permite generar una señal en el tiempo, mediante el ajuste de sus parámetros internos (*Amplitude*, *Time (s)*). Además, se crea la variable de salida (SOH) a partir de un bloque *Product* al que entra la capacidad a la salida de la batería, dividida por la capacidad nominal.

Con la estructura anterior, se quiere estudiar la influencia del ciclado a una corriente constante ($C/2$, tanto en carga como en descarga) en el comportamiento de la batería NMC LG ICR18650 MF1, ajustada en el epígrafe 6.2.1.- (Figura 53). El ciclado de la batería se realiza durante el equivalente a 100 horas ensayando en un banco real, lo cual mediante simulación se completa en apenas unos segundos. Para establecer la razón de carga/descarga y el tiempo de

ciclado, el bloque *Stair Generator* se parametriza de la siguiente forma *Time (s)*: [0 16 26 36]*10000 y *Amplitude*: [1 1 1 1]*1.075.

Los resultados de la simulación con las consideraciones descritas se muestra en la Figura 58, donde se puede observar la pérdida de capacidad de la batería según avanza el número de ciclos de carga y descarga, provocando que el estado de salud de la celda se vaya deteriorando a medida que aumenta la vida cíclica.

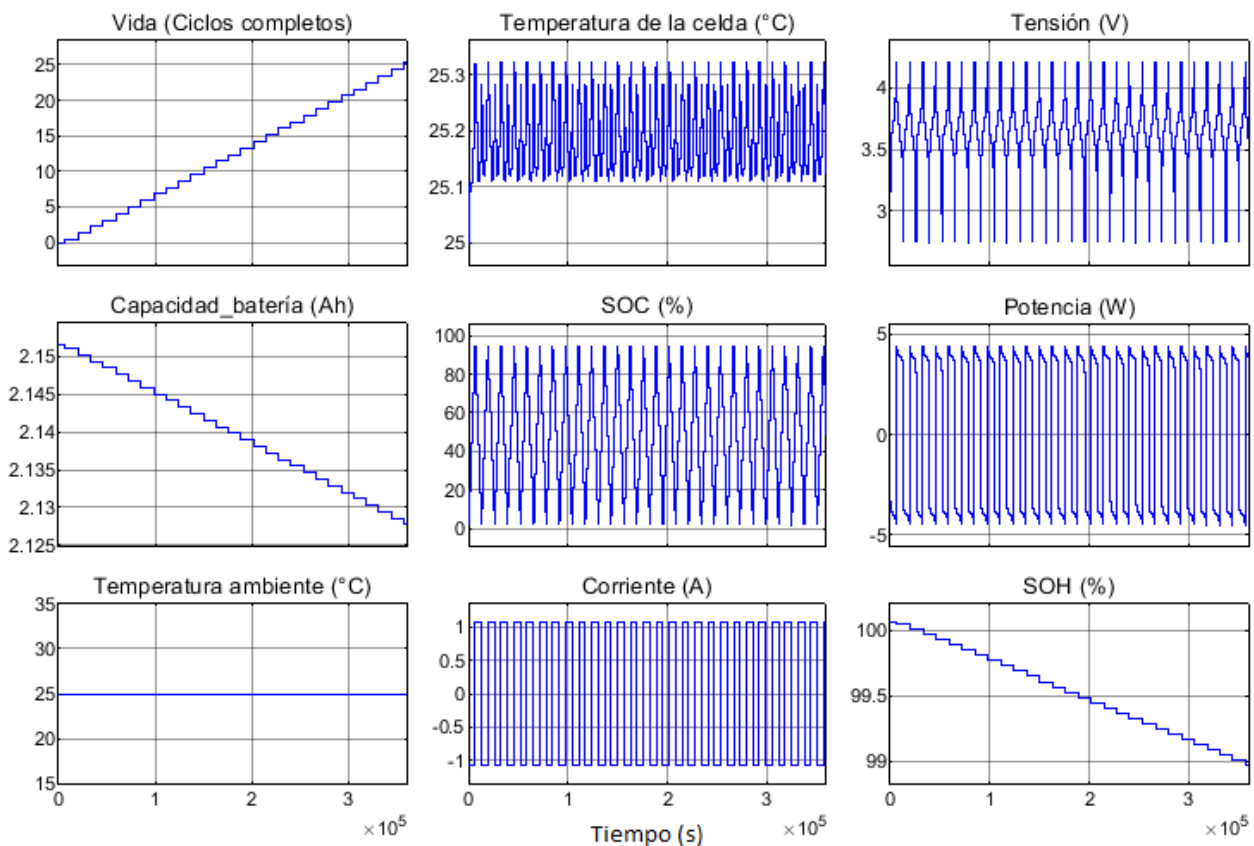


Figura 58: SOH de la batería NMC LG ICR18650 MF1 tras 25 ciclos completos de carga/descarga a corriente constante, equivalentes a 100 horas de ensayos en un banco real.

A continuación, se quiere estudiar la influencia que puede tener en el estado de salud de la batería la realización de cargas y descargas profundas durante el ciclado. Para ello, se vuelve a simular el sistema anterior a la misma razón de corriente de carga/descarga de $C/2$ y tiempo equivalente de ciclado en un banco de ensayos real (100 horas), pero limitando los valores mínimos y máximos del SOC a 20% y 80% respectivamente.

En la Figura 59 se muestran los resultados obtenidos con los cambios en los valores límites del estado de carga (SOC). Se puede observar que, para el mismo tiempo de simulación, el número total de ciclos completados es menor que cuando se simula con valores extremos del

SOC (valores cercanos a la carga y descarga completa). Hacer que la batería trabaje a niveles de SOC alejados de la carga y descarga completa, permite que la pérdida de capacidad producida por el ciclado sea menor. Esto se debe a que, altos valores de SOC reducen la estabilidad de ambos electrodos y el electrolito, favoreciendo la acumulación de litio sólido en la superficie del electrodo, causando un aumento de la resistencia interna y una pérdida progresiva de la capacidad de la celda al disminuir la cantidad de litio útil. A valores muy bajos de SOC se producen corrosión en los colectores de corriente, afectando de igual forma la capacidad de la batería [6], [32].

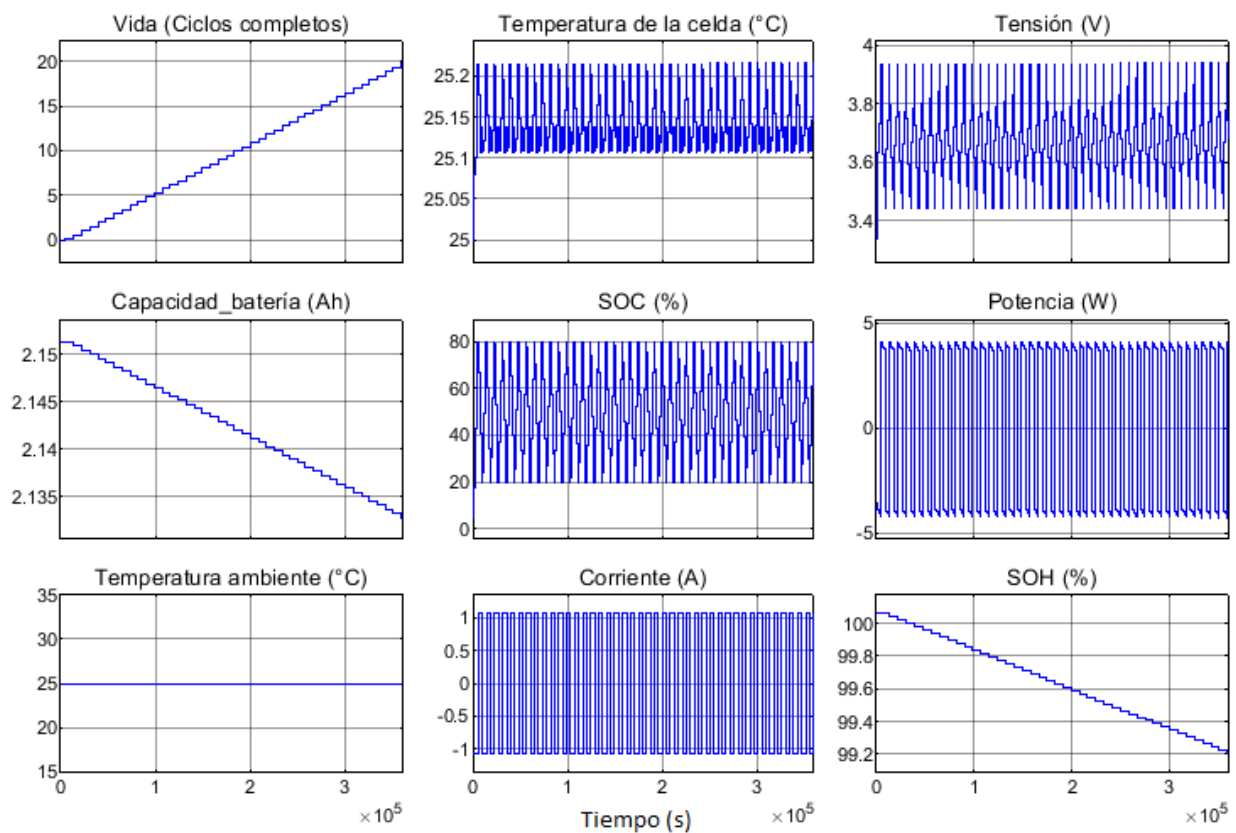


Figura 59: Batería NMC LG ICR18650 MF1 tras 20 ciclos completos de carga/descarga variando el nivel de SOC, equivalentes a 100 horas de ensayos en un banco real.

También se quiere estudiar la influencia que puede tener en el estado de salud de la batería, la velocidad a la que se realizan los procesos de descarga durante el ciclado. Para ello, se vuelve a simular el mismo sistema con el que se viene trabajando en las demostraciones anteriores, a la misma razón de corriente de carga de $C/2$ y tiempo equivalente de ciclado en un banco de ensayos real de 100 horas, pero se restablecen los valores de SOC mínimo y máximos establecidos inicialmente (1% y 99%) y se cambia el perfil de corriente de descarga en el bloque

Stair Generator de la siguiente forma *Time (s)*: $[0 \ 16 \ 26 \ 36] \cdot 10000$ y *Amplitude*: $[1 \ 3 \ 1 \ 1] \cdot 2.15$. Es decir, la descarga se realiza a las razones de corriente 1C y 3C según el vector de tiempo.

En la Figura 60, se puede observar los resultados obtenidos al simular la condición de trabajo descrita con anterioridad.

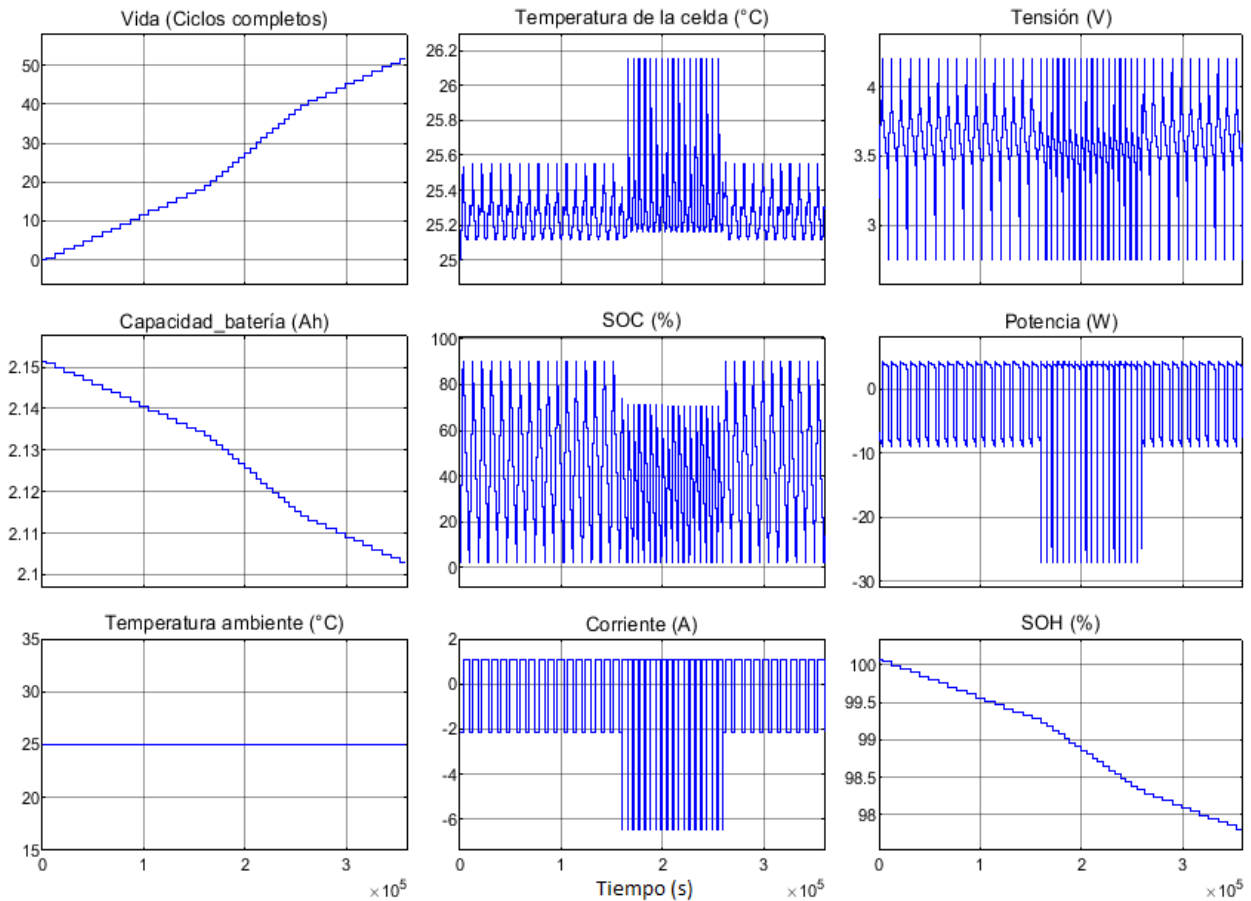


Figura 60: Batería NMC LG ICR18650 MF1 tras 50 ciclos completos de carga/descarga a diferentes velocidades de descarga, equivalentes a 100 horas de ensayos en un banco real.

A partir de los resultados obtenidos en la Figura 60 se puede comprobar que las diferentes tasas de carga/descarga tienen un impacto significativo en la estimación del SOH de la batería. Se puede observar que, al aumentar la velocidad de descarga, en la gráfica de capacidad aparece un punto de inflexión donde comienza a caer más rápidamente, acelerando el envejecimiento de la batería. Esto se debe a que la transformación química requerida en el cátodo no puede mantenerse al ritmo de la corriente extraída, provocando gradientes de concentración abruptos, reacciones químicas no deseadas, así como, cambios en la morfología de los electrodos, afectando tanto la impedancia interna como la capacidad de la celda [6].

6.3.- PL#3. Técnicas de evaluación de la resistencia interna.

El objetivo de esta práctica es determinar cómo puede afectar el aumento de la resistencia interna al rendimiento de la batería. El envejecimiento de la batería, además de la pérdida de capacidad, implica un aumento de la resistencia interna. La capacidad es el principal indicador del estado de salud de una batería, pero puede ser más difícil de verificar sobre la marcha que la resistencia interna. Un valor elevado de resistencia interna hace que la batería se caliente y que caiga la tensión, llegando a la tensión de corte más rápidamente, dejando energía que no es posible descargar en determinadas condiciones o razones de carga [34]. Una lectura alta del valor de la resistencia interna puede dar información sobre el estado de salud de la batería. Como criterio general se toma que, cuando la resistencia ha aumentado su valor en un 20% respecto al que tenía cuando era nueva, la batería ha llegado al final de su vida útil [35].

Uno de los modelos más utilizados para describir o emular el comportamiento de una batería está compuesto por una resistencia óhmica, una reactancia inductiva y una reactancia capacitiva. El término impedancia incluye los tres parámetros anteriores en un modelo. La reactancia inductiva se omite comúnmente porque desempeña un papel insignificante en una batería, especialmente a baja frecuencia. Por tanto, los elementos básicos para describir el comportamiento de una batería se muestran en la Figura 61 y son: las resistencias R_1 (óhmica) y R_2 (transferencia de carga), así como el condensador C [36].

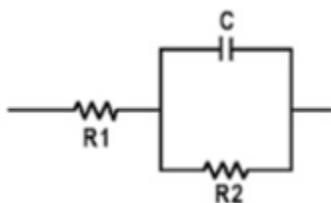


Figura 61: Modelo básico para describir el comportamiento de una batería. Fuente [36].

El valor de resistencia interna de la batería se puede ver afectado por varios factores como pueden ser la temperatura y el envejecimiento por ciclado. Para medir el valor de la resistencia interna existen varios métodos, fundamentalmente se utilizan dos: el método de corriente continua (CC) y el método de corriente alterna (CA). La medida en CC observa la resistencia pura (R_1) mientras que la medida en CA incluye componentes reactivos y proporciona la impedancia (Z). La resistencia óhmica es la misma mediante el método de medida en corriente continua (CC) y el método en corriente alterna (CA) [34], [36].

6.3.1.- Medida de IR por método CC.

El método de medida de resistencia interna en corriente continua (CC) mide la caída de tensión a una corriente dada. La batería recibe una descarga durante unos pocos segundos y un voltímetro mide la tensión de circuito abierto (OCV) sin carga, seguido de una segunda lectura con una carga; mediante la ley de Ohm se calcula el valor de la resistencia como la diferencia de tensión dividida por la corriente. También se puede aplicar un método alternativo para medir la resistencia interna en CC, que consiste en aplicar dos descargas secuenciales a diferentes razones de corrientes y de diferentes duraciones de tiempo, calculando el valor de la resistencia como $R = \frac{\Delta V}{\Delta I}$ [36], [37].

El método de carga de CC tiene limitaciones, ya que ve la batería como una resistencia y solo puede proporcionar referencias óhmicas. Sin embargo, es el método preferido para estimar la resistencia interna en baterías que alimentan cargas de CC, proporcionando resultados realistas en este tipo de aplicaciones.

Con el objetivo de medir la resistencia interna de una batería bajo diferentes condiciones de funcionamiento mediante el método CC, se crea la estructura mostrada en la Figura 62. Dicha estructura permite medir los valores de corriente y tensión a la salida de la batería a diferentes razones de corriente y niveles del SOC, necesarios a la entrada del bloque *Matlab Function* que controla la fuente de corriente para realizar la descarga de la celda y calcula el valor de la resistencia interna a partir de los parámetros de entrada. A continuación, se detalla el procedimiento desarrollado dentro de ese bloque.

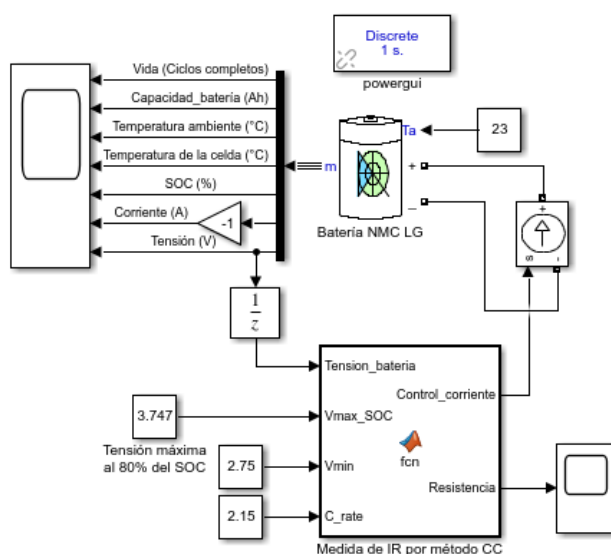


Figura 62: Estructura para medir la resistencia interna de una batería por método CC.

En el bloque *Matlab Function* se crea la función llamada *Medida de IR por método CC* que calcula el valor de la resistencia interna de la batería utilizando el método alternativo explicado con anterioridad, realizando mediciones de la tensión a diferentes corrientes de descarga. A la entrada de la función *Medida de IR por método CC* se tiene la tensión a la salida de la batería, el valor de tensión máxima al nivel del SOC en el que se quiere realizar la medición de la resistencia interna, la capacidad nominal y la tensión mínima de descarga recomendada por el fabricante en la hoja de características. La salida de la función controla la fuente de corriente y muestra el valor medido de resistencia interna.

A continuación, se muestra el código programado dentro de la función para el cálculo de la resistencia interna de la batería, por el método CC:

```
function [Control_corriente,Resistencia] = fcn(Tension_bateria,Vmax_SOC,Vmin,C_rate)

persistent Tension;
if isempty(Tension)
    Tension=0;
end
persistent puntero;
if isempty(puntero)
    puntero=1;
end
persistent resistencia;
if isempty(resistencia)
    resistencia=0;
end
Vector_corriente_descarga=[-C_rate, -C_rate/2,-C_rate/2,0];
```

//Al inicio de la función se declaran e inicializan tres variables de tipo persistentes: la variable *Tension* que permitirá almacenar la tensión medida durante el pulso de corriente del método CC, la variable *resistencia* que almacenará el valor de resistencia interna calculado durante el pulso de corriente y la variable *puntero* que permite recorrer el vector de corriente de descarga. Como se puede observar en el vector de corrientes de descarga, inicialmente la batería se descarga a una razón de 1C y a continuación se cambia la velocidad de descarga a C/2.

```
if (Tension_bateria<=Vmax_SOC)&&(Tension_bateria~=0)&&(puntero~=2)
    puntero=puntero+1;
    Tension=Tension_bateria;
    resistencia=0;
```

//Inicialmente la batería comenzará la descarga según la razón de corriente de la primera posición del vector de corrientes de descarga. Esta descarga se realiza hasta que la tensión a la salida de la batería se iguale con la tensión máxima establecida para el SOC objeto de estudio y la variable *puntero* esté próxima a posición dos del vector de corriente de descarga. Cuando se

cumplan esas condiciones se almacena en la variable *Tensión* el valor medido de tensión a la salida de la batería en ese momento.

```
else
  if puntero==2
    resistencia=(Tension_bateria-Tension)/(C_rate-C_rate/2);
    puntero=puntero+1;
  end
end
```

//Si el valor de la variable *puntero* es igual a dos, comienza el pulso de corriente de descarga a $C/2$ y la resistencia interna de la batería se calcula como la diferencia entre el valor de tensión medido en el momento actual (a $C/2$) y el valor de tensión medido al final de la descarga a la razón de corriente C , que se encontraba almacenado en la variable *Tension*; ambos valores divididos por las respectivas razones de corriente a los que se obtuvieron.

```
if (puntero==3)&&(Tension_bateria<=Vmin)
  puntero=puntero+1;
  resistencia=0;
end
if (puntero>=4)
  resistencia=0;
  puntero=4;
end
Control_corriente=Vector_corriente_descarga(puntero);
Resistencia=resistencia;
end
```

//Si el valor de variable *puntero* es tres, se continúa realizando la descarga de la batería hasta que se alcanza el valor mínimo de tensión establecido a la entrada de la función. Si por algún motivo el valor de la variable *puntero* supera el valor cuatro, se fuerza a que tome ese valor que corresponde con la cuarta posición del vector de corrientes de descargas, que marca cero amperios y el fin de la simulación. A la salida de la función se tendrá el valor de la resistencia interna medido en cada posición del vector de corriente, así como la respectiva señal de corriente que va a la fuente de corriente controlada.

Con la estructura creada anteriormente, se quiere realizar la medición de la resistencia interna de la batería NMC LG ICR18650 MF1 mediante el método CC al inicio de su vida útil (parámetro de ajuste del modelo *Initial battery age* = 0) y a las condiciones nominales a las que se realizó el ajuste del modelo (temperatura ambiente y temperatura de la celda 23°C). La parametrización del modelo para la batería NMC LG ICR18650 MF1 es similar a la mostrada en la Figura 53, pero cambiando el valor de SOC inicial al 100%.

También es necesario definir el nivel del SOC al que se quiere realizar la medición de la resistencia (80% en este caso) y establecer el valor de tensión a dicho nivel, como se explicó durante la creación de la función *Medida de IR por método CC*. El valor de la tensión máxima al 80% del SOC se obtiene midiendo sobre la curva de descarga (inicialmente a 23°C y al inicio de su vida útil) obtenida mediante la estructura creada en la Figura 57, a la corriente de descarga de 2.15A. El valor que corresponde a ese nivel de SOC es aproximadamente 3.747V, tal y como se muestra en la Figura 63.

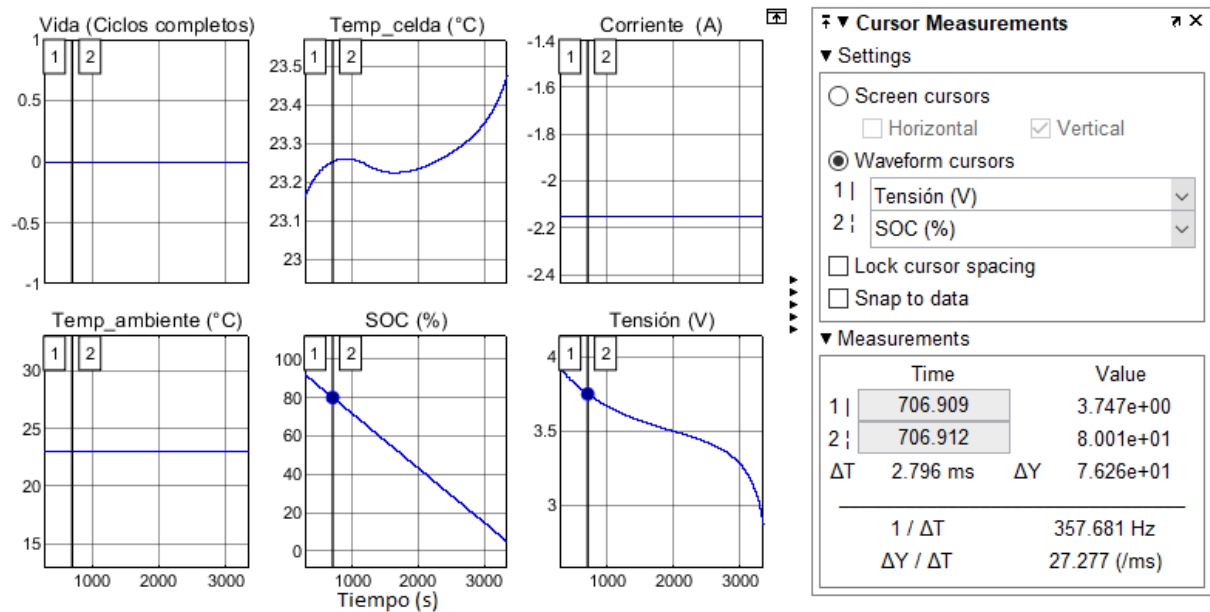


Figura 63: Obtención del parámetro de entrada Tensión máxima al 80% del SOC en la función *Medida de IR por método CC*, a 23°C y ciclo cero.

En la Figura 64 se puede observar el valor de la resistencia interna medido en la batería NMC LG ICR18650 MF1, considerando que se encuentra al inicio de su vida útil y a una temperatura ambiente de 23°C. Se puede comprobar que el resultado obtenido mediante simulación es muy parecido al introducido durante la parametrización del modelo (0.0362Ω) lo que verifica que la función creada funciona de forma correcta, ya que, al encontrarse todavía al inicio de su vida, el valor de resistencia interna de la batería debería ser igual al nominal.

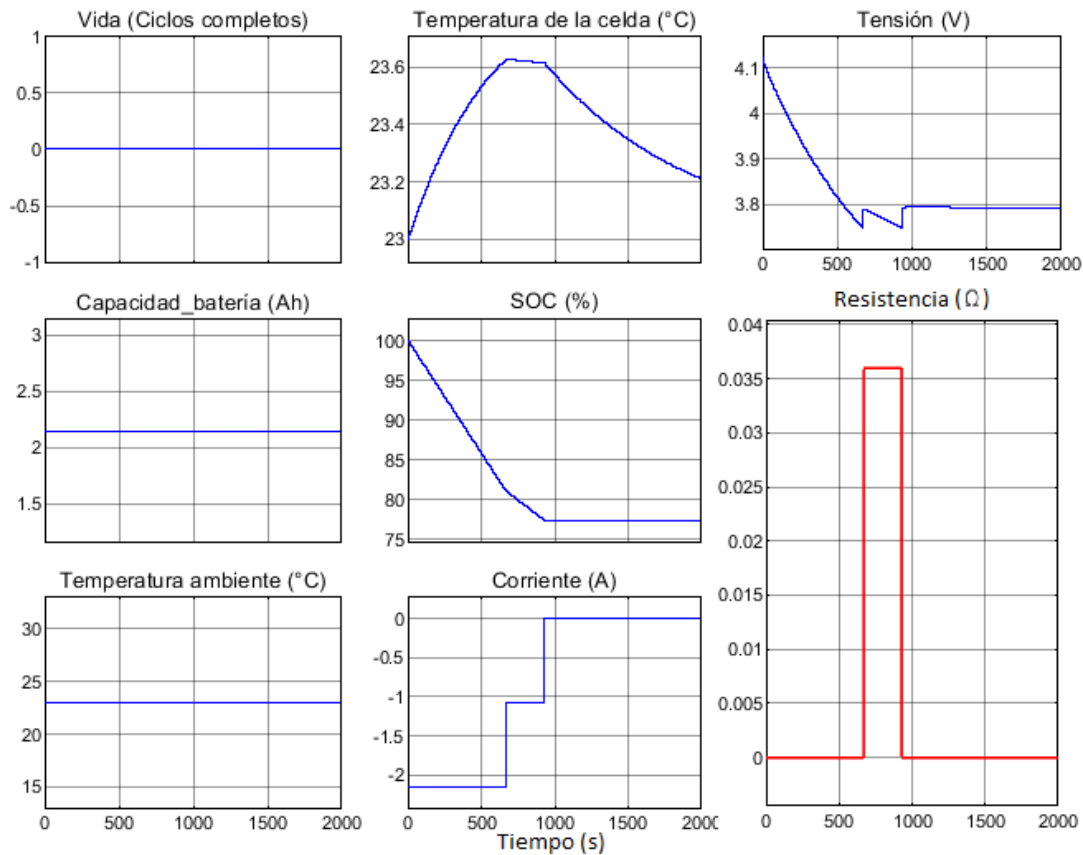


Figura 64: Medida de resistencia interna por método CC en la batería NMC LG ICR18650 MF1, al inicio de su vida útil.

Con el objetivo de comprobar la influencia de las variaciones de la temperatura ambiente en la resistencia interna de una batería, se vuelve a realizar la medición de la resistencia interna de la celda anterior (NMC LG ICR18650 MF1), en un primer momento, disminuyendo la temperatura ambiente y la temperatura interna de la celda hasta los 10°C y posteriormente elevando ambas temperaturas hasta los 55°C. Según el procedimiento explicado con anterioridad, se obtiene que los valores de tensión para el SOC del 80%, en estas nuevas condiciones de trabajo, son de 3.69V a 10°C y 3.78V a 55°C.

Los resultados obtenidos al medir la resistencia interna de la batería en cuestión, a 10°C, se muestran en la Figura 65. Se puede comprobar que, al disminuir la temperatura, el valor de la resistencia interna de la batería ha aumentado respecto al que tenía a 23°C, debido a la disminución de la cinética de las reacciones químicas en la celda. Este aumento en el valor de la resistencia interna provoca una disminución del rendimiento de la batería [38].

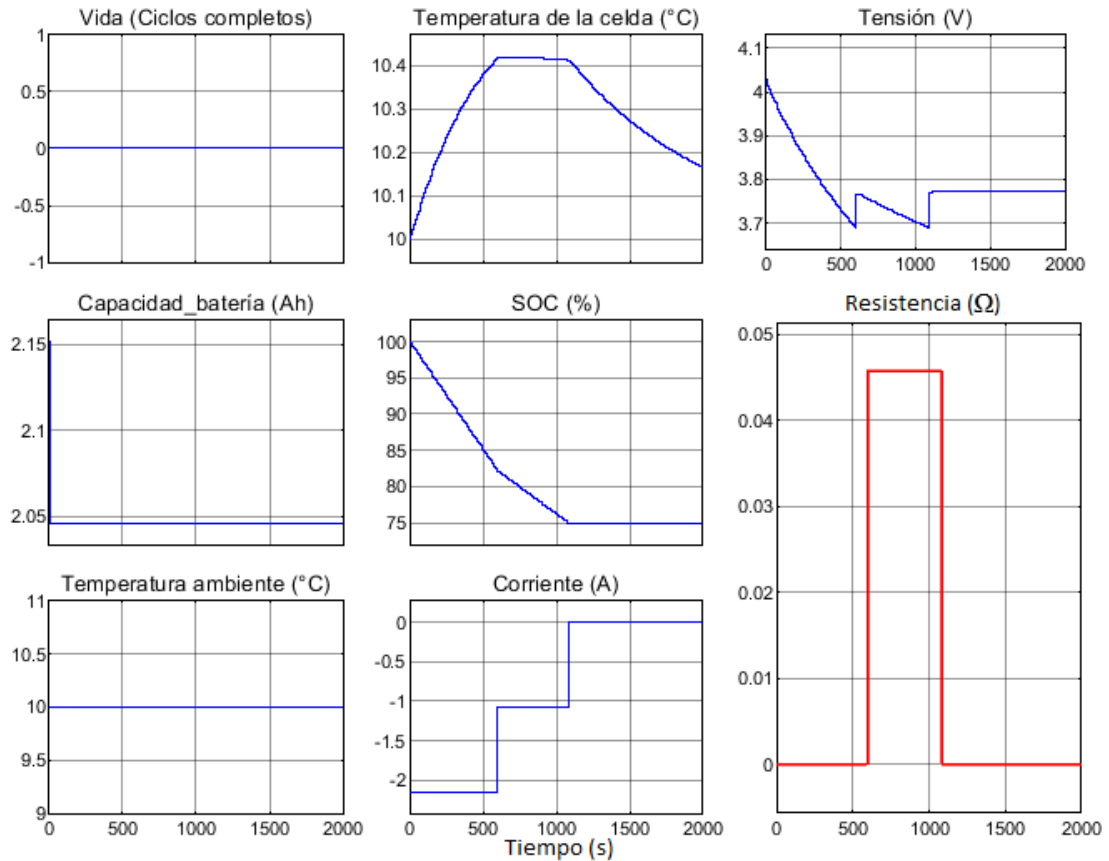


Figura 65: Medida de resistencia interna por método CC en la batería NMC LG ICR18650 MF1, a 10°C.

En la Figura 66 se muestra la medida de resistencia interna de la batería NMC LG ICR18650 MF1 cuando se aumenta la temperatura hasta los 55°C. Se puede observar que, al aumentar la temperatura el valor de la resistencia ha disminuido respecto al que tenía a 23°C, dado que a mayor temperatura la velocidad de las reacciones químicas aumenta, aumentando la movilidad iónica y permitiendo que la batería asimile un poco más de capacidad que a 23°C, aunque sacrificando vida útil. El funcionamiento a una temperatura más alta puede causar la degradación de los elementos que componen la batería y provocar su destrucción en casos extremos [8].

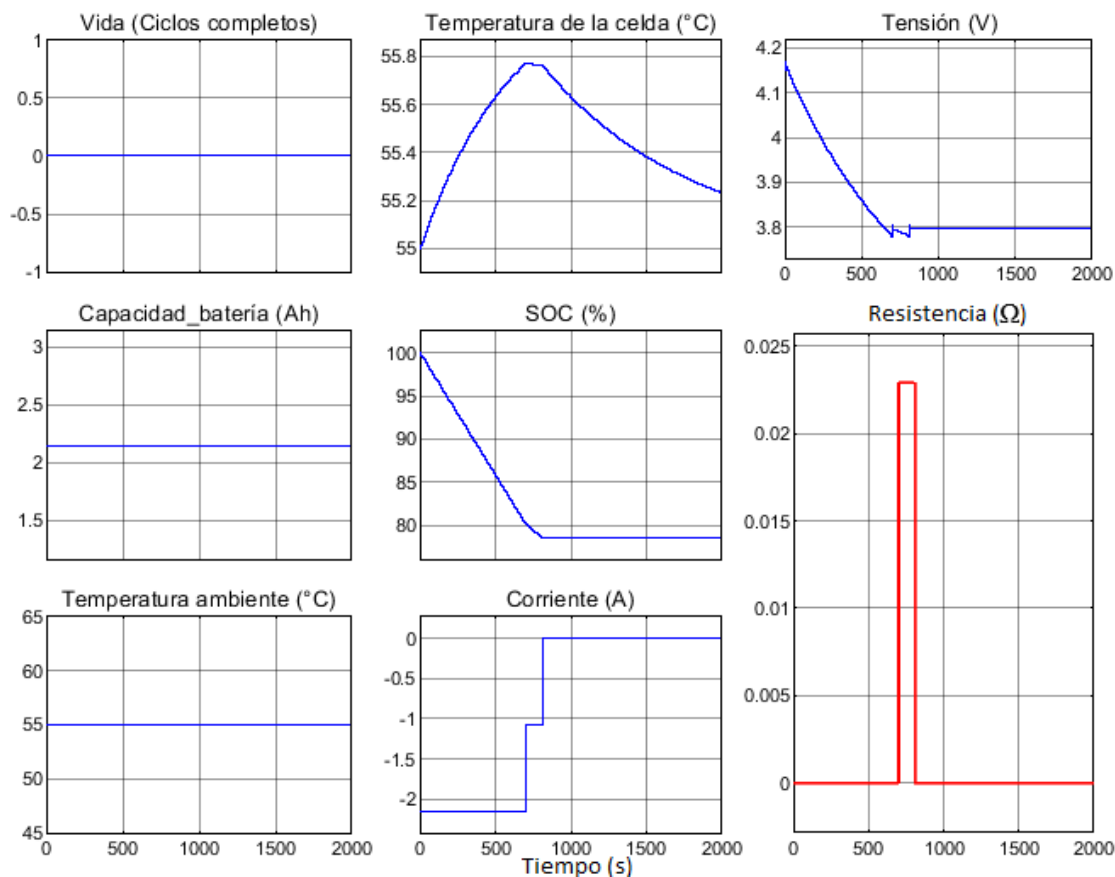


Figura 66: Medida de resistencia interna por método CC en la batería NMC LG ICR18650 MF1, a 55°C.

Por último, se quiere analizar el efecto que provoca el envejecimiento por ciclado en la resistencia interna de la batería. Para ello, se realiza la medición de la resistencia interna de la batería NMC LG ICR18650 MF1, tras 1200 ciclos completos de carga/descarga (parámetro de ajuste del modelo *Initial battery age* = 1200). Para este caso se obtiene que el valor de tensión al 80% del SOC es de 3.925V, aproximadamente.

En la Figura 67 se muestra el valor de la resistencia interna obtenido por el método CC para la batería en cuestión, tras 1200 ciclos de carga/descarga. Se puede observar que la resistencia interna ha aumentado debido a la degradación que sufre la propia batería durante su uso. En este caso se puede ver que, por el elevado valor de resistencia interna medido en este ciclo (mayor que el 20% de la resistencia al inicio de su vida útil), la batería se encuentra al final de su vida útil.

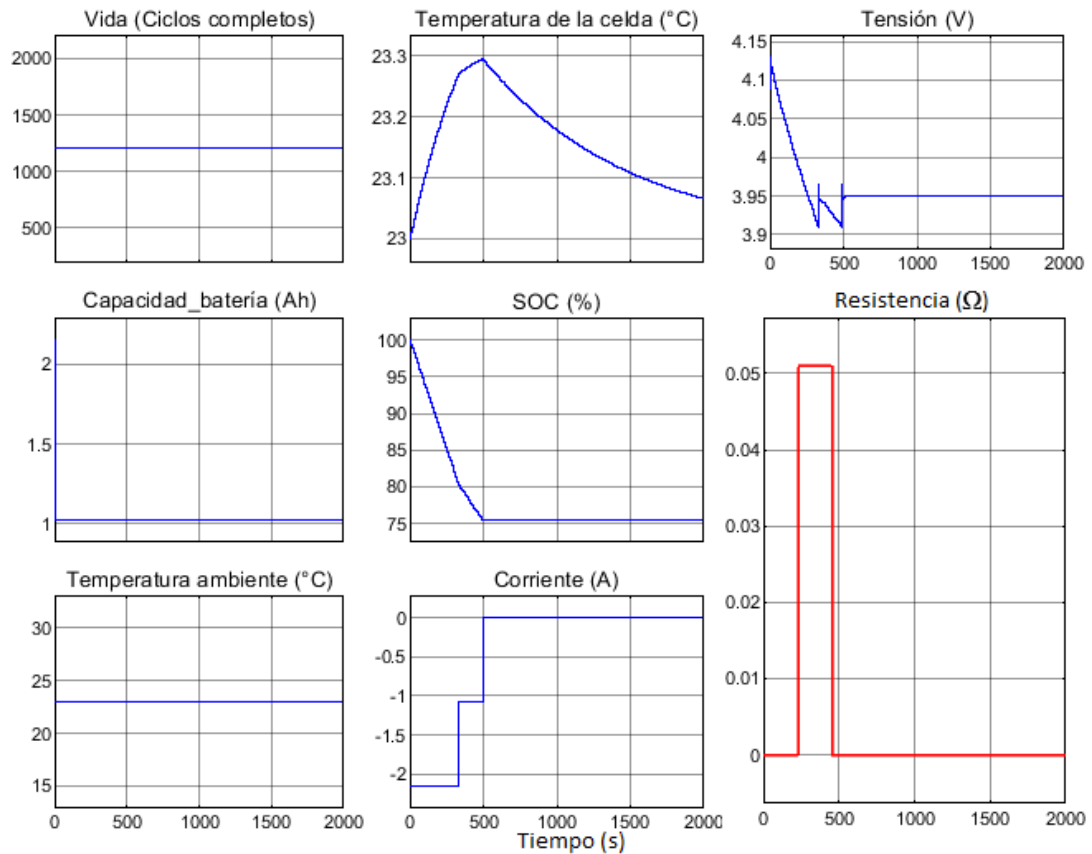


Figura 67: Medida de resistencia interna por método CC en la batería NMC LG ICR18650 MF1, tras 1200 ciclos de carga/descarga.

6.3.2.- Medida de IR por método AC.

Otro método muy común para medir la resistencia interna de una batería es el método AC. Este método consiste en excitar la batería con una señal de corriente alterna a frecuencia constante y calcular la resistencia mediante la ley de Ohm. A diferencia del método CC, la medida realizada en AC incluye componentes reactivos y proporciona la impedancia (Z). Típicamente las mediciones se llevan a cabo a 1 kHz, ya que, idealmente la batería no presenta comportamientos capacitivos/inductivos ante dicha frecuencia. De esta forma se mediría solamente la resistencia óhmica, que fue lo mismo que se midió con el método CC [36], [37].

Al igual que se realizó con el método de medida de resistencia interna en CC en el epígrafe anterior, se desea analizar la influencia de diferentes condiciones de trabajo en la resistencia interna de la batería, utilizando el método en CA. Para ello se crea la estructura mostrada en la Figura 68, la cual consiste en una fuente de corriente alterna en serie con el modelo de baterías.

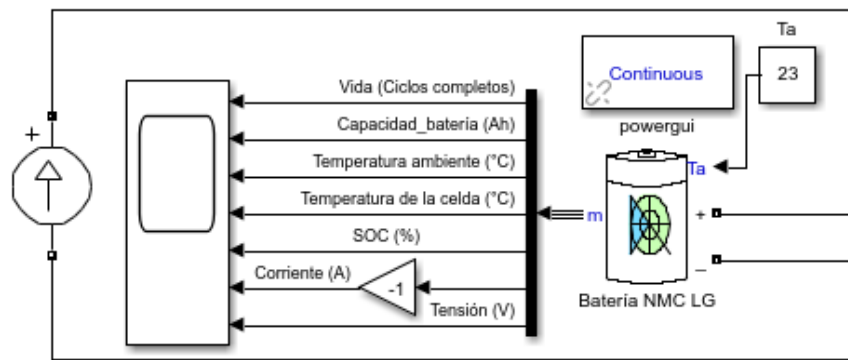


Figura 68: Estructura para medir la resistencia interna de una batería por método AC.

La fuente de corriente alterna se parametriza a la frecuencia de 1KHz y con una amplitud del pico de corriente de 1A, tal y como se muestra en la Figura 69.

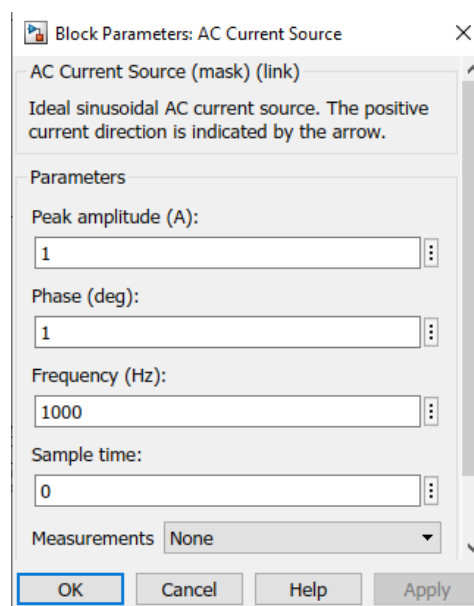
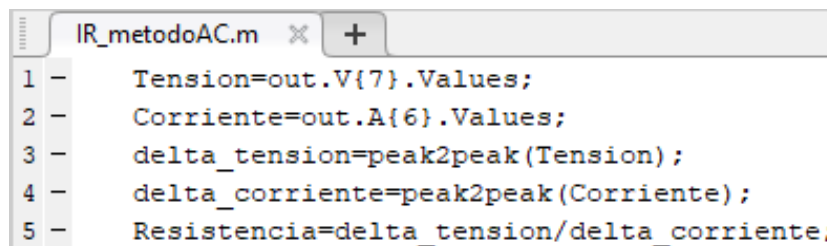


Figura 69: Parametrización de la fuente de AC.

Para obtener de forma automática el valor de la resistencia interna a partir de la estructura creada, se implementan en un Script titulado *IR_metodoAC* las instrucciones mostradas en la Figura 70.



```
1 - Tension=out.V{7}.Values;  
2 - Corriente=out.A{6}.Values;  
3 - delta_tension=peak2peak(Tension);  
4 - delta_corriente=peak2peak(Corriente);  
5 - Resistencia=delta_tension/delta_corriente;
```

Figura 70: Cálculo del valor de la resistencia interna por el método AC.

Dicho *Script*, permite leer las señales de tensión y corriente una vez terminada la simulación, y calcular la diferencia máxima a mínima de dichas señales mediante la función *peak2peak*. El valor de la resistencia (en ohmios) se obtiene como la variación de la tensión dividido por la variación de la corriente.

Con la estructura creada, se quiere medir la resistencia interna mediante el método AC de la misma batería NMC LG ICR18650 MF con la que se trabajó en el epígrafe anterior, con los mismos parámetros de ajuste y bajo las mismas condiciones de funcionamiento: inicio de su vida útil (23°C), disminución de la temperatura de trabajo a 10°C, aumento de la temperatura de trabajo hasta 55°C y tras 1200 ciclos completos de carga/descarga; con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con ambos métodos.

En la Figura 71 se muestra el valor de la resistencia interna medido en la batería NMC LG ICR18650 MF1, considerando que se encuentra al inicio de su vida útil (parámetro de ajuste del modelo *Initial battery age* = 0) y a la temperatura de 23°C. Se puede comprobar que, al igual que con el método CC, el valor de resistencia obtenido es similar al introducido durante la parametrización del modelo a las condiciones nominales, lo que indica que mediante la simulación de este método de medida en AC se han obtenido resultados realistas.

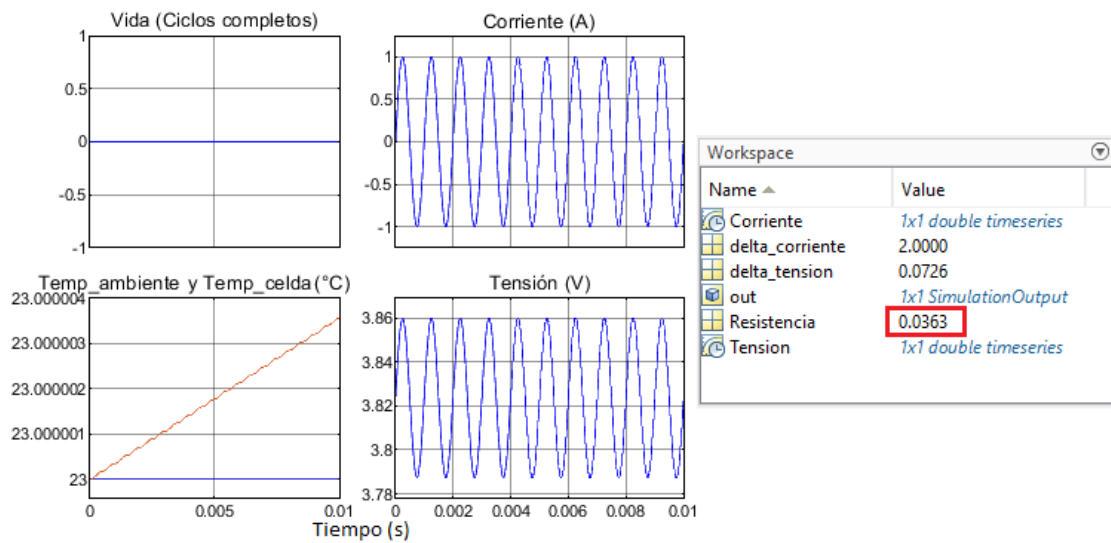


Figura 71: Medida de resistencia interna por método AC en la batería NMC LG ICR18650 MF1, al inicio de su vida útil.

En la Figura 72 se muestra la medición de la resistencia interna en la batería NMC LG ICR18650 MF1 al disminuir la temperatura ambiente y la temperatura interna de la celda hasta los 10°C. Se puede observar que el valor de la resistencia interna de la batería ha aumentado respecto al que tenía a 23°C, al igual que ocurría con la medida tomada por el método CC. Al disminuir la temperatura, las reacciones químicas son más lentas debido a que la difusión es menor, provocando una disminución en la capacidad y, por tanto, el aumento de la resistencia interna de la batería.

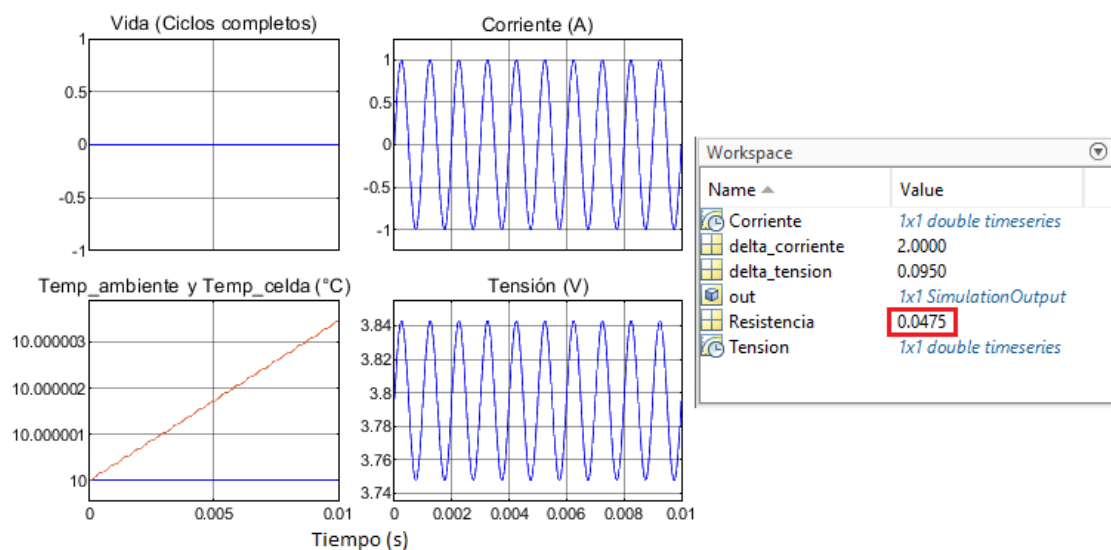


Figura 72: Medida de resistencia interna por método AC en la batería NMC LG ICR18650 MF1, a 10°C.

En la Figura 73 se muestra el valor de la resistencia interna medido por el método AC en la batería NMC LG ICR18650 MF1, en este caso, elevando la temperatura ambiente y la temperatura de la celda hasta los 55°C. Se puede ver que al aumentar la temperatura, el valor de la resistencia interna ha disminuido respecto al que tenía a 23°C ya que la disipación de energía por medios térmicos es menor y la batería puede asimilar más carga [18]. Este comportamiento fue similar en la medida tomada con el método CC.

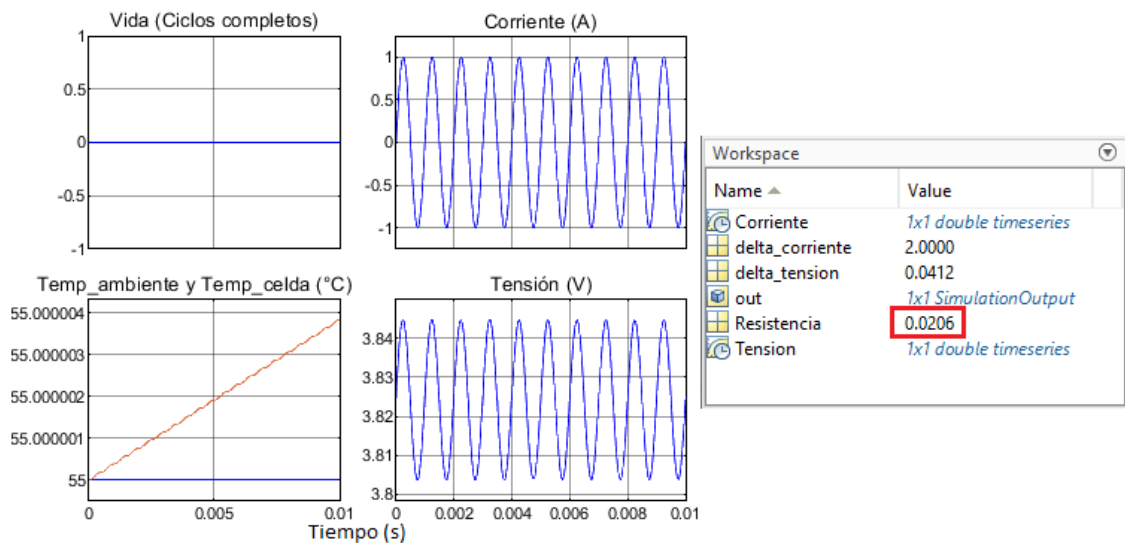


Figura 73: Medida de resistencia interna por método AC en la batería NMC LG ICR18650 MF1, a 55°C.

Por último, en la Figura 74 se muestra la medición de la resistencia interna de la batería NMC LG ICR18650 MF1 mediante el método AC, tras 1200 ciclos completos de carga/descarga a 23°C (parámetro de ajuste del modelo *Initial battery age* = 1200). Se puede observar que el valor de la resistencia interna ha aumentado con el ciclado de batería (al igual que con el método CC). En este caso se comprueba que el valor de la resistencia interna tras 1200 ciclos ha aumentado más del 20% del valor que tenía al principio de su vida útil, lo que indica que ya no es apta para ser utilizada en determinadas aplicaciones.

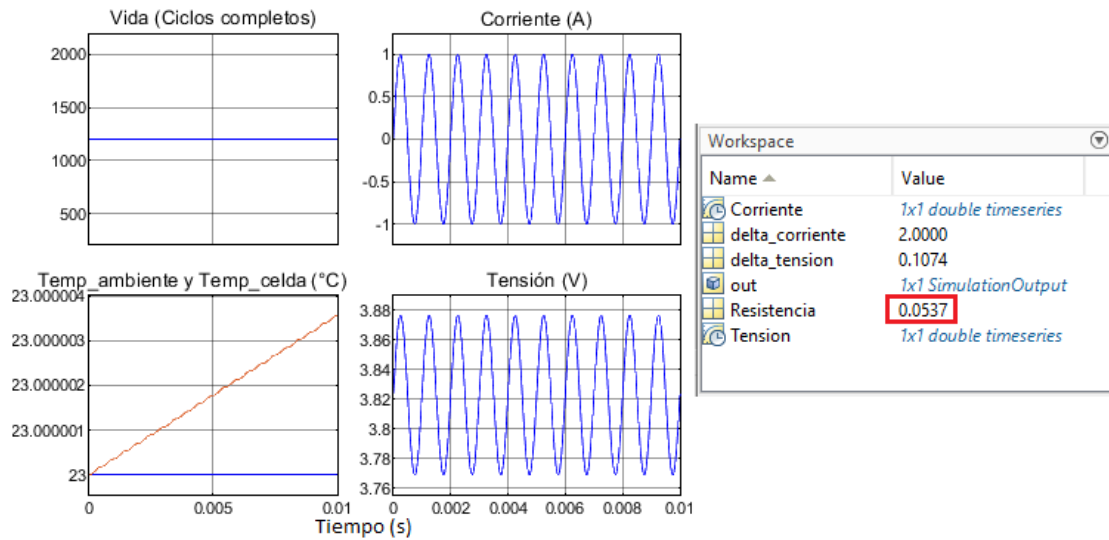


Figura 74: Medida de resistencia interna por método AC en la batería NMC LG ICR18650 MF1, tras 1200 ciclos de carga/descarga.

De las medidas de resistencia interna realizadas a la batería NMC LG ICR18650 MF1 ante las diferentes condiciones de funcionamiento analizadas, se puede concluir que los resultados obtenidos por el método CC y por el método AC son consistentes entre sí. Además, se demostró la validez de las estructuras creadas para la implementación de ambos métodos, brindando resultados realistas de medida de la resistencia interna.

6.4.- Conclusiones.

La resistencia interna y la retención de capacidad son los principales parámetros a tener en cuenta para predecir el estado de salud de una batería. En muchas ocasiones no se cuenta con los medios, ni el tiempo necesario para la realización de experimentos que ayuden a predecir el estado de salud y el comportamiento en general de las baterías ante ciertas condiciones de funcionamiento. Las actividades propuestas en este capítulo, utilizando el modelo de baterías disponible en el programa MATLAB/Simulink®, permiten estudiar el funcionamiento de diferentes tecnologías de baterías ante una serie de parámetros y condiciones de trabajo, de forma rápida y sin necesidad de utilizar equipos o procesos complejos.

En este capítulo se comprobó la influencia de la temperatura y el envejecimiento por ciclado, así como el impacto de las altas velocidades de carga/descarga, en el funcionamiento y el estado de salud de la batería. Para ello, se crearon y programaron una serie de indicadores a partir de los cuales se obtuvieron parámetros que no aporta el modelo como: la capacidad real al

final de cada ciclo, la potencia, la energía, el Generador de Ciclos, el Banco de Ensayos Real y la medida de resistencia interna por el método CC y AC. Además, se simuló el comportamiento de un pack de baterías, compuesto por varias celdas en serie y/o paralelo.

7.- Dimensionamiento y selección del sistema de almacenamiento en una aplicación industrial.

Las baterías tienen tiempos de respuesta casi instantáneos, motivo por el cual juegan un papel fundamental en la integración con energías renovables. La intermitencia de las fuentes de energías renovables debido a las condiciones climáticas o las variaciones diurnas pueden mitigarse con el respaldo de los sistemas de almacenamiento de energía. Además, las baterías tienen un tamaño que permite una ubicación flexible a lo largo de su vida útil [22] .

Una de las aplicaciones de las baterías en los sistemas de energías renovables, más específicamente en los sistemas fotovoltaicos, es su utilización para suministrar energía a los sistemas de seguimiento solar que permiten el movimiento de los paneles solares a lo largo del día para seguir la trayectoria del sol.

El correcto dimensionamiento de las baterías utilizadas en esta aplicación es fundamental para el funcionamiento del sistema, ya que se pueden presentar condiciones meteorológicas adversas que pueden hacer que los paneles tengan que realizar recorridos bruscos y la batería tiene que ser capaz de proporcionar la autonomía necesaria para la realización de estos movimientos.

A continuación, se realiza el dimensionamiento de un sistema de almacenamiento basado en baterías de litio-ion para suministrar la energía necesaria a un prototipo de sistema de seguimiento solar perteneciente a la empresa *Reneergy by ASTURMADI GROUP*.

En un principio se había previsto que esta tarea tuviera un mayor peso dentro del trabajo, pero debido a la situación actual provocada por la COVID-19 se dificultaron las actividades a realizar con la empresa colaboradora. Además, debido a las restricciones de acceso a la universidad fue imposible la realización de ensayos, necesarios para abarcar todos los objetivos que se habían fijado inicialmente.

7.1.- Seguidor solar autoalimentado in-situ en una aplicación industrial.

Reneergy by ASTURMADI GROUP es una empresa fundamentalmente dedicada al diseño, fabricación e instalación de estructuras para sistemas fotovoltaicos. Actualmente las

instalaciones que realiza la empresa requieren grandes obras para el sistema de cableado encargado de suministrar la potencia y el control necesarios para el correcto funcionamiento del sistema de seguimiento solar. Estas obras civiles suelen ser caras y difíciles de coordinar, por lo que la empresa se ha planteado la utilización de baterías para suministrar la energía necesaria para alimentar el circuito de potencia (motor-reductor) y la electrónica asociada al sistema de seguimiento solar. La utilización de baterías para alimentar el sistema de seguimiento solar permite minimizar la obra civil, reduciendo tiempos de ejecución y reduciendo costes. Además, permite reducir las tareas de mantenimiento, sin la necesidad de mano obra especializada.

El prototipo de sistema de seguimiento solar diseñado por la empresa está compuesto por una parte fija (la estructura metálica) y una parte móvil sobre la que se encuentran los paneles solares, que debe permanecer perpendicular a los rayos del sol durante todo el día. La estructura del seguidor solar soporta el peso de los paneles solares, el motor de posicionamiento angular, la tarjeta de control que hace posible el seguimiento del sol y el mecanismo hidráulico que permite el movimiento de los paneles, tal y como se puede observar en la Figura 75.



Figura 75: Prototipo de sistema de seguimiento solar.

En el sistema en cuestión, la rotación de la superficie de captación se realiza sobre un eje horizontal con respecto al piso y el soporte que sirve como eje de rotación es compartido por dos paneles. Mediante un programa se conoce en qué punto debería estar el sol a cada hora y los paneles apuntan a dicha posición. El seguimiento, en este caso, depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del sol en cualquier momento.

El prototipo de sistema de seguimiento solar autoalimentado in-situ que propone la empresa, se basa en un pequeño panel solar tipo *SunPerfect Solar CRM200S156P-60* (200W, 35.6V) destinado a la carga de la batería. Dicha batería alimenta un motor DC de imanes

permanentes (90W, 24V) encargado de mover, mediante el mecanismo hidráulico, los paneles solares para que en todo momento estén alineados con el ángulo de incidencia del sol.

La batería tiene que ser capaz de alimentar al motor cuando este se encuentre moviendo los paneles, ya sea porque se esté realizando el seguimiento solar o, cuando los paneles necesiten pasar a posición de defensa (posición horizontal) debido a condiciones climatológicas adversas. Además, debe ser capaz de alimentar los elementos electrónicos y de control del sistema, aunque el consumo de estos es muy bajo comparado con el del motor. El proceso de carga de la batería se realiza durante las horas de sol, manteniéndola en régimen de flotación, es decir, una vez cargada se mantiene indefinidamente en la fase de tensión constante (CV).

La situación donde el motor demanda más energía de la batería ocurre cuando se mueven los paneles desde la posición donde quedaron al final del día (oeste) hasta la posición donde los paneles quedan completamente horizontales y luego, a la mañana siguiente, se mueven desde la posición horizontal hasta el este para que los paneles queden alineados con los rayos del sol y comenzar el seguimiento solar, tal y como muestra la Figura 76. Estos recorridos son los que consumen mayor energía, ya que, el recorrido realizado por los paneles es mayor y a la hora en los que se producen, la irradiancia ya es muy baja y no se carga la batería.

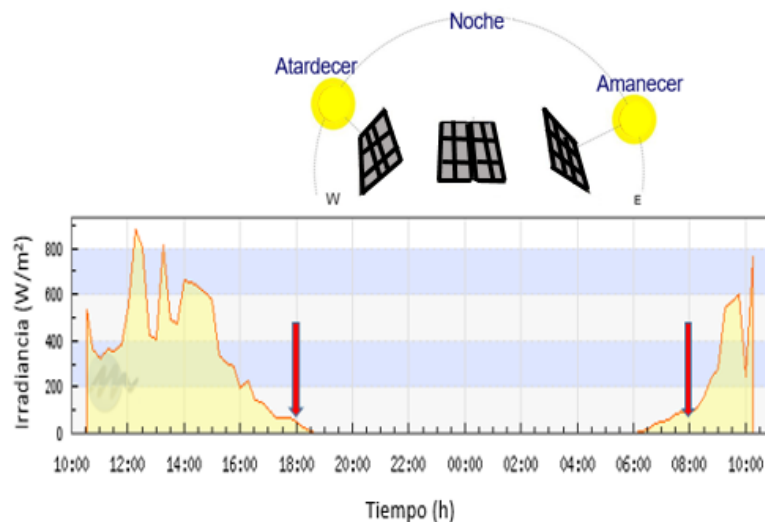


Figura 76: Valores típicos de irradiancia durante todo un día, en Gijón .Situación donde se demanda mayor energía de la batería.

7.2.- Dimensionamiento del sistema de almacenamiento.

Para realizar el dimensionamiento del sistema de almacenamiento es necesario conocer el consumo del motor al realizar el movimiento de los paneles. Para ello, se midió la corriente a

la salida del motor utilizando una resistencia *shunt* y la tensión en los terminales del mismo, tal y como se muestra en la Figura 77. Mediante la tarjeta de adquisición de datos *NI-usb-6343* de *National Instruments* se realizó la captura de los datos a lo largo de un día de funcionamiento del sistema.

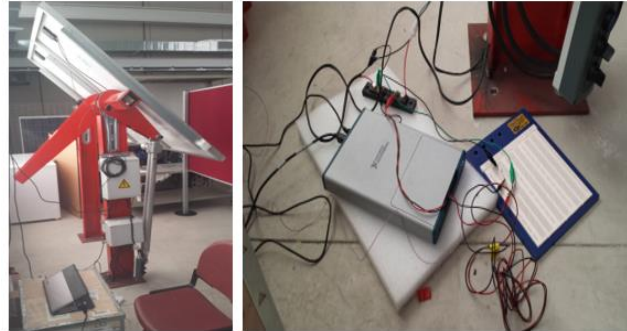


Figura 77: Medición y adquisición de los valores de corriente y tensión en el motor.

Para la obtención de los valores de tensión y corriente en cada instante en el motor, fue necesario la creación de un programa en LabVIEW® cuyo objetivo consiste en obtener los datos de la tarjeta de adquisición y guardarlos en un archivo Excel para su posterior análisis, como se puede observar en la Figura 78.

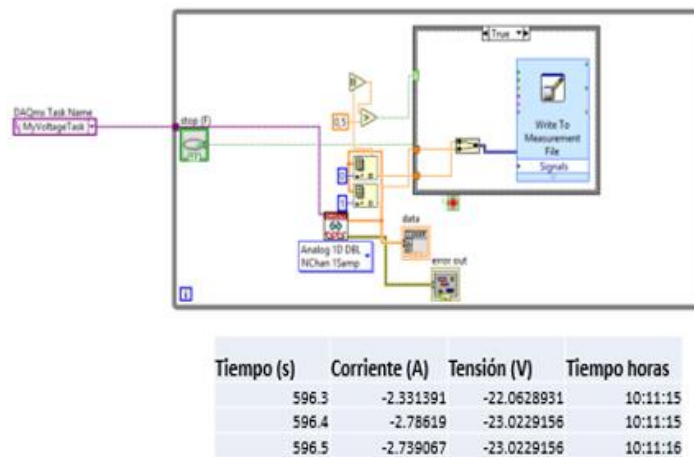


Figura 78: Programa creado en LabVIEW® para la adquisición de datos.

En la Figura 79 se muestra el perfil de corriente a la salida del motor a lo largo de todo un día de funcionamiento, obtenido a partir del prototipo real del sistema de seguimiento solar facilitado por la empresa. Como se puede observar, los movimientos de los paneles se traducen

en una serie de pulsos de corriente a lo largo del día, con una duración total aproximada de 420 segundos y a una corriente media de 2 A (sin tener en cuenta los picos de corriente que se producen cuando se activa el motor) lo que implica un consumo aproximado de 0.3Ah/día, que representan unos 7.2Wh/día, a 24V.

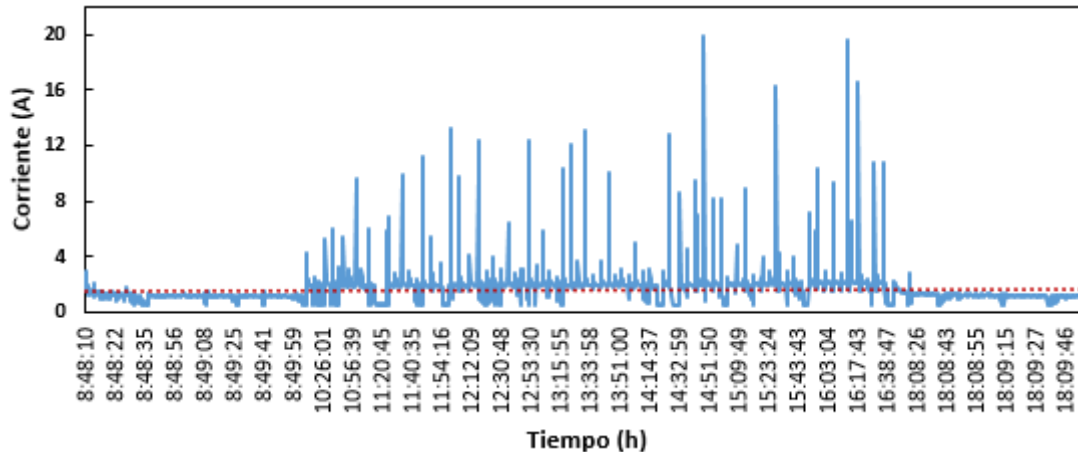


Figura 79: Perfil de corriente a la salida del motor a lo largo de un día.

Teniendo en cuenta que la capacidad de la batería se obtiene a partir de la siguiente expresión [39]:

$$Cap = \frac{L * N}{DOD * \eta c}$$

Donde L son los Ah necesarios por día, N es el número de días de autonomía, DOD es la profundidad de descarga y ηc es la eficiencia debido a la pérdida en los cables.

Suponiendo una profundidad de descarga (DOD) del 80%, que la pérdida en los cables es de un 10% y que se quiere que el sistema tenga autonomía para 7 días, se obtiene que sería necesario utilizar una batería de 3Ah. Considerando la influencia que tiene la temperatura sobre la capacidad de la batería y considerando que los paneles tengan que pasar de forma imprevista a la posición de defensa (totalmente horizontal) debido a la existencia de condiciones climatológicas adversas, situación que demandaría una mayor energía de la batería ya que el recorrido que tienen que hacer los papeles es mayor y con mayor fuerza aplicada sobre ellos, se decide sobredimensionar la batería hasta los 7.5Ah. Este sobredimensionado permite garantizar una vida útil más larga ya que el DOD al que será sometida la batería es mucho menor que el utilizado en el cálculo inicial.

A partir del dimensionamiento realizado con anterioridad, la empresa decidió comprobar el funcionamiento de la batería LFP SLAUMXLI7.5-12 de litio-hierro-fosfato con 7.5Ah y 12.8V de capacidad y tensión nominal, en la aplicación en cuestión. Dado que la tensión nominal del motor es de 24V se deciden utilizar dos baterías en serie.

7.3.- Simulación del sistema de seguimiento solar auto-alimentado.

Como se explicó en el apartado 7.1, la carga de la batería que alimenta el sistema de seguimiento solar se realiza a partir de un panel solar *SunPerfect Solar CRM200S156P-60* dedicado a este propósito. Dado que la tensión nominal del panel es mayor que la tensión del pack de baterías, es necesario un convertidor reductor (*Buck*) entre ambos. También es necesario un convertidor elevador reductor (*Buck Boost*) entre la batería y el motor, de forma tal, que se garanticen los 24V necesarios para el funcionamiento del motor, tal y como se muestra en la Figura 80. El cálculo de los parámetros de los convertidores *Buck* y *Buck Boost* necesarios para realizar la simulación del sistema de seguimiento solar se realizan según el procedimiento descrito por Rodenas [40], mostrado en el Anexo 2.

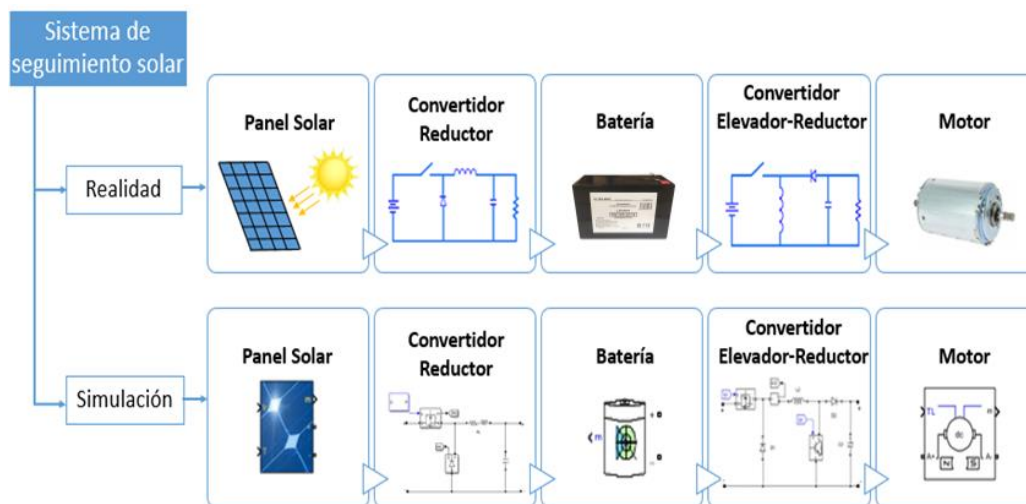


Figura 80: Funcionamiento del sistema de seguimiento solar, prototipo real y simulado.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema de almacenamiento elegido con anterioridad en la aplicación en cuestión, especialmente durante la situación más crítica donde el motor demanda más energía de la batería, se realiza la estructura mostrada en la Figura 81. La estructura creada en el programa MATLAB/Simulink®, simula el funcionamiento del sistema de seguimiento solar, incorporando todos los elementos de electrónica de potencia necesarios.

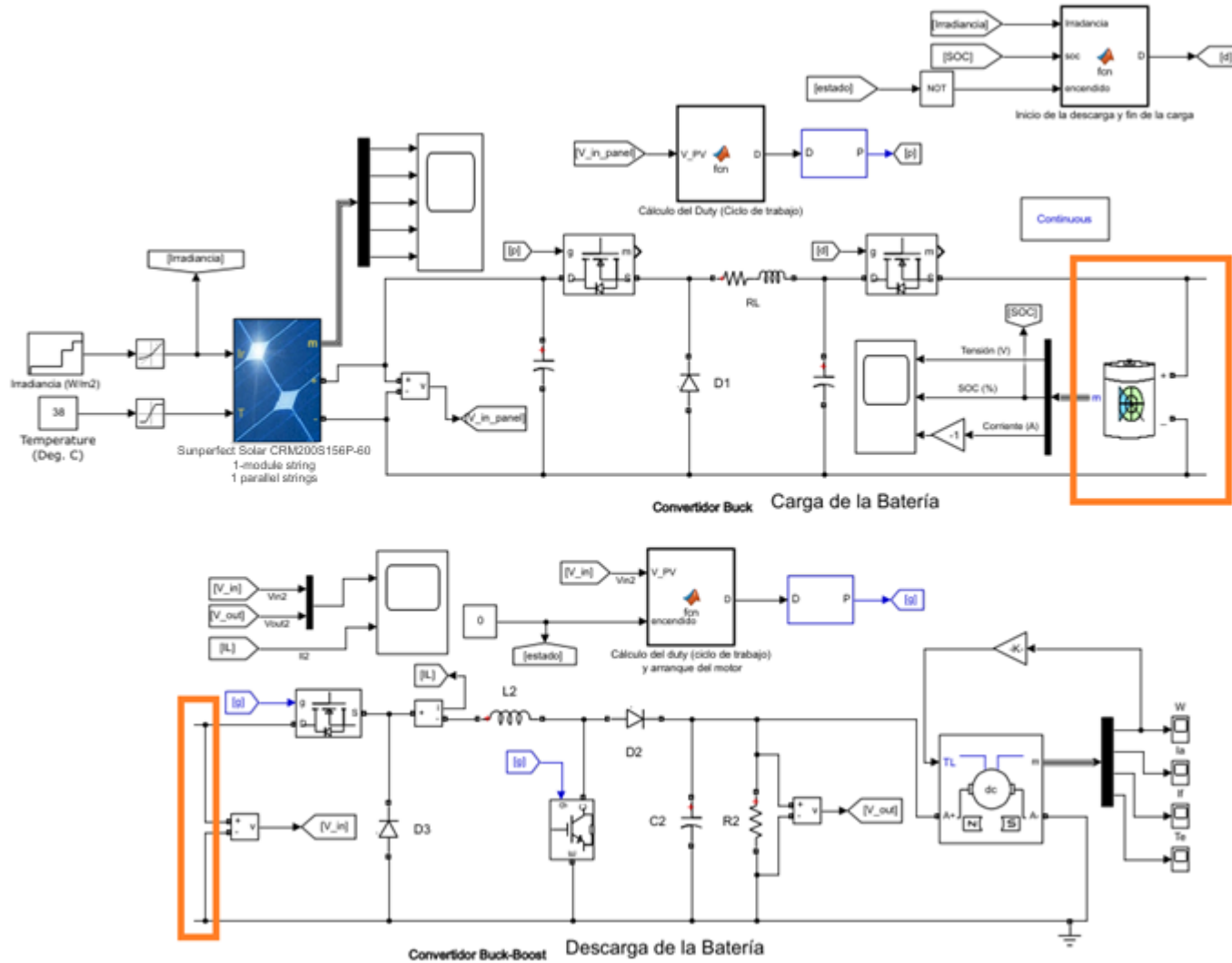


Figura 81: Estructura para la simulación del sistema de seguimiento solar.

En la estructura anterior, el modelo del panel solar se parametriza seleccionando de las varias opciones que trae configuradas por defecto, el modelo *SunPerfect Solar CRM200S156P-60*. El modelo de batería se configura a partir de los datos obtenidos de la hoja de características de la batería LFP SLAUMXLI7.5-12 y de la curva de descarga a corriente nominal del Anexo 1-e). Dichos parámetros se muestran en la Figura 82.

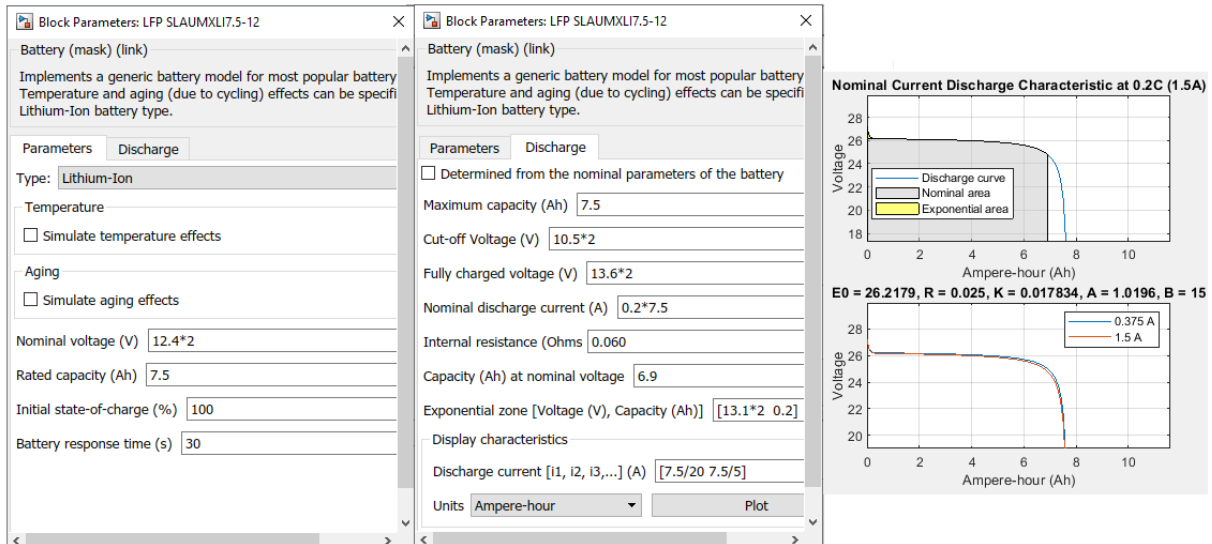


Figura 82: Parámetros de ajuste del modelo para la batería LFP SLAUMXLI7.5-12.

El modelo del motor se parametriza a partir de datos de funcionamiento facilitados por la empresa, tal y como se muestra en la Figura 83.

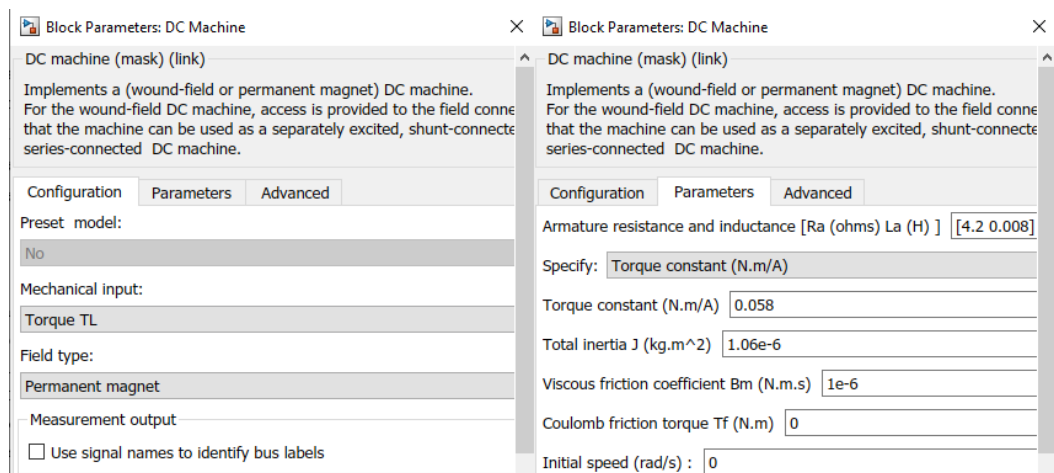


Figura 83: Parámetros de ajuste del modelo del motor.

La carga de la batería se realiza mediante la función *Inicio de la descarga y fin de la carga* si el motor se encuentra fuera de funcionamiento, mientras el valor de la irradiancia no baje de 200W/m^2 y mientras el estado de carga no sea del 100%, tal y como se muestra a continuación:

```
function D = fcn(Irradiancia,soc,encendido)
if (Irradiancia<=200)|| (soc>=99)|| (encendido==0)
D=0;
else
    D=1;
end
end
```

Dicha carga, se realiza a una razón de corriente aproximada de $C/20$ mediante el convertidor reductor y en el momento que se conecte el motor (estado =1), el *mosfert* que se encuentra antes de la batería se abrirá desconectando el circuito de carga. La función *Cálculo del duty* permite controlar el ciclo de trabajo del convertidor reductor a partir de la tensión en los terminales del panel y la tensión máxima del pack de baterías, como se muestra a continuación:

```
function D = fcn(V_PV)
D=(13.6*2)/V_PV;
end
```

La función *Cálculo del duty y encendido del motor* controla el ciclo de trabajo del convertidor elevador-reductor a partir de la tensión de la batería (V_{in}) y la tensión nominal del motor (24V), como se muestra a continuación. El circuito de descarga se activa si la variable *encendido* se encuentra activa (igual a 1), en caso contrario permanecerá desconectado.

```
function D = fcn(V_in,encendido)
if encendido==1
D=24/(V_in+24);
else
D=0;
end
end
```

En la Figura 84 se muestran los resultados obtenidos durante la simulación de unos segundos del proceso de carga del pack de baterías de litio-ion seleccionado en el epígrafe 7.2.-. Se puede observar cómo el estado de carga (SOC) va aumentando a medida que se extrae la energía solar mediante los paneles y se inyecta a la batería mediante el convertidor *Buck*.

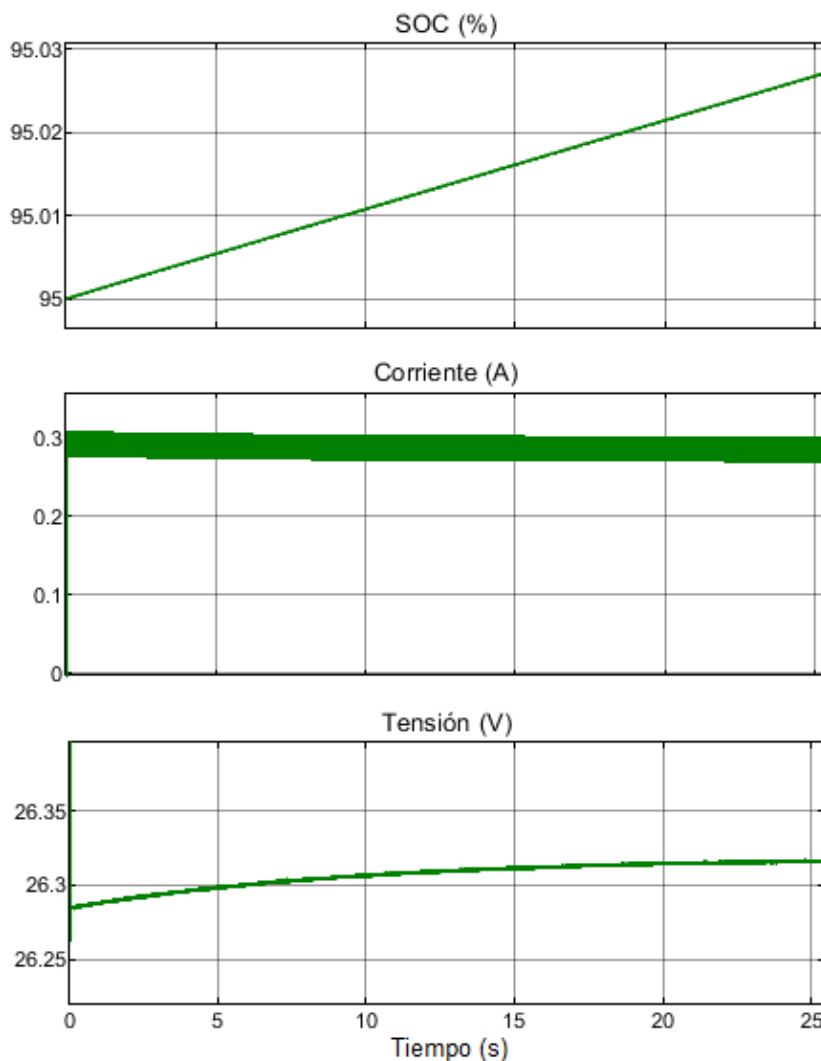


Figura 84: Simulación del proceso de carga del pack baterías LFP SLAUMXLI7.5-12 en el sistema de seguimiento solar.

De los resultados obtenidos del funcionamiento del prototipo proporcionado por la empresa con la tarjeta de adquisición de datos, se tiene que, durante la situación donde el motor demanda mayor energía de la batería (explicada en el epígrafe 7.1.-), esta tendría que ser capaz de alimentar al motor durante los 217 segundos que dura el recorrido de los paneles cuando la irradiancia es tan baja que ya no se realiza la carga de la batería (114,4 segundos desde la posición al final del día a la posición de defensa y 102,1 segundos desde la posición de defensa hasta la posición donde los paneles quedan alineado con los rayos del sol en la mañana). A continuación (Figura 85) se simula la descarga del pack de baterías seleccionado durante este tiempo. Se puede observar cómo se descarga la batería con una corriente de 2A, similar al valor medido durante el funcionamiento del prototipo real. Se puede comprobar que, al término de

este tiempo de simulación, la batería posee un SOC aproximado del 99.2 % lo que indica que durante este recorrido apenas se ha consumido un 0.8% de la carga de la batería.

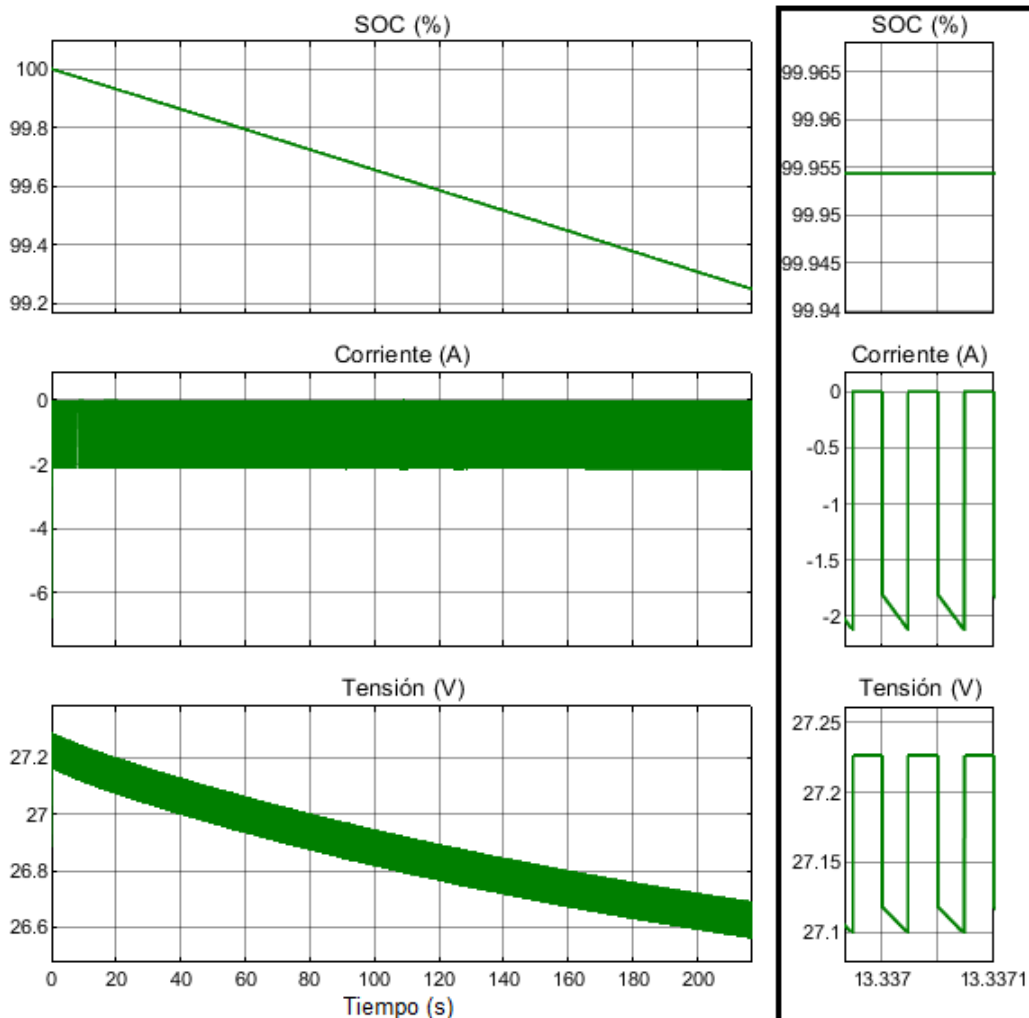


Figura 85: Simulación del proceso de descarga del pack de baterías LFP SLAUMXLI7.5-12 durante la situación donde se demanda mayor energía.

En la Figura 86 se puede comprobar que el convertidor elevador-reductor proporciona a la entrada del motor la tensión necesaria para su funcionamiento (24V). En color rojo se puede observar la tensión a la entrada del convertidor elevador-reductor y en color azul la tensión a la salida del mismo.

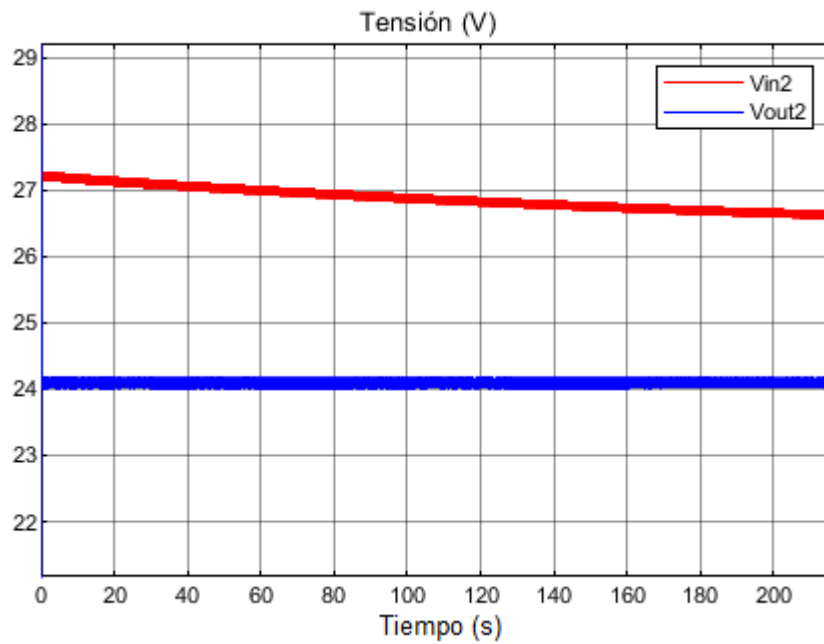


Figura 86: Tensión a la entrada y salida del convertidor Buck Boost.

Dado que, de las mediciones realizadas al prototipo real de sistema de seguimiento solar, se tiene el perfil de corriente demandado por el motor a lo largo del día para mover los paneles (Figura 79), se realiza una simulación donde dicho perfil se pasa directamente a una fuente de corriente que simula la demanda del motor. La estructura creada en la Figura 87 permite agilizar la simulación al quitar los circuitos de potencia y verificar si el pack de baterías seleccionado, es capaz de suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del sistema de seguimiento solar a lo largo de todo un día de trabajo, en ausencia de sol (sin cargar la batería).

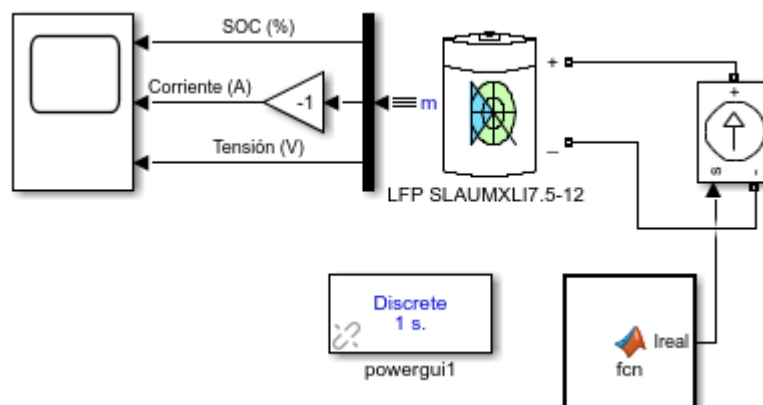


Figura 87: Estructura para simular la descarga de la batería a lo largo de un día de funcionamiento.

Como se puede observar en la estructura anterior, el perfil de corriente real medido en el prototipo, se pasa a la fuente de corriente mediante una función que va recorriendo los vectores de corriente y tiempo, tal y como se muestra a continuación:

```
function Ireal = fcn()
vector_tiempo=[0.0 0.1 0.2 0.3.....415.3 415.4];
corriente=[3.02 1.59 1.80.....1.70 1.79];
L=length(vector_tiempo);
persistent puntero_tiempo;
if isempty(puntero_tiempo)
    puntero_tiempo=1;
end
Ireal=0;
for n=1:L
    if vector_tiempo(n)~= puntero_tiempo
        Ireal= -corriente(n);
    end
end
puntero_tiempo=puntero_tiempo+1;
end
```

En la Figura 88 se muestra la respuesta del pack de baterías LFP SLAUMXLI7.5-12 ante la situación en la que tuviera que alimentar el motor a lo largo de todo un día en ausencia de sol. Se puede observar que al final del día, el SOC ha disminuido hasta el 97% aproximadamente. En todo caso la profundidad de descarga (DOD) es del 3% lo que supone que el pack de baterías elegido tendrá suficiente energía para realizar el movimiento de los paneles durante una semana en ausencia de sol.

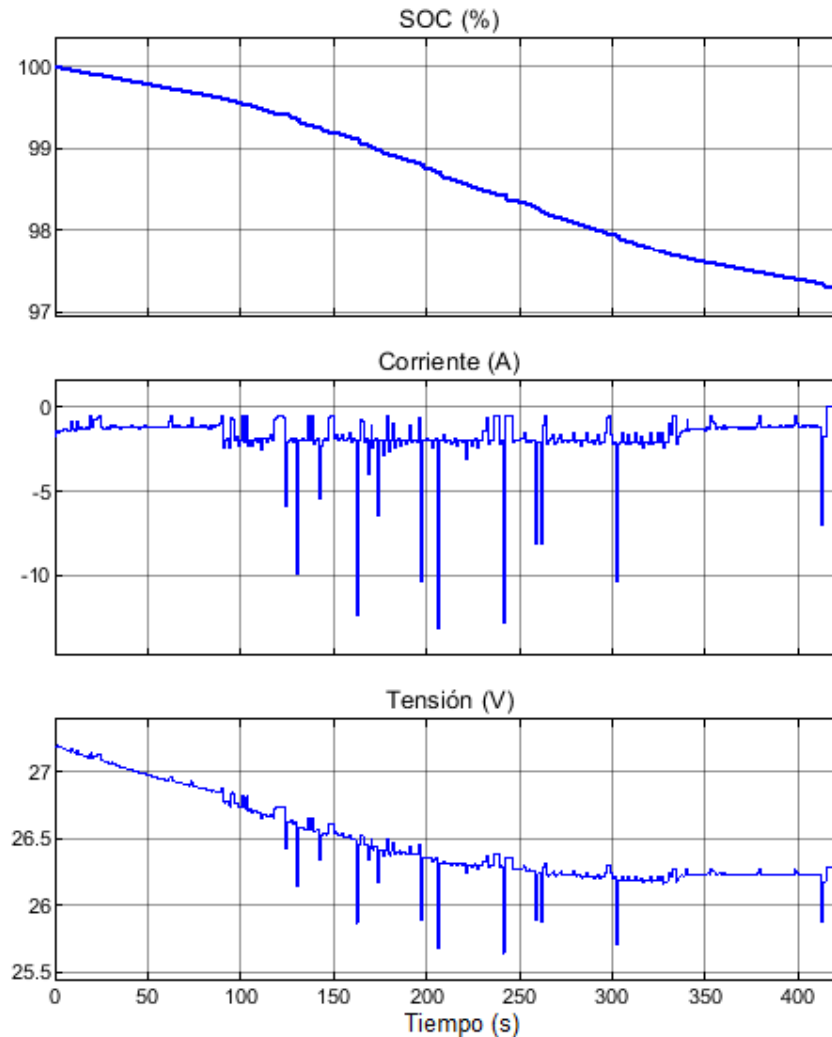


Figura 88: Respuesta de la batería LFP SLAUMXLI7.5-12 ante la situación en la que tuviera que alimentar el motor a lo largo de todo un día en ausencia de sol.

7.4.- Conclusiones.

Los sistemas de almacenamiento, y en especial las baterías, son elementos fundamentales para la integración de energías renovables a pequeña y gran escala. El dimensionamiento de estos sistemas de almacenamiento depende de las aplicaciones concretas donde se vayan a utilizar.

En este capítulo se estudió el funcionamiento de un sistema de seguimiento solar diseñado por la empresa *Reneergy by ASTURMADI GROUP* con el objetivo de realizar el dimensionamiento de un sistema de almacenamiento basado en baterías de litio-ion, capaz de alimentar el circuito de potencia y la electrónica asociada al sistema.

Las simulaciones del sistema de seguimiento solar autoalimentado permitieron comprobar el funcionamiento de la batería seleccionada, demostrando que dicha batería puede proporcionar la energía necesaria para realizar el movimiento de los paneles en las condiciones analizadas.

8.- Conclusiones generales

En este trabajo se realizó una revisión bibliográfica sobre el funcionamiento, propiedades y composición de las diferentes baterías secundarias, haciendo énfasis en las tecnologías de litio-ion ya que presentan características superiores al resto de tecnologías en cuanto a: energía específica, rendimiento, comportamiento térmico, densidad de energía, entre otras.

También se realizó una comparación entre las principales características de las diferentes tecnologías de baterías de litio-ion presentes en el mercado actual, señalando las ventajas, desventajas y aplicaciones de cada una.

Además, se realizó una descripción del modelo de baterías presente en el software MATLAB/Simulink®, así como de cada uno de los parámetros de entrada a partir de los cuales se simula el comportamiento de una batería.

Para un mejor ajuste del modelo al comportamiento real de las baterías de litio-ion, además de utilizar hojas de características del fabricante, fue necesario la realización de experimentos en los bancos de ensayos existentes en el laboratorio de baterías del Área de Tecnología Electrónica de la Universidad de Oviedo. Con estos fines se diseñaron protocolos de ensayos a diferentes razones de corriente y diferentes temperaturas de funcionamiento. Con los datos obtenidos se definieron los ajustes del modelo para las diferentes baterías objeto de estudio.

Para realizar los procesos de carga y descarga de las baterías se creó una estructura de banco de ensayos virtual, capaz de simular protocolos de ensayos como los realizados en los equipos de potencia disponibles en el laboratorio. Adicionalmente fue necesaria la programación de una serie de funciones y estructuras en MATLAB® para realizar medidas de: energía, potencia, estado de salud, resistencia interna, entre otros. También se diseñaron y programaron estructuras para realizar ciclados de envejecimiento.

Tanto el modelo, como las estructuras creadas se utilizaron en la realización de una serie de prácticas de laboratorio virtuales a partir de las cuales se pudo observar y estudiar el comportamiento de una serie de tecnologías de baterías ante diferentes factores y condiciones de trabajo, tales como: la temperatura, las velocidades de carga/descarga, el nivel del SOC, el envejecimiento por ciclado, el aumento de la resistencia interna, entre otros.

Finalmente se realizó el dimensionamiento de una batería para un sistema de seguimiento solar auto-alimentado, mostrando la utilidad del modelo (debidamente ajustado) y

de las estructuras adicionales creadas en este trabajo. Mediante la simulación del sistema se comprobó que el pack de baterías seleccionado era capaz de suministrar la energía necesaria al motor encargado de realizar el movimiento de los paneles solares, en las condiciones propuestas.

Una vez terminado este trabajo de fin de estudios se proponen las siguientes tareas a desarrollar en el futuro:

Debido a la situación actual creada por la COVID-19 no se pudo profundizar en varios elementos de diseño y funcionamiento que afectan al sistema de almacenamiento en la aplicación industrial de este trabajo (Sistema de seguimiento solar auto-alimentado). Por tanto, sería conveniente realizar la simulación de un sistema real y no de un prototipo, como se realizó en el caso de este trabajo. Este prototipo constaba de dos paneles solares y el sistema real tiene 60 paneles, lo que supondría una mayor demanda de energía y potencia a la batería. Además, sería interesante considerar otros factores que también pueden afectar esta demanda de potencia y energía como, por ejemplo, el movimiento de los paneles con condiciones meteorológicas adversas (viento fuerte y/o nevada intensa).

9.- Bibliografía.

- [1] A. Chakraborty *et al.*, “Layered Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries: Review of Computational Studies on $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ and $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{Al}_y\text{O}_2$,” *Chem. Mater.*, vol. 32, no. 3, pp. 915–952, Feb. 2020.
- [2] D. L. Thomas Reddy, *Linden’s Handbook of Batteries, 4/e (SET 2)*. McGraw-Hill Education Ltd, 2011.
- [3] “Charles-Augustin de Coulomb’s C-Rate for Batteries.” [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate. [Accessed: 04-Jun-2020].
- [4] “BU-1101: Glossary – Battery University.” [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_1101_glossary. [Accessed: 04-Jun-2020].
- [5] M. S. H. Lipu *et al.*, “A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 205. Elsevier Ltd, pp. 115–133, 20-Dec-2018.
- [6] D. Ángel *et al.*, “Modelo para la batería de ion de litio de un vehículo eléctrico”. Fundación Cidaut.
- [7] “Serial and Parallel Battery Configurations and Information.” [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations. [Accessed: 25-Mar-2020].
- [8] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof, and P. J. Ker, “State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations,” *IEEE Access*, vol. 6. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 19362–19378, 20-Mar-2018.
- [9] “Secondary (Rechargeable) Batteries – Battery University.” [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries. [Accessed: 25-Mar-2020].
- [10] K. Liu, K. Li, Q. Peng, and C. Zhang, “A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles,” *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 1. Higher Education Press, pp. 47–64, 01-Mar-2019.
- [11] “Advantages and limitations of the Different Types of Batteries - Battery University.” [Online].

Available:https://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery.

[Accessed: 25-Mar-2020].

- [12] “Lithium-based Batteries Information – Battery University.” [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/lithium_based_batteries. [Accessed: 25-Mar-2020].
- [13] C. Liu, Z. G. Neale, and G. Cao, “Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries,” *Materials Today*, vol. 19, no. 2. Elsevier B.V., pp. 109–123, 01-Mar-2016.
- [14] E. Kamali Heidari, A. Kamyabi-Gol, M. Heydarzadeh Sohi, and A. Ataie, “Electrode Materials for Lithium Ion Batteries: A Review,” *J. Ultrafine Grained Nanostructured Mater.*, vol. 51, no. 1, pp. 1–12, 2018.
- [15] Y. Miao, P. Hynan, A. von Jouanne, and A. Yokochi, “Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements,” *Energies*, vol. 12, no. 6, p. 1074, Mar. 2019.
- [16] C. Julien, A. Mauger, K. Zaghib, and H. Groult, “Comparative Issues of Cathode Materials for Li-Ion Batteries,” *Inorganics*, vol. 2, no. 1, pp. 132–154, Mar. 2014.
- [17] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu, “The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89. Elsevier Ltd, pp. 292–308, 01-Jun-2018.
- [18] F. H. Gandoman *et al.*, “Concept of reliability and safety assessment of lithium-ion batteries in electric vehicles: Basics, progress, and challenges,” *Applied Energy*, vol. 251. Elsevier Ltd, p. 113343, 01-Oct-2019.
- [19] A. Ullah, A. Majid, and N. Rani, “A review on first principles based studies for improvement of cathode material of lithium ion batteries,” *Journal of Energy Chemistry*, vol. 27, no. 1. Elsevier B.V., pp. 219–237, 01-Jan-2018.
- [20] T. Horiba, “Lithium-ion battery systems,” *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 6, 2014.
- [21] K. Kinoshita and K. Zaghib, “Negative electrodes for Li-ion batteries,” in *Journal of Power Sources*, 2002, vol. 110, no. 2, pp. 416–423.
- [22] C. Mao *et al.*, “Selecting the Best Graphite for Long-Life, High-Energy Li-Ion Batteries,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 165, no. 9, pp. A1837–A1845, Jun. 2018.
- [23] H. Zhang, G. G. Eshetu, X. Judez, C. Li, L. M. Rodriguez-Martínez, and M. Armand, “Electrolyte Additives for Lithium Metal Anodes and Rechargeable Lithium Metal Batteries: Progress and Perspectives,” *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 57, no. 46, pp. 15002–15027, Nov. 2018.

- [24] A. K. Chan *et al.*, “Concentrated Electrolytes for Enhanced Stability of Al-Alloy Negative Electrodes in Li-Ion Batteries,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 166, no. 10, pp. A1867–A1874, Jun. 2019.
- [25] X. Q. Zhang, C. Z. Zhao, J. Q. Huang, and Q. Zhang, “Recent Advances in Energy Chemical Engineering of Next-Generation Lithium Batteries,” *Engineering*, vol. 4, no. 6. Elsevier Ltd, pp. 831–847, 01-Dec-2018.
- [26] “MathWorks - Información de la compañía - MATLAB & Simulink.” [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/company/aboutus.html>. [Accessed: 05-Apr-2020].
- [27] K. Thirugnanam, H. Saini, and P. Kumar, “Mathematical modeling of Li-ion battery for charge/discharge rate and capacity fading characteristics using genetic algorithm approach,” in *2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC 2012*, 2012.
- [28] O. Tremblay, L.-A. Dessaint, and A.-I. Dekkiche, “Tremblay, O., Dessaint, L.-A., & Dekkiche, A.-I. (2007). A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. In 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 2A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybri,” in *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007, pp. 284–289.
- [29] “Generic battery model - Simulink - MathWorks España.” [Online]. Available:<https://es.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/battery.html>. [Accessed: 10-Apr-2020].
- [30] L. A. Reche, “Estudio y análisis de modelos matemáticos de baterías de litio-ion, ajuste de parámetros y validación mediante ensayos reales en laboratorio,” Universidad de Oviedo. Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, 2017.
- [31] “Charging Lithium-Ion Batteries – Battery University.” [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries. [Accessed: 19-Apr-2020].
- [32] “BU-1003a: Battery Aging in an Electric Vehicle (EV)– Battery University.’ [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_1003a_battery_aging_in_an_electric_vehicle_ev. [Accessed: 01-May-2020].
- [33] D. Novák, “Design of a Li-ion Battery Pack Emulator,” Sep. 2015.
- [34] “Rising Internal Resistance - Battery University.” [Online]. Available:https://batteryuniversity.com/learn/article/rising_internal_resistance. [Accessed: 30-May-2020].

- [35] N. Omar *et al.*, “Lithium iron phosphate based battery - Assessment of the aging parameters and development of cycle life model,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1575–1585, Jan. 2014.
- [36] “BU-902: How to Measure Internal Resistance – Battery University.” [Online]. Available:https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/how_to_measure_internal_resistance. [Accessed: 31-May-2020].
- [37] H.-G. Schweiger *et al.*, “Comparison of Several Methods for Determining the Internal Resistance of Lithium Ion Cells,” *Sensors*, vol. 10, no. 6, pp. 5604–5625, Jun. 2010.
- [38] S. S. Zhang, K. Xu, and T. R. Jow, “Charge and discharge characteristics of a commercial LiCoO₂-based 18650 Li-ion battery,” *J. Power Sources*, vol. 160, no. 2 SPEC. ISS., pp. 1403–1409, Oct. 2006.
- [39] M. A. Avella, “Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos autónomos.”
- [40] A. López Rodenas and M. Sánchez Estrada, “Estudio, simulación e implementación de estructuras ‘power gyrators’ su control y su aplicación en procesado de energía,” *Escola d’Enginyeria de Barcelona Est - E. T. Industrial, especialitat en Electrònica Industrial*, 2012.

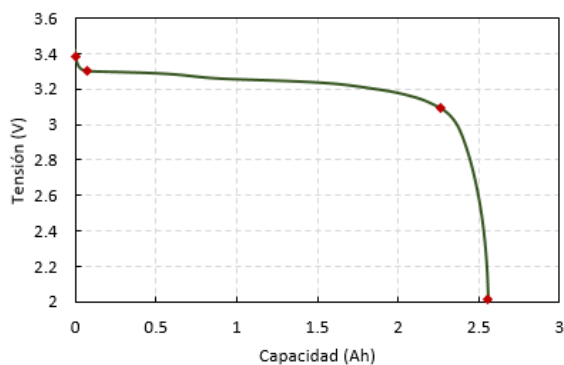
10.- Anexo 1.

a) Parámetros de ajuste del modelo para la batería LFP ANR26650M1-B:

ANR26650M1-B TECHNICAL DATA	
Cell Dimensions	ø26 x 65 mm
Cell Weight	76g
Cell Capacity (nominal/minimum) (0.5C Rate)	2.5/2.4 Ah
Voltage (nominal)	3.3V
Internal Impedance (1kHz AC typical)	6mΩ
Power*	2600 W/kg
Recommended Standard Charge Method	2.5A to 3.6V CCCV, 60 min
Recommended Fast Charge Method to 80% SOC	10A to 3.6V CC, 12 min
Maximum Continuous Discharge	50A
Maximum Pulse Discharge (10 seconds)	120A
Cycle Life at 20A Discharge, 100% DOD	>1,000 cycles
Operating Temperature	-30°C to 55°C
Storage Temperature	-40°C to 60°C



Curva de descarga a 0.5C

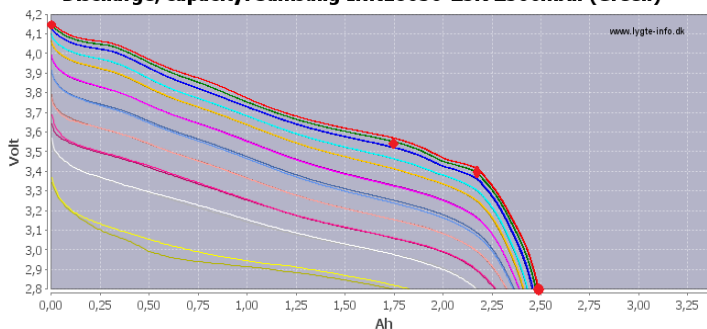


b) Parámetros de ajuste del modelo para la batería NMC SAMSUNG INR18650-25R:

Nominal specifications	
Item	Specification
3.1 Nominal discharge capacity	2,500mAh Charge: 1.25A, 4.20V, CCCV 125mA cut-off, Discharge: 0.2C, 2.5V discharge cut-off
3.2 Nominal voltage	3.6V
3.3 Standard charge	CCCV, 1.25A, 4.20 ± 0.05 V, 125mA cut-off
3.4 Rapid charge	CCCV, 4A, 4.20 ± 0.05 V, 100mA cut-off
3.6 Charging time	Standard charge: 180min / 125mA cut-off Rapid charge: 60min (at 25°C) / 100mA cut-off
3.7 Max. continuous discharge (Continuous)	20A (at 25°C), 60% at 250 cycle
3.8 Discharge cut-off voltage (End of discharge)	2.5V
3.9 Cell weight	45.0g max
3.10 Cell dimension	Height: 64.85 ± 0.15mm Diameter: 18.33 ± 0.07mm
3.11 Operating temperature (surface temperature)	Charge: 0 to 50°C (recommended recharge release < 45°C) Discharge: -20 to 75°C (recommended re-discharge release < 60°C)
Initial internal impedance	
Initial internal impedance measured at AC 1kHz after standard charge	
Initial internal impedance	≤ 18mΩ



Discharge, capacity: Samsung INR18650-25R 2500mAh (Green)



c) Parámetros de ajuste del modelo para la batería NMC SAMSUNG INR18650-35E:

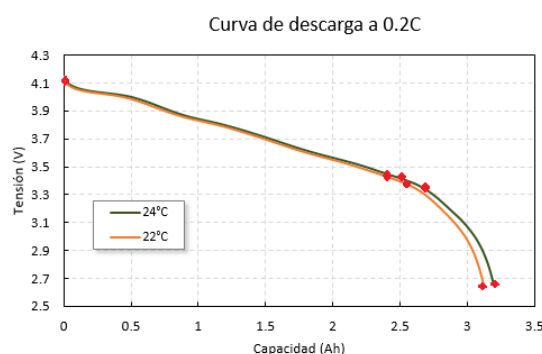
Nominal Specifications

Item	Specification
3.1 Standard discharge Capacity	Min 3,350mAh - Charge : 0.5C(1,700mA), 4.2V, 0.02C(68mA) cut-off @RT - Discharge : 0.2C(680mA), 2.65V cut-off @RT *1C=3,400mA
3.2 Charging Voltage	4.2V
3.3 Nominal Voltage	3.60V
3.4 Charging Method	CC-CV (constant voltage with limited current)
3.5 Charging Current	Standard charge: 1,700mA For cycle life : 1,020mA
3.6 Charging Time	Standard charge: 4hours
3.7 Max. Charge Current	2,000mA (not for cycle life)
3.8 Max. Discharge Current	8,000mA (for continuous discharge) 13,000mA (not for continuous discharge)
3.9 Discharge Cut-off Voltage	2.65V
3.10 Cell Weight	50 g max
3.11 Cell Dimension	Height : Max. 65.25 mm Diameter: Max. Φ 18.55 mm
3.12 Operating Temperature (Cell Surface Temperature)	Charge : 0 to 45°C Discharge : -10 to 60°C
3.13 Storage Temperature	1 year : -20~25°C (1*) 3 months : -20~45°C (1*) 1 month : -20~60°C (1*)

Initial internal impedance

Initial internal impedance measured at AC 1kHz after Standard charge.

Initial internal impedance $\leq 35\text{m}\Omega$



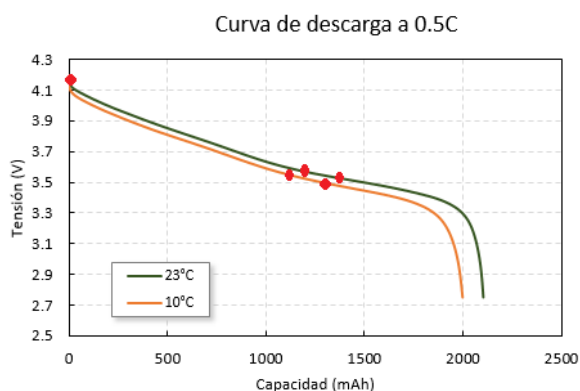
d) Parámetros de ajuste del modelo para la batería NMC LG ICR18650 MF1:

Nominal Specification

Item	Condition / Note	Specification
2.1 Capacity	Std. charge / discharge (Refer to 4.1.1 / 4.1.2)	Nominal 2,150 mAh (C_{nom}) Minimum 2,050 mAh (C_{min})
2.2 Nominal Voltage	Average for Std. discharge	3.65V
2.3 Standard Charge (Refer to 4.1.1)	Constant current Constant voltage End condition(Cut off)	0.5C (1,075mA) 4.2V 50mA
2.4 Max. Charge Voltage		4.2V
2.5 Max. Charge Current		1.0C(2,150mA)
2.6 Standard Discharge (Refer to 4.1.2)	Constant current End voltage(Cut off)	0.2C (430mA) 2.75V
2.7 Max. Discharge Current		10A
2.8 Weight	Approx.	44.0 g
2.9 Operating Temperature	Charge Discharge	0 ~ 45°C -20 ~ 60°C
2.10 Storage Temperature (for shipping state)	1 month 3 month 1 year	-20 ~ 60°C -20 ~ 45°C -20 ~ 20°C

4.2 Electrical Specification

Item	Condition	Specification
4.2.1 Initial AC Impedance	Cell shall be measured at 1kHz after charge per 4.1.1.	$\leq 35\text{ m}\Omega$, without PTC



e) Parámetros de ajuste del modelo para la batería LFP SLAUMXL17.5-12:

● Specifications

Nominal Voltage		12.8V
Rated capacity (20hour rate)		7.5Ah
Dimensions	Total Height	100 mm(3.94inches)
	Height	94 mm (3.70inches)
	Length	151 mm(5.95inches)
	Width	65 mm (2.56inches)
Weight Approx		1.20 Kg (2.65 lbs)
Terminal		T2

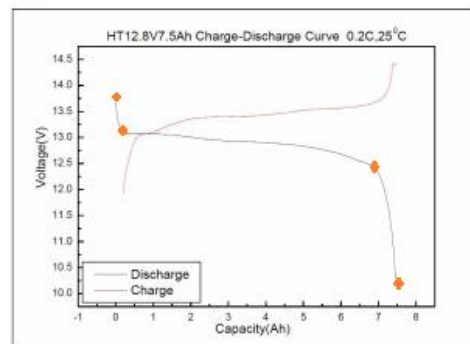
● Characteristics

Capacity Retention		>80% at 28 days
Cycle Life		>80% at 1500 Cycles
1.5 hour discharge to 10.5V		2.80 A
Internal Resistance		<60 mΩ
Charge Charecteristics	Charge Voltage	14.6±0.2V
	Charger Current	<7.5A
Discharge Charecteristics	Continuous Current	7.5A
	Maximum Pulse Current	15A(<3s)
	Discharge Cut-off Voltage	10V
Tempreture	Charge Tempreture	0°C-45°C(32°F-113°F)
	Discharge Tempreture	-20°C-60°C(-4°F-140°F)
	Storage Tempreture	0°C-40°C(32°F-104°F)

SLAUMXL17.5-12(12.8V7.5AH)



● Discharge Curves 25°C (77°F)



11.- Anexo 2.

El dimensionamiento de los convertidores *Buck* y *Buck-Boost* se realizan según el procedimiento descrito por Rodenas [40], tal y como se muestra a continuación:

Cálculo del convertidor *Buck* :

El convertidor *Buck* (Figura A-2_1) es una fuente conmutada DC-DC que reduce la tensión de salida con respecto a la tensión de alimentación, mediante una frecuencia de conmutación en el elemento conmutador, y un ciclo de trabajo (*Duty Cycle*) que determinará el porcentaje de señal de entrada en la salida.

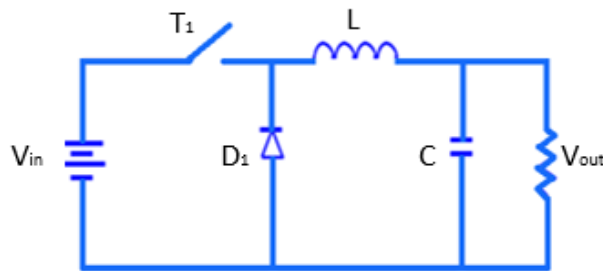


Figura A-2_1: Topología convertidor *Buck*.

El ciclo de trabajo, se obtiene a partir de la tensión de entrada al convertidor y la tensión a la salida (ecuación A2-1). En el caso en cuestión (Sistema de seguimiento solar autoalimentado), la tensión a la entrada del convertidor es la que se obtiene en los terminales del panel, 36.5V; mientras que la tensión a la salida es la máxima de la batería, 27.2V.

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 0.75 \quad (A2-1)$$

Asumiendo que el convertidor trabaja en modo continuo y que tanto el dispositivo de conmutación como el diodo son ideales, el valor de la inductancia se calcula a partir de la ecuación A2-2. Dónde, f es la frecuencia de conmutación del convertidor (20 KHz) y χ es el rizado de la corriente por el inductor, asumiendo que se admite un rizado del 5%, el valor de la corriente por el inductor será de 0.375A, ya que se quiere realizar la carga de la batería de 7.5Ah a la razón de $C/20$.

$$L = \frac{V_{out}(V_{in}-V_{out})}{\chi \cdot I_L \cdot f \cdot V_{in}} = 18.5 \text{ mH} \quad (\text{A2-2})$$

La capacidad a la salida del convertidor se calcula a partir de la ecuación A2-3, asumiendo que rizado permitido en la tensión de salida es del 5%.

$$C = \frac{(1-D)}{8 \cdot L \cdot f^2 \cdot \chi \cdot V_{out}} = 3.11 \text{ nF} \quad (\text{A2-3})$$

Cálculo del convertidor Buck -Boost:

El convertidor *Buck-Boost* es un tipo de fuente conmutada DC – DC que suministra una tensión a la salida que puede ser mayor o menor a la de entrada. En la configuración no inversora mostrada en la Figura A-2_2, la tensión a la salida tendrá la misma polaridad que a la entrada.

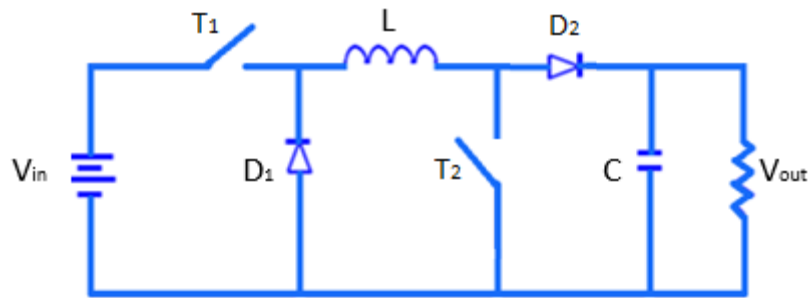


Figura A-2_2: Topología no inversora convertidor Buck-Boost.

El ciclo de trabajo se obtiene a partir de la ecuación A2-4, donde la tensión de entrada al convertidor será la máxima de la batería (27.2V) y a la salida del convertidor se fijará la tensión nominal del motor de 24V.

$$D = \frac{V_{out}}{V_{out}+V_{in}} = 0.47 \quad (\text{A2-4})$$

Asumiendo que el convertidor trabaja en modo continuo y que tanto los dispositivos de conmutación como los diodos son ideales, el valor de la inductancia se calcula a partir de la ecuación A2-5. Dónde, f es la frecuencia de conmutación del convertidor (20 KHz) y χ es el rizado de la corriente por el inductor, asumiendo que se admite un rizado del 5%, el valor de la

corriente por el inductor será de 2A, que es la corriente promedio demandada por el motor al mover los paneles solares.

$$L = \frac{V_{in} * D}{\chi * I_L * f} = 6.4 \text{ mH} \quad (\text{A2-5})$$

El condensador a la salida del convertidor se calcula a partir de la ecuación A2-6, asumiendo que el rizado permitido en la tensión de salida es del 5% y el valor de I_s es el valor de la corriente a la salida del convertidor (2A).

$$C = \frac{I_s * D}{f * \chi * V_{out}} = 39.2 \text{ }\mu\text{F} \quad (\text{A2-6})$$