

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

PRECISIÓN EN LA CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE BATERÍAS DE LITIO



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Autora: Nuria Lanz Goikoetxea

Directores: Alberto Berrueta Irigoyen y Adrián Soto Cabria

Pamplona, 04/06/2021

Nuria Lanz Goikoetxea
04/06/2021

PRECISIÓN EN LA CARACTERIZACIÓN
EXPERIMENTAL DE BATERÍAS DE LITIO

RESUMEN

Este trabajo de fin de estudios estudia la precisión lograda en la caracterización experimental de celdas de baterías de iones de litio. Las baterías recargables son un sistema de almacenamiento de energía en forma electroquímica, no son lineales en su comportamiento y dependen entre otros muchos parámetros de la temperatura, del estado de carga y del estado de salud. Estas variables hay que tenerlas en cuenta siempre que se quiera hacer un modelo eléctrico y térmico de la batería, en definitiva, si se quiere modelar su comportamiento real.

En el presente informe se van a estudiar cuatro parámetros que caracterizan a las celdas de batería de iones de litio: la eficiencia energética, la eficiencia coulombica, la capacidad y la impedancia de la celda de batería. Para ello se hará uso de diferentes ensayos experimentales, por lo que se puede decir que se trata de un trabajo de fin de estudios puramente experimental.

Para empezar, se hará un estudio sobre el error asociado a la medida de la eficiencia energética, eficiencia coulombica y capacidad de la celda de batería.

Acto seguido, este trabajo se va a centrar en seleccionar el método más preciso para medir la impedancia de una celda de batería, para ello se realizarán dos métodos diferentes. El primero consiste en un ajuste de los parámetros de un circuito equivalente que representa a la celda de batería, el cual se fijará con antelación, basado en los fenómenos físicos que tienen lugar en su interior, lo que nos llevará a desarrollar un modelo simplificado de la celda de batería. El segundo método hace uso de la herramienta proporcionada por Matlab, llamada "Battery Modeling", que realiza el ajuste de parámetros desde un punto de vista puramente matemático.

Para terminar, se realizará una comparación entre los dos métodos descritos anteriormente, y se presentan varias simulaciones con perfiles de corriente utilizados en diferentes ensayos experimentales basados en el método que ofrece mejores resultados, con el fin de comprobar que el modelo de parametrización seleccionado presenta resultados similares al ensayo experimental.

Palabras clave: Batería de iones de litio, Caracterización experimental, Error experimental, Error aleatorio

ABSTRACT

This Bachelor Project studies the precision achieved in the experimental characterization of lithium-ion battery cells. Rechargeable batteries are electrochemical energy storage systems, with a non-linear behaviour and temperature, state of charge and state of health dependencies. These variables must be considered whenever you want to make an electrical and thermal model of the battery, in short, if you want to model its real behaviour.

In this report we will study four parameters that characterize lithium-ion battery cells: energy efficiency, coulombic efficiency, battery cell capacity and impedance of the battery cell. For this, different experimental tests will be used, so it can be said that it is a purely experimental Bachelor Project.

To begin with, a study will be carried out on the error associated with the measurement of energy efficiency, coulombic efficiency and battery cell capacity.

Then, this work is going to focus on selecting the most accurate method to measure the impedance of a battery cell, for which two different methods will be carried out. The first consists of an adjustment of the parameters of an equivalent circuit that represents the battery cell, which will be set in advance, based on the physical phenomena that take place inside it, which will lead us to develop a simplified model of the battery cell. The second method makes use of the tool provided by Matlab, called "Battery Modeling", which performs parameter adjustment from a purely mathematical point of view.

Finally, a comparison will be made between the models carried out and with the one that presents the best results, several simulations will be carried out with current profiles used in different experimental tests, in such a way it will be verified if the parameterization model of the selected battery cell presents results similar to the experimental trial.

Keywords: Lithium-ion battery, Experimental characterization, Experimental error, Random error

CONTENIDO

Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Objetivos.....	1
1.2. Estado del arte	2
1.3. Fundamentos teóricos	4
1.3.1. La celda electroquímica. Componente fundamental de la batería.....	4
1.3.2. La celda ion-litio. Ventajas e inconvenientes.....	5
1.3.3. Parámetros que caracterizan el comportamiento de la batería	6
1.3.4. Modelado.....	8
1.4. Cálculo de errores.....	11
1.4.1. Error de medida: incertidumbre sistemática y aleatoria	11
1.4.1.1. Incertidumbre sistemática	13
1.4.1.2. Incertidumbre aleatoria	14
1.4.2. Error de estimación.....	15
1.4.2.1. Raíz del error cuadrático medio (RECM).....	15
1.4.2.2. Desviación máxima.....	15
1.5. Equipo de medición y modelo de celda de batería	16
1.5.1. Equipo de medición: el ciclador	16
1.5.2. Modelo de celda de batería: Samsung SDI INR21700–50E	17
Capítulo 2: Estudio del error de la medida de la eficiencia energética, eficiencia coulombica y capacidad de una celda de batería ion-litio	19
2.1. Introducción	19
2.2. Ensayos experimentales y resultados	19
2.2.1. Ensayos experimentales.....	19
2.2.2. Resultados	21
2.3. Error asociado a la medida de eficiencia energética	22
2.3.1. Cálculo del error de la eficiencia energética	22
2.3.2. Resultados y análisis	24
2.4. Error asociado a la medida de eficiencia coulombica.....	26
2.4.1. Cálculo del error de la eficiencia coulombica	26
2.4.2. Resultados y análisis	28
2.5. Error asociado a la medida de capacidad	30
2.5.1. Cálculo del error asociado a la medida de capacidad.....	30
2.5.2. Resultados y análisis	31
Capítulo 3: Método de parametrización basado en un modelo simplificado de la celda de batería	35
3.1. Introducción	35
3.2. Error asociado a la medida de la resistencia interna, modelo simplificado	35
3.3. Ensayos experimentales y resultados	38
3.3.1. Ensayos experimentales.....	38
3.3.2. Resultados	39
3.4. Análisis de los resultados	41

3.4.1.	Error de la resistencia interna para el ensayo experimental con una corriente de 1C	42
3.4.2.	Error de la resistencia interna para el ensayo experimental con una corriente de C/3	46
3.4.3.	Error de la resistencia interna para el ensayo experimental con una corriente de C/5	52
3.5.	Resumen	58
Capítulo 4: Estimación de parámetros mediante Battery Modeling		61
4.1.	Introducción	61
4.2.	Ensayos experimentales.....	62
4.3.	Estimación de los parámetros	62
4.3.1.	Preparación de los datos	62
4.3.2.	Proceso de estimación de parámetros	64
4.4.	Resultados.....	67
4.5.	Análisis de los resultados	69
Capítulo 5: Comparativa entre ambos modelos. Modelo simplificado Vs. Método de parametrización mediante Battery Modeling.....		71
5.1.	Introducción	71
5.2.	Preparación de los datos y resultados	72
5.2.1.	Preparación de los datos	72
5.2.2.	Resultados	73
5.3.	Análisis de los resultados	75
Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras		77
6.1.	Conclusiones	77
6.2.	Líneas futuras	79
Referencias		81

Capítulo 1: Introducción

1.1. Objetivos

En el presente trabajo de fin de estudios se va a estudiar, como bien dice el título del informe, la precisión lograda en la caracterización experimental de celdas de iones de litio. Para ello, se ha seleccionado un modelo eléctrico específico de celda de iones de litio, con el cual se llevarán a cabo diferentes ensayos experimentales. Con esta metodología experimental se persigue el siguiente objetivo general, desglosado en cuatro objetivos específicos.

Objetivo general:

Seleccionar el ensayo experimental más adecuado con el que se puede medir la impedancia de una celda de la manera más fiel posible. Para ello se hará uso de tres celdas Samsung SDI INR21700–50E, a las cuales se hará referencia como SAM2170-1, SAM2170-2 y SAM2170-3 a lo largo de todo el trabajo de fin de estudios.

Objetivos específicos:

1. Estudio del error asociado a la medida de la eficiencia energética, eficiencia coulombica y capacidad del modelo de celda seleccionado.
2. Estudio del error de la medición de la impedancia de la celda de batería. Para ello se desarrollará una técnica de parametrización con un ajuste de significado físico, lo que tendrá lugar a un modelo simplificado.
3. Modelado de la impedancia de la celda de batería, pero esta vez focalizado en un ajuste matemático. Para ello se hará uso de la herramienta “Battery Modeling” de MathWorks, donde a partir de unos ensayos lanzados en el laboratorio de la Universidad se va a hacer el ajuste de los parámetros de un circuito equivalente previamente fijado que sustituye a la batería de manera matemática.
4. Comparativa entre ambos modelos. Para ello se hará uso de la herramienta Simulink-Matlab, con la que se diseñará un modelo de simulación de la celda de batería con los parámetros previamente fijados de los estudios de impedancia.

1.2. Estado del arte

Desde que comenzó la revolución industrial (proceso de transformación económica, social y tecnológica) a partir de la segunda mitad del siglo XVIII, el consumo energético mundial ha crecido año tras año, hasta alcanzar los 14.400 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe) que se consumieron en 2018 según Enerdata [1].

En las últimas décadas la expansión del sector energético ha traído la evolución del mismo y ha ido incrementando su consumo en forma de electricidad como se puede ver en la Figura 1.

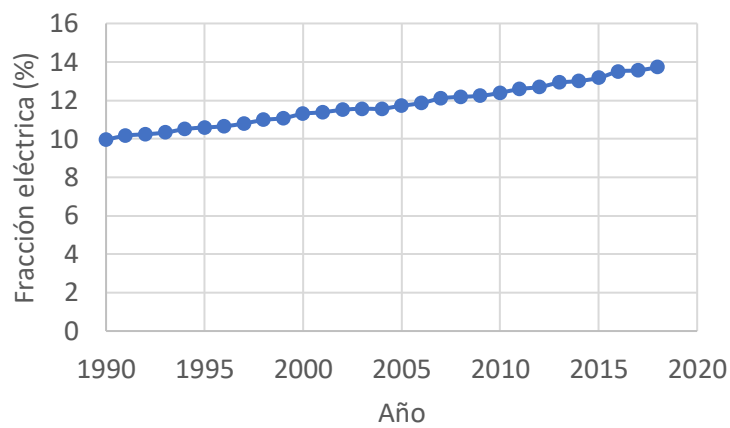


Figura 1. Porcentaje de consumo energético a nivel mundial en forma de electricidad. Elaboración propia con datos de Enerdata [1]

A lo largo de todo este tiempo la energía eléctrica ha ido sustituyendo a otro tipo de energías motivada principalmente por sus cuatro ventajas fundamentales; es una energía muy versátil, libre de emisiones en su lugar de consumo, fácil de transportarla y por último cabe destacar la madurez tecnológica que gozan sus grupos generadores.

El punto más crítico que presenta la energía eléctrica es su almacenamiento. Hasta hace muy pocas décadas, la energía eléctrica siempre ha seguido un patrón: la demanda debe ser igual a la generación. Hoy en día con los grandes avances tecnológicos que se han dado en los dispositivos de almacenamiento es posible el almacenamiento a gran escala de la energía eléctrica, esto deja de tener como principal objetivo igualar la generación a la demanda en todo momento. El almacenamiento es uno de los principales elementos que se pretende emplear en cualquier parque de generación renovable, ya que sabemos que el recurso renovable no es constante a lo largo del día, y con este apoyo de almacenamiento podremos cubrir la demanda en todo momento, aportando al consumidor una energía 100% renovable.

Durante las últimas décadas las baterías de litio han experimentado avances tecnológicos muy importantes, permitiendo su uso en diferentes aparatos electrónicos como pueden ser los portátiles, los teléfonos móviles... Actualmente, la implementación de este almacenamiento de energía eléctrica está moviendo a los sectores económicos de gran importancia, como es el sector automovilístico y eléctrico.

Las principales empresas automovilísticas llevan años trabajando en modelos de vehículos eléctricos. El sistema de almacenamiento es el punto más crítico de este tipo de vehículos, ya que es necesario almacenar una gran cantidad de energía eléctrica en un espacio reducido y con el menor peso posible, además es uno de los elementos más caros del vehículo por lo que también se están desarrollando diversos estudios para poder bajar el precio de la batería del vehículo.

Por otro lado, las principales empresas del sector eléctrico están incorporando en sus centrales de generación el almacenamiento con baterías de litio, no solo para almacenar energía eléctrica, si no para que desempeñen otras funciones críticas que conlleva la generación de electricidad, más aún si se trata de una generación con energías renovables, ya que este recurso, como se ha dicho anteriormente, es fluctuante a lo largo del día. Los principales servicios de red en los que las baterías de litio pueden desempeñar un papel relevante son en la emulación de la inercia, la regularización de potencia-frecuencia, el control de rampas y la uniformización de potencia generada.

La complejidad donde se quiere implementar estas baterías conlleva a la necesidad de un aumento de precisión en la estimación de su comportamiento. Además, se ha desarrollado la necesidad de poder apreciar el comportamiento de la batería en tiempo real, y analizar un sistema en tiempo real implica ser capaz de conocer su comportamiento en el instante en el que está operando, sin necesidad de ninguna otra condición extra que lo impida, como puede ser la necesidad de un periodo de tiempo para que el sistema se estabilice.

Para poder cubrir todas estas necesidades, en los últimos años se han desarrollado numerosas investigaciones cuyo objetivo común ha sido encontrar un sistema equivalente que sea capaz de representar de forma más precisa el comportamiento de una batería de ion litio.

El principal inconveniente de las baterías de litio viene de la mano de la gestión de residuos. Las baterías de litio contienen materiales críticos y elementos estratégicos que se pueden recuperar al final de su vida útil, para ello es necesario un proceso adecuado de reciclaje. En la actualidad el proceso de tratamiento de las baterías de litio como residuo es muy caro y poco eficiente, además, el procedimiento para recuperar los materiales es altamente contaminante y emite mucho CO₂.

La producción de una tonelada de litio requiere del procesado de 750 toneladas de salmuera, o bien 250 toneladas del mineral espodumena ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$, con un contenido teórico de Li₂O del 8,03%), que tras su procesado dan como resultado la tonelada de litio. Esta misma tonelada de litio se puede extraer mediante el reciclado de 28 toneladas de baterías desechadas (lo que supone recuperar el Li contenido en los packs de unos 256 automóviles [2]), reduciendo de esta forma la explotación de recursos naturales y el impacto ambiental que ello conlleva.

1.3. Fundamentos teóricos

1.3.1. La celda electroquímica. Componente fundamental de la batería

Se define como batería a un dispositivo que sea capaz de almacenar energía de forma química que posteriormente, esa energía química pueda ser transformada en energía eléctrica. Los materiales que conforman una batería poseen unas prioridades concretas que motivan la acumulación de energía química, además, se encuentran dispuestos entre ellos favoreciendo que se produzcan los procesos químicos que tienen lugar en su interior. La estructura física más pequeña que posee estas propiedades se denomina celda, y es la unidad básica que se considera en el ámbito de las baterías.

Una celda se define como un dispositivo electroquímico cuya estructura está formada por dos electrodos y un electrolito. El electrolito es una sustancia en la que se encuentran los electrodos y que se caracteriza por tener gran densidad de iones, los cuales serán muy necesarios para que se produzca la reacción química principal.

Los electrodos están compuestos por materiales semiconductores cuya función es proporcionar las características químicas que favorecen las reacciones que tienen lugar. Se tiene que distinguir entre el electrodo positivo, denominado cátodo, y el electrodo negativo, denominado ánodo.

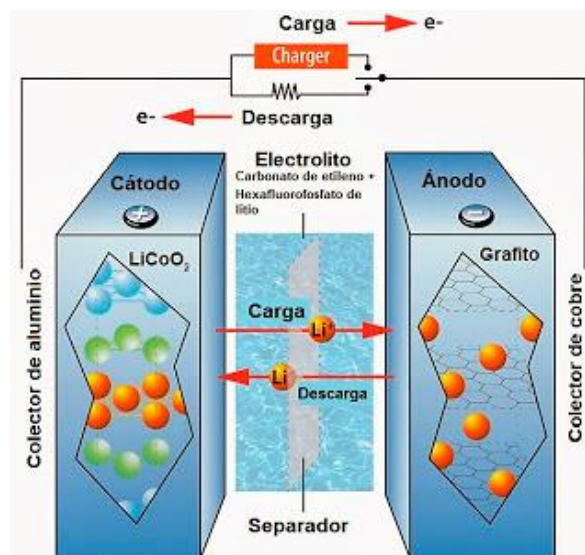


Figura 2. Proceso de carga y descarga de una celda de batería de ion-litio. Los iones de litio están representados por círculos naranjas, los átomos de cobalto por círculos verdes y los de oxígeno por círculos azules

Se parte de que la celda tiene una energía almacenada en forma química. Esta energía corresponde a las cargas que poseen los iones de la solución que hemos denominado electrolito, esta energía química se transforma en energía eléctrica debido a la reacción química de oxidación-reducción (REDOX) que tiene lugar entre los electrodos. El ánodo, es susceptible a cargarse positivamente y tener la capacidad de atraer cargas negativas, o lo que es lo mismo iones negativos o aniones. De la misma forma el cátodo es capaz de cargarse negativamente y

atraer iones positivos o cationes, de ahí el nombre de electrodo. Es necesario un material que proporcione los iones que permitan cargarse a los electrodos, de aquí la función del electrolito.

Las características de una batería dependen en gran medida del material del que están compuestos los electrodos y el electrolito, estos materiales serán los que definan que una batería se considere de un tipo concreto.

1.3.2. La celda ion-litio. Ventajas e inconvenientes

El nombre que reciben las baterías ion litio viene debido a que es el litio el compuesto que proporciona los iones. La elección del litio como sustancia base del electrolito se debe a que el litio es un compuesto cuya separación de iones es fácilmente realizable siempre y cuando se le proporcione la energía necesaria. Dicha energía viene aportada por la fuente de alimentación a la que se conecta la batería para su carga.

Al conectar la batería a la fuente de alimentación se producirá la separación de iones que se hallan en el electrolito, los cuales se transferirán entre los electrodos como producto de la reacción de oxidación-reducción, fenómeno denominado como transferencia de carga.

Las baterías de ion litio tienen unas características que las hacen superiores a las baterías que ya existían anteriormente con compuestos diferentes. Las principales ventajas que tienen las baterías de ion litio con respecto a otro tipo de baterías existentes en el mercado actual es que son dispositivos más ligeros que sus equivalentes de níquel cadmio o níquel hidruro, los electrodos de las baterías de ion-litio de este metal y de carbono son mucho más ligeros reduciendo así el peso por una misma cantidad de carga almacenada. Además, el litio es un metal muy resistivo y posee una cantidad de energía potencial almacenada entre sus átomos o enlaces atómicos contenida en muy poco espacio, pudiendo reducir el volumen de las baterías para una misma cantidad de carga en comparación con otro tipo de baterías.

Otra de las ventajas que conlleva utilizar este tipo de baterías es que presentan una pérdida de carga o autodescarga muy pequeña, como máximo pierde un 5% de su energía acumulada al año. No tienen efecto memoria, es decir, poseen una elevada resistencia a las variaciones en las profundidades de descarga.

Entre todas las ventajas que pueden presentar las baterías de ion litio, por último, cabe destacar que son capaces de soportar un gran número de ciclos de carga y descarga sin que vea afectado su rendimiento.

Por otro lado, las principales desventajas que tienen las baterías de ion litio al igual que el resto de tipos de baterías existentes en el mercado actual es que solo se pueden usar por un tiempo limitado, siendo un problema para su almacenamiento, es decir, tienen un ciclo de vida determinado. Además, las temperaturas elevadas reducen la energía acumulada por la batería y afecta al rendimiento de las baterías de ion litio. Como solución se emplean otros materiales en la carcasa del dispositivo, en las laminas productoras de energía de su interior o la utilización de una combinación diferente de metales o aleaciones junto al de litio minimiza en gran medida o anula la posibilidad de descarga no deseada.

1.3.3. Parámetros que caracterizan el comportamiento de la batería

A continuación, se presentan las principales definiciones e influencias de los distintos parámetros que caracterizan una batería de litio y que serán los que determinen su comportamiento.

Capacidad (C)

La Capacidad es la cantidad de carga que puede ser almacenada en una celda, depende de la cantidad de material reactivo que contenga la celda. Representa la cantidad de electricidad que entrará en juego en la reacción REDOX. Se mide en la corriente (en amperios) que puede suministrar la batería en una hora en el proceso de descarga, expresados mediante la unidad amperio-hora, Ah. A medida que la batería envejece, los materiales que conforman la batería se van degradando, reduciéndose de esta forma la posibilidad de producirse la reacción REDOX y deja de ser útil para el almacenamiento energético, reduciéndose de esta forma la capacidad de la batería.

Dado que, desde el punto de vista de usuario de la batería, tiene más interés su capacidad energética (Wh), se suelen confundir estos conceptos y, a veces, se habla de capacidad de la batería al referirse a su capacidad energética.

Estado de carga (SOC)

El estado de carga (SOC) de una celda indica la capacidad disponible en función de su capacidad, se expresa en porcentaje o en p.u. Es una de las variables de estado más relevantes en una batería.

Estado de salud (SOH)

Condición o capacidad de funcionamiento actual de la batería en función de la capacidad nominal o inicial, cuando es nueva. No hay una forma de cálculo normalizada.

Voltaje de la batería

Es la tensión entre los bornes de la celda. Esta definida entre una tensión mínima y una tensión máxima, normalmente 2.5V y 4.2V respectivamente.

Tensión en circuito abierto

Es el voltaje de la batería cuando esta se encuentra en reposo y en circuito abierto.

Resistencia interna

Es la resistencia que opone la propia celda como material ante el flujo de corriente. Este parámetro se puede descomponer en dos tipos de resistencias: óhmica y de polarización. Una mayor resistencia óhmica provoca una menor tensión en la batería, un menor tiempo de descarga y menor potencia disponible. A un modelado proporciona valores para que al gestionar la batería se haga un mejor uso de las celdas del conjunto, lo que puede llevar a un mayor ciclo

de vida. Por otro lado, la resistencia polarizada depende de la polarización química y de la concentración del electrolito.

Capacidad energética (Wh)

Energía que puede suministrar la batería.

Densidad de energía

Cantidad de energía que puede suministrar un elemento en relación con su volumen. Depende del voltaje y capacidad estándares. Es una de las mayores ventajas de las baterías de litio.

Ciclo

Un ciclo de carga-descarga, o simplemente ciclo, es un proceso de carga y descarga (o descarga y carga) de la batería siendo el SOC el mismo al comienzo y al final del ciclo.

Degradación por ciclado

Se engloban en este parámetro todas las irreversibilidades que tienen lugar en la batería como consecuencia de las cargas y descargas que se llevan a cabo. Los efectos más notables son una reducción de la capacidad y un aumento de la resistencia interna.

Degradación por almacenamiento

Se asocia con las irreversibilidades que tienen lugar en la batería sobre las que no influye el perfil de cargas y descargas que se aplican a la batería. Estos procesos se ven influidos por la temperatura y el SOC de la batería. Los efectos más relevantes también consisten en una reducción de capacidad y un aumento de resistencia interna.

BMS (Battery Management System)

Es el conjunto de componentes electrónicos que incorpora internamente una batería. Sus principales funciones son garantizar unas condiciones de funcionamiento seguras, el cálculo de las variables de estado de la batería y la desconexión de la misma si se da una situación de funcionamiento anómala o peligrosa [3].

1.3.4. Modelado

Dado que la implementación de las baterías de ion litio se prevé en ámbitos de alta complejidad, es necesario evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de trabajo dentro del amplio abanico de sus posibilidades. Para ello es necesario disponer de un modelo preciso y eficaz.

El modelo de la batería refleja las características de la batería real, y puede ser utilizado para predecir su comportamiento bajo distintas condiciones de carga/descarga, ayudando a optimizar el diseño de los componentes de la batería y su utilización.

Al ser un dispositivo electroquímico, el modelo de la batería puede hacerse desde el punto de vista eléctrico como desde un punto de vista químico. El modelo eléctrico es el más extendido, ya que el modelado químico es un proceso más complejo basado en reacciones químicas que se producen en la batería, que fundamentalmente es una reacción REDOX y por lo tanto es totalmente factible realizar el modelo de la batería centrándose en el enfoque químico, analizando las características y comportamientos de los distintos componentes que conforman el dispositivo.

Son muchas las propuestas que existen sobre el modelado de las baterías desde el punto de vista eléctrico, algunos ignoran los fenómenos transitorios y otros no pueden predecir la vida útil de la batería. Algunos incluso permiten estudiar la dinámica interna de la batería, aunque resulta en ocasiones demasiado complejos para ser implementados en un modelo eléctrico general. Todos ellos tienen sus ventajas e inconvenientes.

Una de las maneras más comunes de modelar una batería es utilizando un circuito equivalente. Esta propuesta de modelo se puede aplicar fácilmente a un simulador de circuitos y conseguir una buena precisión, este es otro de los aspectos por lo que este modelo resulta de gran interés.

Modelos basados en circuitos equivalentes: el modelo equivalente de Thevenin

Uno de los modelos que representa a la batería desde un punto de vista eléctrico es un circuito equivalente Thevenin, con un número de ramas RC. Este modelo realiza un estudio del dominio del tiempo comparando la eficiencia de los modelos en función del número de ramas RC que posee el circuito. Cuantas más ramas RC se tengan en cuenta implicará que, más efectos se tendrán en cuenta y más preciso será el modelo. Por el contrario, el aumento de ramas RC también conllevará el aumento del coste computacional.

En este tipo de modelos también se tiene en cuenta la influencia del nivel de carga en la tensión de circuito abierto, además de la resistencia interna. Los distintos conjuntos de ramas RC reproducen el comportamiento dinámico de la batería. Este comportamiento dinámico puede incluir la influencia que tienen efectos como la temperatura, el estado de carga o el perfil de corriente.

Los parámetros se identifican analíticamente aplicando un perfil de corriente y realizando las mediciones correspondientes una vez se ha pasado un periodo de relajación de la tensión de la batería. La causa de que los parámetros no se identifiquen mientras que circula la

corriente de carga es que las mediciones pueden tener errores causados por la relación no lineal entre el SOC y el E_m . El número de pulsos y la duración del tiempo de reposo dependen del tiempo que se quiera invertir en realizar las pruebas o la precisión que se quiera obtener.

La identificación de parámetros se lleva distinguiendo entre dos tipos de conjuntos de parámetros, los parámetros relativos a la corriente de descarga y los parámetros relacionados con la corriente de carga. Una vez se tienen las medidas se realizan los cálculos adecuados para obtener la información deseada.

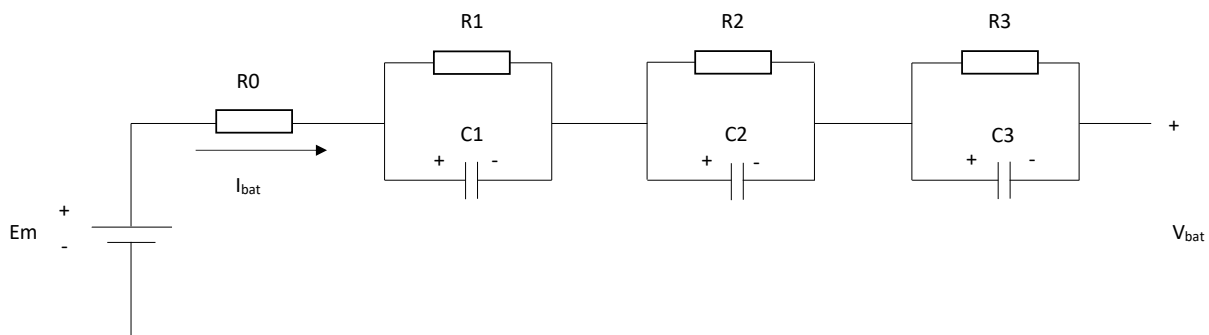


Figura 3. Circuito Thevenin con ramas RC que representa a la celda de batería

Al modelar una celda, utilizando cualquier circuito dado, es importante elegir la topología y la parametrización del circuito de manera que pueda responder de manera más similar posible a una celda de batería física. Los valores de estos parámetros no son conocidos de antemano y son parámetros únicos de esa electroquímica que describen el comportamiento de la batería. En este caso, para el circuito equivalente Thevenin tenemos los siguientes parámetros que definen el comportamiento de la celda.

La fuente de voltaje está asociada con el potencial de circuito abierto, y depende del estado de carga.

La resistencia en serie está relacionada con la conductividad iónica del separador y el electrolito. Representa la caída de voltaje instantánea que sufre la celda al introducirle un pulso de corriente.

Las ramas en paralelo compuestas de una resistencia y un condensador representan la difusión de los procesos involucrados en la interpolación de iones de litio, dentro y fuera de los electrodos porosos. Representan una respuesta de la celda de batería del tipo exponencial, ya que después de la respuesta instantánea es necesario una respuesta de relajación para quedarse en un estado de potencial de circuito abierto estable una vez pasado el pulso de corriente.

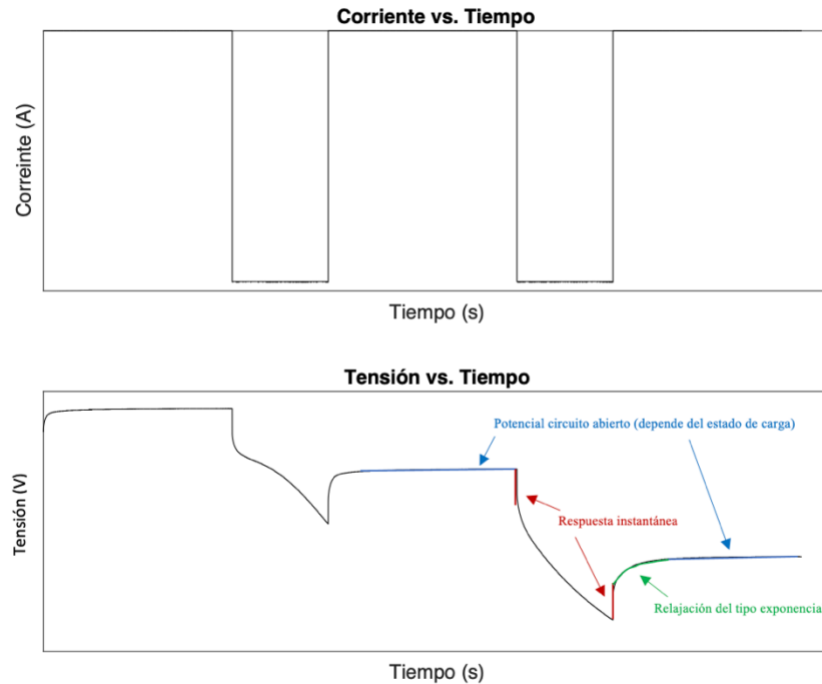


Figura 4. Representación de los parámetros del circuito equivalente. Componentes no lineales y no constantes a lo largo de todo el espectro del estado de carga

Si nos fijamos únicamente en un pulso de corriente de descarga (corriente constante durante unos segundos), comienza con la batería en un determinado estado de carga, y se le pide una determinada cantidad de corriente, acto seguido vuelve la corriente a cero. Si se mide la respuesta en voltaje ante esta excitación, se produce una caída de voltaje fruto de todas las resistencias internas y demás. Cuando la corriente vuelve a cero, la batería vuelve a su estado de equilibrio, ahora con un voltaje a circuito abierto algo menor que el que tenía antes debido a que el estado de carga ahora es inferior.

1.4. Cálculo de errores

En toda medición experimental es de crucial importancia conocer el rango del error que estamos cometiendo, siendo el error la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero de la magnitud que se está midiendo.

$$\text{ERROR } (\Delta) = \text{VALOR MEDIDO} - \text{VALOR VERDADERO}$$

Tanto para saber el error que se comete en una medida como para conocer el error que se comete a la hora de plantear un modelo que quiera simular a un ensayo experimental real, se plantean a continuación diferentes ecuaciones las cuales ayudan a conocer los diferentes errores con los que nos podemos encontrar. Para ello, es necesario conocer la incertidumbre sistemática y aleatoria de dicha medición, tal como se detalla en la Sección 1.4.1.

Por otro lado, si queremos conocer cómo de bueno es un modelo planteado que simula a un ensayo experimental, contamos con la raíz del error cuadrático medio y la desviación máxima, como se detalla en la Sección 1.4.2.

1.4.1. Error de medida: incertidumbre sistemática y aleatoria

Las incertidumbres sistemáticas y aleatorias del resultado experimental se investigan por separado, es interesante considerar por separado los efectos de los errores que varían y aquellos que no: la incertidumbre aleatoria y la incertidumbre sistemática de un resultado se estiman utilizando diferentes enfoques. Como se muestra a continuación, la aplicación del análisis de incertidumbre se logra a través de una serie de pasos lógicos que son en sí mismos bastante sencillos.

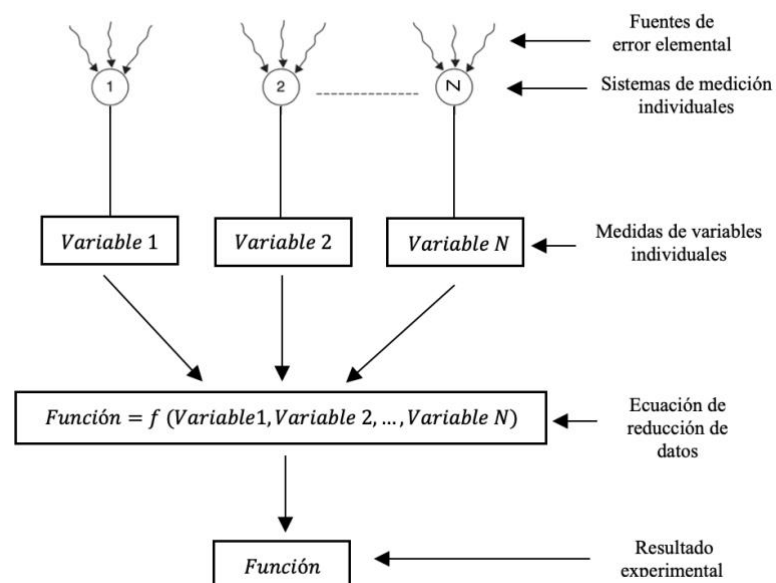


Figura 5. Resultado experimental determinado a partir de múltiples variables medidas

La situación que deseamos analizar se ilustra en la Figura 5, que muestra un diagrama de flujo de un experimento en el que se utilizan múltiples variables medidas para determinar un resultado experimental. Cada sistema de medición que se utiliza para medir el valor de una variable individual, *Variable_i*, está influenciado por una serie de errores elementales. Los efectos de estos errores elementales se manifiestan como un error sistemático y un error aleatorio en el valor medido de la variable. Estos errores en los valores medidos luego se propagan a través de la ecuación de reducción de datos y producen errores sistemáticos y aleatorios en el resultado experimental.

Cuando un resultado, *Función*, se calcula a partir de varias variables medidas usando una ecuación de reducción de datos, una formulación funcional general es

$$\text{Función} = f(\text{Variable}_1, \text{Variable}_2, \dots, \text{Variable}_N) \quad (1)$$

donde las *Variables_i* son las variables medidas. Las incertidumbres en las variables medidas causan incertidumbre en el resultado.

En las dos secciones siguientes, Sección 1.4.1.1 y Sección 1.4.1.2, se hace una explicación del cálculo de la incertidumbre sistemática y aleatoria que hay que tener en cuenta para calcular la incertidumbre total de la medición que queremos tomar, ecuación (1).

Por lo tanto, siempre que se mide una magnitud con cualquier aparato de medida, por muy preciso y exacto que sea, se comete un cierto error. Ese error es la combinación de dos errores, el error sistemático y el error aleatorio, el primero de ellos depende del equipo de medición con el que se está trabajando, por lo que no es posible minimizarlo, va a existir siempre y es constante para todas las medidas que se tomen. El segundo error a tener en cuenta, sin embargo, depende de la cantidad de muestras que se tomen de una medida, por lo que el aumento del tamaño de la muestra minimiza el error aleatorio.

En definitiva, se llama incertidumbre a la cuantificación de la duda que se tiene sobre el resultado de la medición. Cuando sea posible es importante tratar de corregir los errores conocidos, pero cualquier error del cual no se conozca su valor, es una fuente de incertidumbre.

$$\Delta \text{Función}(\%) = \frac{2 * \sqrt{(\max(b\text{Función}))^2 + (S\bar{R})^2}}{\text{Función}} * 100 \quad (2)$$

La Ecuación (2) representa como ha de hacerse el cálculo de la incertidumbre de una medida que estemos midiendo, para ello, como bien se expresa en la ecuación, es necesario conocer la incertidumbre sistemática estándar (*b*) y aleatoria (*S \bar{R}*) de la medida. En este caso esta ecuación está expresada para una medida en porcentaje y se calcula haciendo la raíz cuadrada de la máxima incertidumbre sistemática estándar que se da en toda la muestra de medidas que tengamos al cuadrado, más, la incertidumbre sistemática aleatoria al cuadrado, todo ello multiplicado por dos y dividido entre la media de todas las medidas que se hayan tenido en cuenta, además de multiplicarlo por cien para expresarlo en porcentaje [4].

1.4.1.1. Incertidumbre sistemática

El error sistemático es aquel que se produce de igual modo en todas las mediciones que se realizan de una magnitud. Puede estar originado en un defecto del instrumento, en una particularidad del operador o del proceso de medición, etc. Se contraponen al concepto de error aleatorio. Este error no tiende a cero al aumentar el tamaño de la muestra. Está implícito en el diseño del estudio, y resulta difícil de corregir en la fase analítica. Determina lo que se conoce como validez interna del estudio. Se puede prevenir su aparición a través de un buen diseño del estudio [5].

Durante todo este trabajo de fin de estudios se va a trabajar con el aparato de medida disponible en el laboratorio de almacenamiento, expuesto en la Sección 1.5.1. La incertidumbre sistemática estándar (b), depende del aparato con el que se están tomando las medidas, esta incertidumbre no se puede minimizar y es constante para todas las medidas tomadas.

Para realizar el cálculo de la incertidumbre sistemática estándar de una medición se va a hacer uso del análisis de incertidumbre detallado mediante el método de series de Taylor [4].

La Ecuación (1) es la ecuación de reducción de datos utilizada para determinar la *Función* a partir de los valores medidos de las variables, *Variable_i*. Entonces, la incertidumbre sistemática estándar viene dada por

$$(bFunción)^2 = \left(\frac{\partial Función}{\partial Variable1} * bVariable1 \right)^2 + \left(\frac{\partial Función}{\partial Variable2} * bVariable2 \right)^2 + \dots \quad (3)$$

donde *bVariable_i* son las incertidumbres sistemáticas estándar de las variables medidas del equipo de medición, estas son conocidas y se detallan en la Sección 1.5.1.

La Ecuación (3) es válida para el caso en el que todas las fuentes de error sistemático sean totalmente independientes. Durante todo el trabajo de fin de estudios que se está desarrollando, esta característica se va a cumplir por lo que para el cálculo del error sistemático estándar de una medición se aplicará esta ecuación.

Por el contrario, existen casos donde las fuentes de error sistemático son dependientes entre sí, en ese caso, es necesario tener en cuenta un término de errores de correlación, tal y como se muestra en la siguiente ecuación.

$$(bFunción)^2 = \left(\frac{\partial Función}{\partial Variable1} * bVariable1 \right)^2 + \left(\frac{\partial Función}{\partial Variable2} * bVariable2 \right)^2 + \dots + \left(\begin{array}{l} \text{Efectos de correlación} \\ \text{de errores sistematicos} \end{array} \right) \quad (4)$$

Un ejemplo que habría que tener en cuenta para aplicar la Ecuación (4) en lugar de la Ecuación (3) podría ser la medida de la temperatura realizada con termopares separados. Si los dos termopares se calibraran con el mismo estándar, entonces las dos mediciones de temperatura tendrían un error sistemático común, idéntico, resultante de la precisión del estándar de calibración.

El término de correlación de error sistemático en la Ecuación (4) permite la corrección de la incertidumbre estándar combinada para tener en cuenta los efectos de estos errores correlacionados [4].

1.4.1.2. Incertidumbre aleatoria

El error aleatorio es aquel error inevitable que se produce por eventos únicos imposibles de controlar durante el proceso de medición. Se contraponen al concepto de error sistemático. En un estudio de investigación, el error aleatorio o accidental viene determinado por el hecho de tomar solo una muestra de una población para realizar inferencias. Puede disminuirse aumentando el número y tamaño de la muestra. Las fuentes de los errores aleatorios son difíciles de identificar o sus efectos no pueden corregirse del todo. Son numerosos y pequeños pero su acumulación hace que las medidas fluctúen alrededor de una media [6].

En estadística, la desviación típica (también conocida como desviación estándar y desvío típico y representada de manera abreviada por la letra griega minúscula sigma σ o la letra latina s, así como por las siglas SD (de standard deviation, en algunos textos traducidos del inglés)) es una medida que se utiliza para cuantificar la variación o la dispersión de un conjunto de datos numéricos. La fórmula para calcular la desviación estándar de la muestra es la siguiente

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (Función_i - \overline{Función})^2}{M - 1}} \quad (5)$$

donde $Función_i$ son los valores observados de los elementos de la muestra, $\overline{Función}$ es el valor medio de estas observaciones, y M es el número de observaciones de la muestra [7].

Una desviación estándar baja indica que la mayor parte de los datos de una muestra tienden a estar agrupados cerca de su media (también denominada el valor esperado), mientras que una desviación estándar alta indica que los datos se extienden sobre un rango de valores más amplio.

Finalmente, para obtener la incertidumbre aleatoria de nuestra muestra de medición se requiere información sobre la precisión de la media obtenida. Este parámetro se puede obtener determinando la desviación estándar de la media de la muestra. Suponiendo una independencia estadística de los valores de la muestra, la desviación estándar de la media está relacionada con la desviación estándar de la distribución [8]. Por lo tanto, la incertidumbre aleatoria de nuestra muestra la calcularemos aplicando la siguiente ecuación.

$$S\bar{R} = \frac{S}{\sqrt{M}} \quad (6)$$

1.4.2. Error de estimación

Cuando se simula un modelo que quiere representar el comportamiento real de un sistema, siempre va a existir un error entre ambos valores, el real y el simulado, por muy pequeño que este sea. Para cuantificar dicho error se usan magnitudes puramente estadísticas.

1.4.2.1. Raíz del error cuadrático medio (RECM)

La raíz del error cuadrático medio (RECM) es una medida de uso frecuente de las diferencias entre los valores predichos por un modelo o un estimador y los valores observados. La RECM representa la raíz cuadrada del segundo momento de la muestra de las diferencias entre los valores previstos y los valores observados o la media cuadrática de estas diferencias. Estas desviaciones se denominan residuos cuando los cálculos se realizan sobre la muestra de datos que se utilizó para la estimación y se denominan errores (o errores de predicción) cuando se calculan fuera de la muestra. La RECM sirve para agregar las magnitudes de los errores en las predicciones para varias veces en una sola medida de poder predictivo. La RECM es una medida de precisión, para comparar errores de predicción de diferentes modelos para un conjunto de datos en particular y no entre conjuntos de datos, ya que depende de la escala.

La RECM es siempre no negativa, y un valor de 0 (casi nunca alcanzado en la práctica) indicaría un ajuste perfecto a los datos. En general, una RECM más baja es mejor que una más alta. Sin embargo, las comparaciones entre diferentes tipos de datos no serían válidas porque la medida depende de la escala de los números utilizados.

La RECM es la raíz cuadrada del promedio de errores cuadrados. El efecto de cada error en la RECM es proporcional al tamaño del error cuadrado; por lo tanto, los errores mayores tienen un efecto desproporcionadamente grande en la RECM. Por lo tanto, la RECM es sensible a los valores atípicos [9].

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (Valor_{simulación} - Valor_{experimental})^2}{T}} \quad (7)$$

1.4.2.2. Desviación máxima

La desviación máxima mide el error máximo que hay entre dos conjuntos de datos. Esta cuantificación puede llegar a ser interesante a la hora de estar comparando dos conjuntos de datos para saber dónde se produce una mayor desviación y poder corregirlo en ese punto exacto.

$$Desviación\ Máxima = \max \left(\text{abs}(Valor_{simulación} - Valor_{experimental}) \right) \quad (8)$$

1.5. Equipo de medición y modelo de celda de batería

A lo largo de todo el trabajo de fin de estudios se van a realizar diferentes ensayos experimentales con los que se trabajará para poder obtener los objetivos expuestos en la Sección 1.1. Para dichos ensayos experimentales es necesario el uso de diferentes herramientas y materiales que están disponibles en el laboratorio de almacenamiento y microredes de la Universidad, como son el equipo de medición y las celdas de baterías empleadas para realizar dichos ensayos experimentales.

1.5.1. Equipo de medición: el ciclador

Los diferentes ensayos se van a realizar con el ciclador del laboratorio de almacenamiento y microredes de la Universidad Pública de Navarra (UPNA). Es un aparato de medición con el que se pueden realizar ensayos a celdas, analiza las diferentes características de baterías para poder realizar diferentes estudios con ellas. El ciclador del que se dispone para este trabajo de fin de estudios es un ciclador de Neware que contiene tanto el software como el hardware. Dicho ciclador tiene unas incertidumbres conocidas, que se cogen de la hoja de características de la máquina.

Voltage	CV output range	0.025V~5V
	Min discharge voltage	2.5V
	Accuracy	±0.1% of FS
	Stability	±0.1% of FS
Current	Output range/channel	0.25A~50A
	Accuracy	±0.1% of FS
	CV cut-off current	0.1A
	Stability	±0.1% of FS

Tabla 1. Parte de la hoja de especificaciones del ciclador

Como se puede observar en la Tabla 1, el voltaje que es capaz de medir el ciclador va desde los 0.025 V a los 5V, siendo la precisión un 0.1% del fondo de escala, por lo que nuestro fondo de escala será de 5V. Esto significa que la incertidumbre sistemática (B) de la tensión será:

$$Incertidumbre\ sistematica = \frac{0.1}{100} * 5V = 0.005V \quad (9)$$

Por otro lado, el rango de corriente que es capaz de medir el ciclador es 0.25A~50A, en nuestro ensayo, los pulsos de corriente de carga y descarga a los que se someterá a la batería no van a superar los 5A, por lo que el fondo de escala que vamos a seleccionar para nuestros ensayos va a ser de 5A. La precisión del ciclador con respecto a la corriente es de un 0.1% del fondo de escala, por lo tanto, la incertidumbre sistemática (B) de la corriente será:

$$\text{Incertidumbre sistemática} = \frac{0.1}{100} * 5A = 0.005A \quad (10)$$

La distribución de las incertidumbres se produce de manera normal, por lo que la incertidumbre sistemática estándar (b) será la mitad de la incertidumbre sistemática (B).

Tipo	Intensidad (A)	Tensión (V)
Incertidumbre sistemática (B)	0,05	0,005
Distribución	Normal	Normal
Incertidumbre sistemática estándar (b)	0,025	0,0025

Tabla 2. Incertidumbres del ciclador necesarias para realizar el presente trabajo de fin de estudios

1.5.2. Modelo de celda de batería: Samsung SDI INR21700–50E

La celda de batería seleccionada del laboratorio de almacenamiento con la que se trabajará a lo largo de todo el trabajo de fin de estudios es la celda Samsung SDI INR21700–50E, cuyas características son las siguientes:



Samsung SDI INR21700–50E	
Capacidad	4,9 Ah
V _{nom}	3,6 V
V _{min}	2,5V
V _{max}	4,2V

Tabla 3. Características de la celda SAM217000

Capítulo 2: Estudio del error de la medida de la eficiencia energética, eficiencia coulombica y capacidad de una celda de batería ion-litio

2.1. Introducción

En este capítulo se va a realizar un estudio sobre el error de la eficiencia energética, eficiencia coulombica y la capacidad que tiene una celda de batería ion-litio. Para ello se van a realizar tres ensayos experimentales, a cada una de las celdas seleccionadas en la Sección 1.5.2, de pulsos de corriente de carga/descarga con amplitudes de corriente diferentes. El objetivo de este apartado va a ser comprobar las diferencias entre las eficiencias coulombicas, eficiencias energéticas y la capacidad que se dan a medida que se realiza dicha medida con un ensayo experimental u otro, comprobar si dichas diferencias dependen del tipo de ensayo empleado, de la propia celda de batería, o de alguna otra característica.

2.2. Ensayos experimentales y resultados

2.2.1. Ensayos experimentales

Los tres ensayos experimentales constan de los mismos pasos, la única diferencia entre ellos es la intensidad que se le proporciona a la batería en la carga y la intensidad que se le pide a la batería en la descarga.

La programación se realiza mediante el software que tiene incorporado el propio ciclador que se está utilizando, expuesto en la Sección 1.5.1.

La programación de los tres ensayos que se van a realizar contiene los siguientes pasos (con la única diferencia de la amplitud de la corriente):

- 1) Un escalón de descarga (CC_DChg), con una corriente de determinada (diferente para cada ensayo: 1C, C/3 o C/5).
- 2) Un escalón de carga (CCCV_Chg), con una corriente de determinada (diferente para cada ensayo: 1C, C/3 o C/5).
- 3) Repetir el ciclo anterior 11 veces.

La programación del ensayo consiste en establecer los pulsos de corriente a los que se va a someter a la celda, tanto de carga como de descarga. A partir del ensayo experimental obtenemos la respuesta de la batería, en diferentes magnitudes como puede ser la tensión, la capacidad o la energía. A continuación, se muestra la programación realizada para el ensayo de pulsos de corriente de carga/descarga con una amplitud de corriente de C/5, Figura 6.

En la programación del ensayo experimental hay que especificar unos valores de corriente, tensión y temperatura máximos y mínimos para que en el caso de sufrir algún evento de seguridad el ciclador lo detecte y pare el ensayo experimental (límites de seguridad). Para el

caso de los ensayos experimentales realizados a una corriente de C/5 y C/3, es decir, con una corriente de 0.98 A y 1.633 A respectivamente, el límite de seguridad de la corriente se fija en 5 A y -5 A, pero para el caso del ensayo experimental realizado a una corriente de 1C, es decir, a 4.9 A, el límite de seguridad de la corriente hay que cambiarlo a 10 A y -10 A. Por lo que respecta a los demás parámetros, para los tres ensayos son los mismos.

ID	Step name	StepTime(hh:mm:ss.ms)	Rate(C)	Volt.(V)	Cur.(A)	Cap.(Ah)	Stop Rate(C)	Stop Cur.(A)
1	CC_Chg			2.5000	0.9800			
2	CCCV_Chg			4.2000	0.9800			0.1960
3	Cycle	Begin ID:	1 Times:	11				
4	End							

Start StepID	<input type="text" value="1"/>	Aux Safety Limit	<input checked="" type="checkbox"/> Volt. Lower	<input type="text" value="2.4000"/> V	Ratio	<input type="text" value=""/>	mg
Record Condition	<input checked="" type="checkbox"/> Time	<input type="text" value="10"/> sec	<input checked="" type="checkbox"/> Volt. Upper	<input type="text" value="4.2600"/> V	<input type="checkbox"/> Material	<input type="text" value=""/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Volt.	<input type="text" value="0.0500"/> V	<input checked="" type="checkbox"/> Cur. Lower	<input type="text" value="-5.0000"/> A	<input type="checkbox"/> Temp. Lower	<input type="text" value=""/>	<input type="checkbox"/> Spec. Cap	<input type="text" value=""/> mAh/g
<input type="checkbox"/> Cur.	<input type="text" value=""/>	<input checked="" type="checkbox"/> Cur. Upper	<input type="text" value="5.0000"/> A	<input checked="" type="checkbox"/> Temp. Upper	<input type="text" value="40.0"/> °C	<input type="checkbox"/> Loop Impedance	<input type="text" value=""/>
Delay Protect	<input type="checkbox"/> Step	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="checkbox"/> Diff Volt.	<input type="text" value=""/>	Impedance	<input type="text" value=""/> Ω
<input type="checkbox"/> Continue	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="checkbox"/> Temp. Continue	<input type="text" value=""/>	Aux Diff Volt.	<input type="text" value=""/> V
<input type="checkbox"/> Main Aux	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	Min	<input type="text" value=""/>	<input type="checkbox"/> Diff Main Aux	<input type="text" value=""/> V
	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	Max	<input type="text" value=""/>		
BFGS Protect Condition	<input type="checkbox"/> BFGS Rate	<input type="text" value=""/>	Plat Volt.	<input type="text" value=""/>	Aux Record Condition	<input checked="" type="checkbox"/> Time	<input type="text" value="10"/> sec
Detection Time	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	Plat1	<input type="text" value=""/>	<input checked="" type="checkbox"/> Volt.	<input type="text" value="0.0500"/> V	
Volt.	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	Plat2	<input type="text" value=""/>	<input type="checkbox"/> Temp.	<input type="text" value=""/>	°C
	<input type="text" value=""/>	<input type="text" value=""/>	Plat3	<input type="text" value=""/>			

Figura 6. Programación del ensayo experimental con una corriente de C/5

El primer ensayo experimental trata de 11 ciclos de carga/descarga de la celda de batería con una corriente de 1C. La carga va a durar una hora y la descarga otra hora, por lo tanto, todo el ensayo durará aproximadamente 1 día (22 horas).

El segundo ensayo experimental trata de 11 ciclos de carga/descarga de la celda de batería con una corriente de C/3. La carga va a durar tres horas y la descarga va a durar tres horas también, por lo tanto, el ensayo completo durará 3 días aproximadamente (66 horas).

El tercer ensayo experimental trata de 11 ciclos de carga/descarga de la celda de batería con una corriente de C/5. La carga va a durar cinco horas y la descarga va a durar cinco horas también, por lo tanto, el ensayo completo durará 5 días aproximadamente (110 horas).

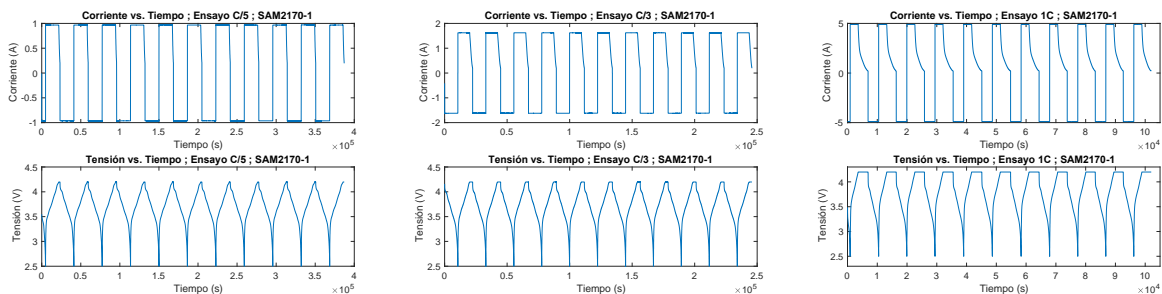


Figura 7. Ensayos experimentales de 11 ciclos de carga/descarga con pulsos de corriente de C/5, C/3 y 1C para la celda SAM2170-1

Para el estudio de la eficiencia coulombica lo que nos interesa del ensayo experimental es la capacidad (Ah) que se ha cargado en un ciclo de carga y la capacidad (Ah) que se ha descargado en el mismo ciclo de descarga.

Por otro lado, para el estudio de la eficiencia energética, lo que nos interesará del ensayo experimental será la energía que tiene la batería en la carga y la energía que tiene la batería en la descarga de un mismo ciclo.

Por último, para el estudio del error asociado a la medida de capacidad, es necesario conocer la capacidad que descarga la batería en un ciclo.

2.2.2. Resultados

Con los tres ensayos experimentales definidos, se aplican a tres celdas de batería definidas con las que se va a trabajar a lo largo de todo el trabajo de fin de estudios, SAM21700, y de cada ensayo se extraen los resultados de la capacidad (Ah), energía (Wh) y tiempo (s) que ha durado cada ciclo, tanto para la carga como para la descarga.

Solo se han tenido en cuenta los últimos 5 ciclos de cada ensayo, puesto que para dichos ciclos se considera que la batería ya se ha estabilizado. Por lo tanto, se van a extraer los datos de los ciclos 6, 7, 8, 9 y 10.

Con los resultados de los ensayos experimentales se hace el estudio del error asociado a la medida de la eficiencia coulombica, eficiencia energética y capacidad de la celda de batería. A continuación, se muestran los resultados extraídos de la primera celda de batería llamada SAM2170-1 y para el ensayo experimental realizado con una amplitud de pulsos de corriente de carga/descarga de 1C. Para los otros resultados pertenecientes a las otras dos celdas de batería SAM2170-2 y SAM2170-3 así como para los otros ensayos experimentales, el procedimiento ha sido el mismo, es por eso por lo que no se muestran tan detalladamente los resultados.

		Ensayo 1C					
		Ah_c (Ah)	Ah_d (Ah)	Wh_c (Wh)	Wh_d (Wh)	t_c (s)	t_d (s)
SAM2170-1	Ciclo 6	4,85	4,80	18,94	16,63	6120	3540
	Ciclo 7	4,84	4,81	18,92	16,73	6040	3550
	Ciclo 8	4,87	4,81	18,97	16,75	5900	3550
	Ciclo 9	4,87	4,80	18,97	16,69	5880	3540
	Ciclo 10	4,85	4,80	18,93	16,69	5860	3540
	Ciclo	4,86	4,80	18,95	16,70	5960	3544

Tabla 4. Resultados de los últimos 5 ciclos del ensayo experimental de 11 ciclos de carga/descarga con pulsos de corriente de 1C para la celda SAM2170-1

A lo largo del presente trabajo de fin de estudios, los resultados obtenidos de los ensayos experimentales se han extraído mediante la herramienta matemática Matlab, y se han exportado a una hoja de cálculo Excel para así tener todos los resultados presentes, de los nueve ensayos experimentales, y tener una mayor facilidad para manejar los datos para a continuación realizar el estudio del error asociado a la medida de la eficiencia coulombica, eficiencia energética y capacidad.

2.3. Error asociado a la medida de eficiencia energética

2.3.1. Cálculo del error de la eficiencia energética

La eficiencia energética se calcula a partir de los resultados obtenidos en el ensayo experimental, se llama eficiencia energética a la división entre la energía descargada (Wh_d) y la energía cargada (Wh_c) en el mismo ciclo.

$$Ef_{Energética}(\%) = \frac{Wh_d}{Wh_c} * 100 \quad (11)$$

La incertidumbre de la Ecuación (11) se calcula a partir de los dos errores que se definen en la Sección 1.4 del presente trabajo de fin de estudios, el error sistemático, Ecuación (3), y el error aleatorio, Ecuación (6).

Incetidumbre sistemática estándar

Para calcular la incertidumbre sistemática estándar se usa el método expuesto en la Sección 1.4.1.1.

Se calcula la variable (Wh_d) y su correspondiente incertidumbre sistemática estándar (bWh_d), a partir de la Ecuación (3).

$$Wh_d = I_d * V_d * t_d \quad (12)$$

$$(bWh_d)^2 = \left(\frac{\partial Wh_d}{\partial I_d} * bI\right)^2 + \left(\frac{\partial Wh_d}{\partial V_d} * bV\right)^2 \quad (13)$$

$$bWh_d = \sqrt{(V_d * t_d * bI)^2 + (I_d * t_d * bV)^2} = \sqrt{\left(\frac{Wh_d}{Ah_d} * t_d * bI\right)^2 + (Ah_d * bV)^2} \quad (14)$$

Se calcula la variable (Wh_c) y su correspondiente incertidumbre sistemática estándar (bWh_c), a partir de la Ecuación (3).

$$Wh_c = I_c * V_c * t_c \quad (15)$$

$$(bWh_c)^2 = \left(\frac{\partial Wh_c}{\partial I_c} * bI \right)^2 + \left(\frac{\partial Wh_c}{\partial V_c} * bV \right)^2 \quad (16)$$

$$bWh_c = \sqrt{(V_c * t_c * bI)^2 + (I_c * t_c * bV)^2} = \sqrt{\left(\frac{Wh_c}{Ah_c} * t_c * bI \right)^2 + (Ah_c * bV)^2} \quad (17)$$

La incertidumbre sistemática estándar de la corriente (bI) y la incertidumbre sistemática estándar de la tensión (bV) son conocidas, se encuentran en la Sección 1.5.1. Se considera que el tiempo no tiene error ($bt = 0$).

Finalmente, para calcular la incertidumbre sistemática estándar de la eficiencia energética se vuelve a aplicar la Ecuación (3).

$$\begin{aligned} (bEf_{Energética}(\%))^2 &= \left(\frac{\partial Ef_{Energética}(\%)}{\partial Wh_d} * bWh_d \right)^2 + \left(\frac{\partial Ef_{Energética}(\%)}{\partial Wh_c} * bWh_c \right)^2 = \\ & \left(\frac{100}{Wh_c} * bWh_d \right)^2 + \left(-\frac{100 * Wh_d}{(Wh_c)^2} * bWh_c \right)^2 \end{aligned} \quad (18)$$

Anteriormente se ha calculado la incertidumbre sistemática estándar (b) de las variables $Wh_{cargados}$, Ecuación (17), y $Wh_{descargados}$, Ecuación (14), por lo que sustituyéndolas en la Ecuación (18) se obtiene el resultado de la incertidumbre sistemática estándar de la eficiencia energética.

$$bEf_{Energética}(\%) = \sqrt{\left(\left(\frac{100}{Wh_c} \right)^2 * \left(\left(\frac{Wh_d}{Ah_d} * t_d * bI \right)^2 + (Ah_d * bV)^2 \right) \right) + \left(\left(-\frac{100 * Wh_d}{(Wh_c)^2} \right)^2 + \left(\left(\frac{Wh_c}{Ah_c} * t_c * bI \right)^2 + (Ah_c * bV)^2 \right) \right)} \quad (19)$$

Si se hace una reflexión sobre dicha ecuación, se llega a la conclusión de, que la incertidumbre sistemática estándar (b), depende del aparato de medición (en este caso el ciclador del laboratorio) con el que se están tomando las medidas, esta incertidumbre no se puede minimizar y es constante para todas las medidas tomadas.

Incertidumbre aleatoria estándar

Para realizar el cálculo de la incertidumbre aleatoria estándar se usan métodos estadísticos expuestos en la Sección 1.4.1.2. Por lo tanto, se aplica la Ecuación (5) seguida de la Ecuación (6).

$$S\bar{R} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Ef_{Energética_i} - \overline{Ef_{Energética}})^2}{N-1}}}{\sqrt{N}} \quad (20)$$

Error de la eficiencia energética

Una vez calculado el error sistemático, Ecuación (19), y el error aleatorio, Ecuación (20), se calcula el error de la eficiencia energética aplicando la Ecuación (2).

$$\Delta Ef_{Energética}(\%) = \frac{2 * \sqrt{(\max(bEf_{Energética}))^2 + (S\bar{R})^2}}{\overline{Ef_{Energética}}} * 100 \quad (21)$$

2.3.2. Resultados y análisis

Con los resultados extraídos de los ensayos experimentales, la capacidad (Ah), la energía (Wh) y el tiempo (s) que ha durado cada ciclo, tanto para la carga como para la descarga, se calcula la eficiencia energética y se hace el estudio del error que conlleva dicha medida.

A continuación, se va a presentar una parte del estudio realizado sobre el error asociado a la medida de la eficiencia energética de una celda de batería, en concreto se trata de la primera celda de batería para el ensayo experimental realizado a pulsos de corriente de carga/descarga con una amplitud de 1C.

		Ensayo 1C									
		Eficiencias		Incert. sistemática estándar, b			Incert. aleatoria est., s		Incertidumbre		Resultado
		Ef_e %	b2Q1 %%	b2Q2 %%	bEf_e %	S	S \bar{R}	U _R	%	Ef_e (%)	
SAM2170-1	Ciclo 6	87,78	0,00603	0,00907	0,12290	0,25513	0,11410	0,33577	0,38103	88,12 ± 0,38	
	Ciclo 7	88,44	0,00610	0,00907	0,12315						
	Ciclo 8	88,26	0,00607	0,00872	0,12161						
	Ciclo 9	87,97	0,00603	0,00863	0,12107						
	Ciclo 10	88,17	0,00606	0,00866	0,12131						
	Ciclo	88,12	Máxima		0,12315						

Tabla 5. Estudio del error asociado a la medida de eficiencia energética realizado con el ensayo experimental con una amplitud de corriente de 1C para la celda SAM2170-1

La siguiente tabla muestra todos los resultados del estudio realizado sobre el error asociado a la medida de la eficiencia energética. Resultados obtenidos para cada una de las celdas de batería SAM21700 correspondientes a cada uno de los ensayos experimentales realizados.

	Eficiencia energética		
	Corriente 1C	Corriente C/3	Corriente C/5
SAM2170-1	88,12 ± 0,38	94,10 ± 0,29	95,61 ± 0,77
SAM2170-2	87,98 ± 0,34	93,80 ± 0,33	95,73 ± 0,77
SAM2170-3	88,63 ± 0,33	94,89 ± 0,25	96,77 ± 0,77

Tabla 6. Resultados del estudio del error asociado a la medida de la eficiencia energética

El gráfico que se presenta a continuación representa la eficiencia energética de cada una de las tres celdas de batería. En el eje vertical se ha representado el valor de la eficiencia energética en porcentaje y en el eje horizontal nos encontramos con las tres celdas de batería SAM21700 con las que se ha trabajado a lo largo de todo el trabajo de fin de estudios. Además, se presentan las barras de errores correspondientes a cada una de las medidas, con ellas es más visible el error que podemos estar cometiendo y hacer comparaciones entre ellas. Si obtenemos una medida que no entre dentro de este error, daremos por errónea dicha medida y quedará fuera de cualquier posible estudio, es decir tendremos que rechazarla.

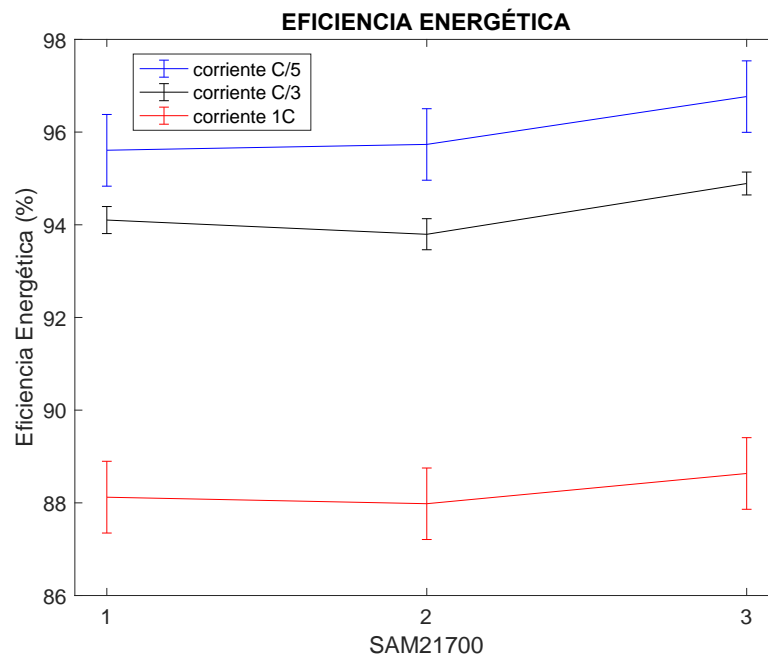


Figura 8. Resultados de la eficiencia energética

Para el estudio de la eficiencia energética el ensayo seleccionado es de crucial importancia para poder llegar a tener una eficiencia lo más próxima posible al 100%. Para amplitudes de corriente grandes, a 1C, la eficiencia energética es menor que con amplitudes de corriente inferiores como con una corriente de C/5.

Pero podemos decir que el estudio realizado da unos resultados correctos a la hora de querer medir eficiencias energéticas con el ciclador con el que estamos trabajando, en este caso no haría falta de equipos de medición con cámaras térmicas para poder tener así un control de la temperatura.

Los cicladores empleados en este trabajo de fin de estudios han mostrado tener la precisión suficiente para poder medir correctamente la eficiencia energética.

Además, los resultados que se obtienen con las tres celdas son coherentes como era de esperar, ya que se trata de un mismo modelo de celdas de batería, pero hay una medida que se sale fuera del límite de error que podemos cometer. Esa medida es la eficiencia energética calculada para la celda SAM2170-3, con una amplitud corriente de C/3. Esto puede deberse simplemente a un error estadístico, si tuviéramos el mismo estudio con más celdas de baterías podríamos comprobar a qué se debe ese hecho.

Podemos decir que para realizar el estudio de la eficiencia energética obtenemos buenos resultados utilizando cicladores sin cámaras térmicas, ya que se observa que los resultados son correctos.

2.4. Error asociado a la medida de eficiencia coulombica

2.4.1. Cálculo del error de la eficiencia coulombica

La eficiencia coulombica de una celda batería es la división entre la capacidad descargada (Ah_d) y la capacidad cargada (Ah_c) en el mismo ciclo.

$$Ef_{Coulombica}(\%) = \frac{Ah_d}{Ah_c} * 100 \quad (22)$$

La incertidumbre de la eficiencia coulombica se calcula a partir de los errores: error sistemático y error aleatorio, los dos definidos en la Sección 1.4.

Incertidumbre sistemática estándar

Para calcular la incertidumbre sistemática estándar se usa el método expuesto en la Sección 1.4.1.1.

Se calcula la variable (Ah_d) y su correspondiente incertidumbre sistemática estándar (bAh_d), a partir de la Ecuación (3).

$$Ah_d = I_d * t_d \quad (23)$$

$$bAh_d = \frac{\partial Ah_d}{\partial I_d} * bI = t_d * bI \quad (24)$$

Se calcula la variable ($Ah_{cargados}$) y su correspondiente incertidumbre sistemática estándar ($bAh_{cargados}$), a partir de la Ecuación (3).

$$Ah_c = I_c * t_c \quad (25)$$

$$bAh_c = \frac{\partial Ah_c}{\partial I_c} * bI = t_c * bI \quad (26)$$

La incertidumbre sistemática estándar de la corriente (bI) y la incertidumbre sistemática estándar de la tensión (bV) son conocidas, se encuentran en la Sección 1.5.1. Se considera que el tiempo no tiene error ($bt = 0$).

Finalmente, para calcular la incertidumbre sistemática estándar de la eficiencia coulombica se vuelve a aplicar la Ecuación (3).

$$\begin{aligned} (bEf_{Coulombica}(\%))^2 = & \\ \left(\frac{\partial Ef_{Coulombica}(\%)}{\partial Ah_d} * bAh_d \right)^2 + \left(\frac{\partial Ef_{Coulombica}(\%)}{\partial Ah_c} * bAh_c \right)^2 = & \quad (27) \\ \left(\frac{100}{Ah_c} * bAh_d \right)^2 + \left(-\frac{100 * Ah_d}{(Ah_c)^2} * bAh_c \right)^2 & \end{aligned}$$

Anteriormente se ha calculado la incertidumbre sistemática estándar (b) de las variables $Ah_{cargados}$, Ecuación (26) ,y $Ah_{descargados}$, Ecuación (24) , por lo que sustituyéndolas en la Ecuación (27) se obtiene el resultado de la incertidumbre sistemática estándar de la eficiencia coulombica.

$$bEf_{Coulombica}(\%) = \sqrt{\left(\frac{100}{Ah_c} * t_d * bI \right)^2 + \left(-\frac{100 * Ah_d}{(Ah_c)^2} * t_c * bI \right)^2} \quad (28)$$

Al igual que se ha comprobado con el cálculo de la incertidumbre sistemática estándar de la eficiencia energética, Ecuación (19), la incertidumbre sistemática estándar de la eficiencia coulombica depende del aparato de medición, es por eso por lo que siempre vamos a tener este error.

Incertidumbre aleatoria estándar

Para realizar el cálculo de la incertidumbre aleatoria estándar se usan métodos estadísticos expuestos en la Sección 1.4.1.2. Por lo tanto, se aplica la Ecuación (5) seguida de la Ecuación (6).

$$S\bar{R} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Ef_{Coulombica_i} - \overline{Ef_{Coulombica}})^2}{N-1}}}{\sqrt{N}} \quad (29)$$

Error de la eficiencia coulombica

Una vez calculado el error sistemático, Ecuación (28), y el error aleatorio, Ecuación (29), se calcula el error de la eficiencia coulombica aplicando la Ecuación (2).

$$\Delta Ef_{Coulombica}(\%) = \frac{2 * \sqrt{(\max(bEf_{Coulombica}))^2 + (S\bar{R})^2}}{Ef_{Coulombica}} * 100 \quad (30)$$

2.4.2. Resultados y análisis

Al igual que se ha realizado con el estudio del error asociado a la medida de la eficiencia energética, con los resultados extraídos de los ensayos experimentales, la capacidad (Ah), la energía (Wh) y el tiempo (s) que ha durado cada ciclo, tanto para la carga como para la descarga, se calcula la eficiencia coulombica y se hace el estudio del error que conlleva dicha medida.

A continuación, se va a presentar una parte del estudio realizado sobre el error asociado a la medida de eficiencia coulombica de una celda de batería, en concreto se trata de la primera celda de batería para el ensayo experimental realizado a pulsos de corriente de carga/descarga con una amplitud de 1/C.

		Ensayo 1C									
		Eficiencias			Incert. sistemática estándar, b		Incert. aleatoria est., s		Incertidumbre		Resultado
		Ef_c	b2Q1	b2Q2	bEf_c	S	S \bar{R}	U _R	%	Ef_c (%)	
		%	%%	%%	%						
SAM2170-1	Ciclo 6	98,89	0,00257	0,00751	0,10038	0,29070	0,13000	0,32849	0,33195	98,96 ± 0,33	
	Ciclo 7	99,43	0,00259	0,00742	0,10008						
	Ciclo 8	98,91	0,00257	0,00694	0,09747						
	Ciclo 9	98,63	0,00255	0,00685	0,09695						
	Ciclo 10	98,93	0,00257	0,00689	0,09723						
	Ciclo	98,96	Máxima		0,10038						

Tabla 7. Estudio del error asociado a la medida de eficiencia coulombica realizado con el ensayo experimental con una amplitud de corriente de 1C para la celda SAM2170-1

La siguiente tabla muestra todos los resultados del estudio realizado sobre el error asociado a la medida de la eficiencia coulombica. Resultados obtenidos para cada una de las celdas de batería SAM21700 correspondientes a cada uno de los ensayos experimentales realizados.

	Eficiencia coulombica		
	Corriente 1C	Corriente C/3	Corriente C/5
SAM2170-1	98,96 ± 0,33	99,89 ± 0,54	99,87 ± 0,83
SAM2170-2	99 ± 0,23	99,64 ± 0,54	100,01 ± 0,79
SAM2170-3	99,21 ± 0,31	100,8 ± 0,5	101,03 ± 0,85

Tabla 8. Resultados del estudio del error asociado a la medida de la eficiencia coulombica

El gráfico que se presenta a continuación representa la eficiencia coulombica de las tres celdas de batería. En el eje vertical se ha representado el valor de la eficiencia coulombica en porcentaje y en el eje horizontal nos encontramos con las tres celdas de batería SAM21700, que es la celda seleccionada para este trabajo fin de estudios. Además, se presentan las barras de errores correspondientes a cada una de las medidas, con ellas es más visible el error que podemos estar cometiendo y hacer comparaciones entre ellas.

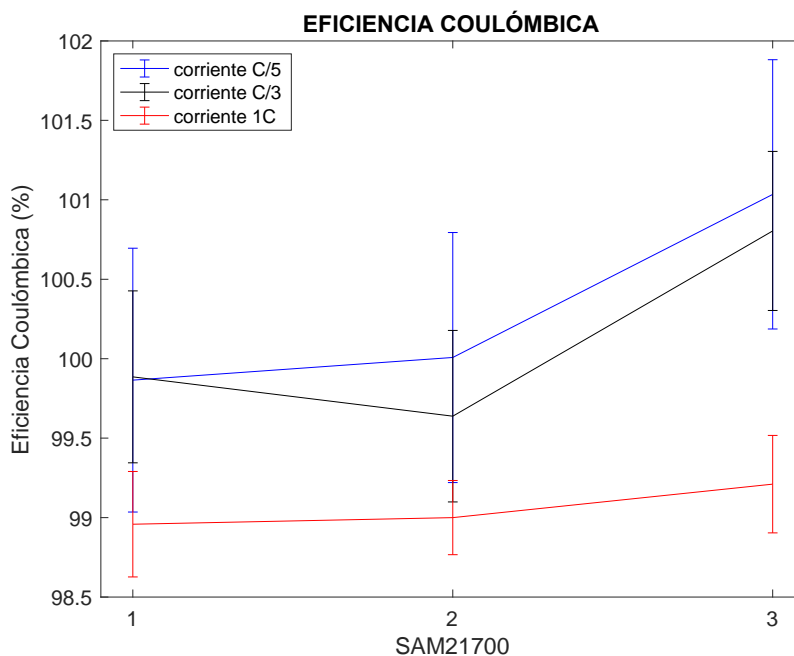


Figura 9. Resultados de la eficiencia coulombica

En el gráfico anterior hemos representado el estudio del error asociado a la medida de la eficiencia coulombica. En el eje vertical se ha representado el valor de la eficiencia coulombica expresado en porcentaje, y en el eje horizontal nos encontramos con las tres celdas de batería SAM21700, que es la celda seleccionada para este trabajo fin de estudios.

Viendo este gráfico llegamos a conclusiones muy importantes. La primera conclusión a la que llegamos es que no vemos diferencia en hacer el estudio de la eficiencia coulombica con una corriente a C/5 o una corriente a C/3, siempre que sea en la misma celda de batería. Por el

contrario, si el estudio lo realizamos con una corriente superior como es la corriente a 1C, el error que cometemos en dicho estudio es menor, pero a cambio bajamos la eficiencia coulombica de la celda.

Pero fijándonos en la eficiencia coulombica obtenida, llegamos a la conclusión que con este tipo de ensayo empleado y con el aparato de medición utilizado no conseguimos la precisión adecuada para poder hacer un estudio correcto del error asociado a la medida de la eficiencia coulombica de una celda de batería ion-litio. La eficiencia coulombica calculada obtiene valores incluso superiores al 100%, esto teóricamente se sabe que no puede ser, pero en la práctica, como en este caso, pueden influir otros parámetros que no hemos tenido en cuenta como la temperatura para que la eficiencia coulombica obtenida supere el 100%.

El ciclador con el que se está trabajando en este trabajo de fin de estudios no tiene precisión suficiente para medir la eficiencia coulombica de una celda, ya que llega a valores superiores al 100%

Por lo tanto, podemos decir que, con el método de medición empleado, el único ensayo que nos puede dar unos resultados aceptables es el ensayo a pulsos de corriente de carga/descarga con una amplitud de corriente de 1C, para el resto de los ensayos realizados es necesario tener un control de la temperatura, ya que por el contrario no conseguimos tener una buena precisión a la hora de hacer el estudio del error asociado a la medida de eficiencia coulombica de una celda de batería ion litio.

2.5. Error asociado a la medida de capacidad

2.5.1. Cálculo del error asociado a la medida de capacidad

La medida de capacidad de la celda de batería se calcula a partir de los resultados obtenidos en el ensayo experimental, se llama capacidad (Ah) a la multiplicación de la corriente por el tiempo, obtenidos de la descarga de la celda de batería.

$$Ah_d = I_d * t_d \quad (31)$$

La incertidumbre de la Ecuación (31) se calcula a partir de los dos errores que se definen en la Sección 1.4 del presente trabajo de fin de estudios, el error sistemático, Ecuación (3), y el error aleatorio, Ecuación (6).

Incetidumbre sistemática estándar

Para calcular la incertidumbre sistemática estándar se usa el método expuesto en la Sección 1.4.1.1.

Como la variable $Ah_{descargados}$ solo depende del tiempo y de la corriente y se considera que el tiempo no tiene error ($bt = 0$), la incertidumbre sistemática estándar de la Ecuación (31) se calcula directamente aplicando la Ecuación (3).

$$bAh_d = \frac{\partial Ah_d}{\partial I_d} * bI = t_d * bI \quad (32)$$

La incertidumbre sistemática estándar (b) de la corriente es conocida, se encuentra en la Sección 1.5.1. Se considera que el tiempo no tiene error ($b_{tiempo} = 0$).

Incertidumbre aleatoria estándar

Para realizar el cálculo de la incertidumbre aleatoria estándar se usan métodos estadísticos expuestos en la Sección 1.4.1.2. Por lo tanto, se aplica la Ecuación (5) seguida de la Ecuación (6).

$$S\bar{R} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Ah_{di} - \overline{Ah_d})^2}{N-1}}}{\sqrt{N}} \quad (33)$$

Error asociado a la medida de capacidad

Una vez calculado el error sistemático, Ecuación (32), y el error aleatorio, Ecuación (33) se calcula el error asociado a la medida de capacidad aplicando la Ecuación (2).

$$\Delta Ah_d = 2 * \sqrt{(\max(bAh_d))^2 + (S\bar{R})^2} \quad (34)$$

2.5.2. Resultados y análisis

Para terminar de hacer los diferentes estudios con los ensayos experimentales realizados a pulsos de corriente de carga/descarga se ha realizado el estudio del error asociado a la medida de capacidad. Con los resultados extraídos de los ensayos experimentales, la capacidad (Ah), la energía (Wh) y el tiempo (s) que ha durado cada ciclo, tanto para la carga como para la descarga, se calcula la capacidad descargada en un ciclo y se hace el estudio del error que conlleva dicha medida.

A continuación, se va a presentar una parte del estudio realizado sobre el error asociado a la medida de capacidad de una celda de batería, en concreto se trata de la primera celda de batería para el ensayo experimental realizado a pulsos de corriente de carga/descarga con una amplitud de 1C.

		Ensayo 1C								
		Capacidad	Incert. sistemática estándar, b			Incert. aleatoria est., s		Incertidumbre		Resultado
		Ah_d Ah	b2Q1	b2Q2	bAh_d Ah	S	S \bar{R}	U _R	%	Ah_d (Ah)
SAM2170-1	Ciclo 6	4,80			0,00245833					
	Ciclo 7	4,81			0,00246528					
	Ciclo 8	4,81			0,00246528					
	Ciclo 9	4,80			0,00245833	0,00795	0,00356	0,00865		
	Ciclo 10	4,80			0,00245833					
	Ciclo	4,80		Máxima	0,00246528					4,8 ± 0,01

Tabla 9. Estudio del error asociado a la medida de capacidad realizado con el ensayo experimental con una amplitud de corriente de 1C para la celda SAM2170-1

La siguiente tabla muestra todos los resultados del estudio realizado sobre el error asociado a la medida capacidad. Resultados obtenidos para cada una de las celdas de batería SAM21700 correspondientes a cada uno de los ensayos experimentales realizados.

		Medida de capacidad		
		Corriente 1C	Corriente C/3	Corriente C/5
SAM2170-1		4,8 ± 0,01	4,75 ± 0,02	4,79 ± 0,01
SAM2170-2		4,8 ± 0,01	4,8 ± 0,02	4,75 ± 0,01
SAM2170-3		4,85 ± 0,01	4,76 ± 0,02	4,8 ± 0,02

Tabla 10. Resultados del estudio del error asociado a la medida de capacidad

El gráfico que se presenta a continuación representa la medida de capacidad de las tres celdas de batería.

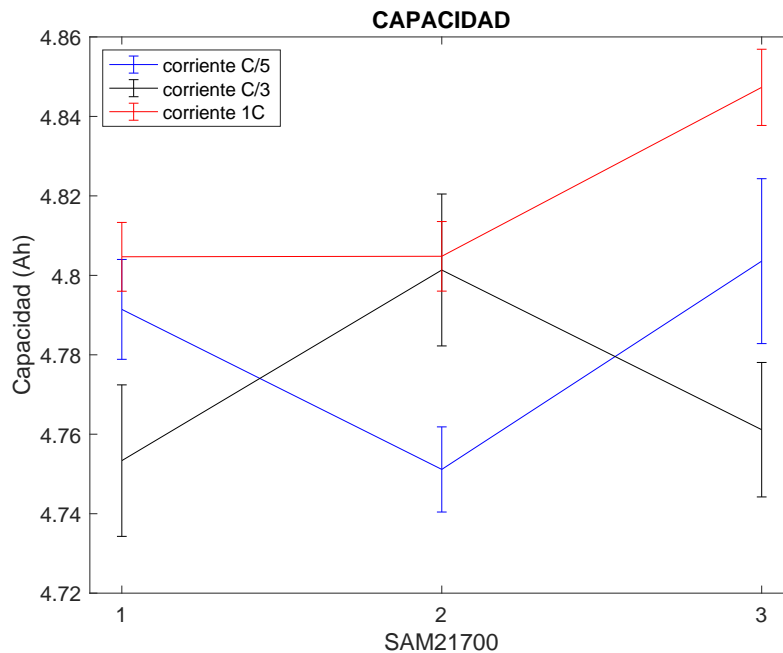


Figura 10. Resultados de la capacidad

Este gráfico representa la capacidad de las tres celdas de batería. En el eje vertical se ha representado el valor de la capacidad en Amperios-hora y en el eje horizontal nos encontramos con las tres celdas de batería SAM21700, que es la celda seleccionada para este trabajo fin de estudios.

En este último estudio del error asociado a la medida de capacidad que hemos realizado para ciclos de carga/descarga continuos, podemos ver que es de crucial importancia el parámetro de la temperatura, ya que observando el gráfico de los resultados nos damos cuenta de que existen algunos resultados anómalos.

Tanto para la medida de capacidad como para la medida de eficiencia energética es imprescindible tener en cuenta el parámetro de la temperatura

Al igual que pasaba con el estudio de la eficiencia coulombica, ya que para dicho estudio al final uno de los datos que se utilizaban era la capacidad en la descarga de un ciclo que es justamente el dato que estamos analizando en este nuevo estudio, llegamos a conclusiones muy similares. Para poder tener una buena precisión a la hora de medir la capacidad de la celda de batería es necesario tener en cuenta otro parámetro para realizar dicho estudio, la temperatura, para ello es necesario hacer los ensayos experimentales en el laboratorio con cicladores específicos que contengan dicha posibilidad de controlar la temperatura, a los cuales se les hace referencia como cicladores con cámaras térmicas.

Capítulo 3: Método de parametrización basado en un modelo simplificado de la celda de batería

3.1. Introducción

Como bien dice el título de este apartado, a continuación, se va a desarrollar un método de parametrización de la celda de batería con un modelo simplificado de la misma. Para ello se va a hacer uso de tres ensayos experimentales los cuales van a ser empleados a tres celdas de batería SAM21700 con las que se está trabajando a lo largo de todo este trabajo de fin de estudios.

El objetivo de este apartado va a ser hacer un estudio sobre el error de la impedancia de cada celda de batería y comprobar cuál de los tres ensayos planteados, y cuál es la manera más eficiente a la hora de querer medir la impedancia de una celda de batería de ion-litio. Además, se comprobará que los resultados son semejantes para las tres celdas de batería, ya que se trata de un mismo modelo y por lo tanto teóricamente se espera que tengan el mismo resultado.

3.2. Error asociado a la medida de la resistencia interna, modelo simplificado

Lo primero que hay que hacer es definir el circuito equivalente que va a representar a nuestra celda de batería. En este caso, como ya se ha especificado anteriormente, en la Sección 1.3.4, va a tratarse de un circuito Thevenin compuesto por una fuente de tensión, una resistencia en serie y una rama en paralelo con una resistencia y un condensador.

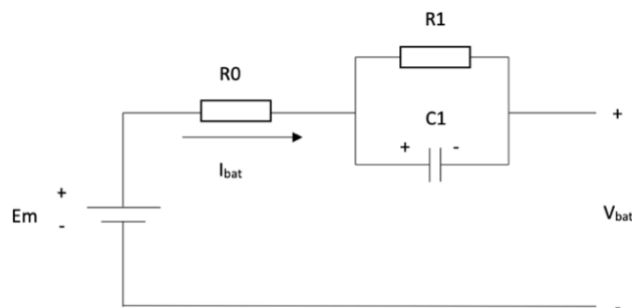


Figura 11. Circuito equivalente Thevenin seleccionado del que se partirá para desarrollar el modelo simplificado de la celda de batería

En este capítulo, la medición de la impedancia de la celda de batería se va a hacer de manera “manual”, a partir de unos ensayos experimentales realizados a una celda de batería, los cuales van a consistir en pulsos de carga y descarga de la celda. El circuito de la Figura 11 se va a simplificar a una única resistencia interna, la cual va a ser medida a partir de los ensayos experimentales de una forma muy concreta.

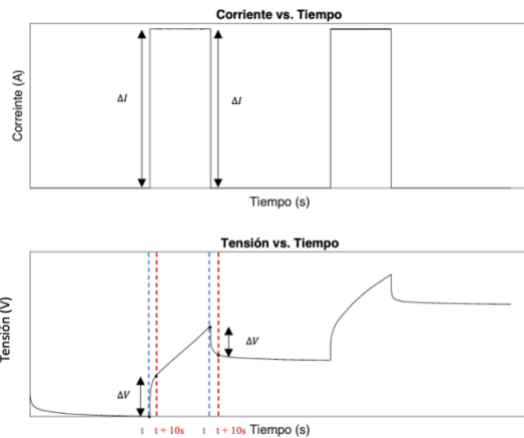


Figura 12. Pulsos de corriente de carga con representación para el cálculo de la resistencia interna

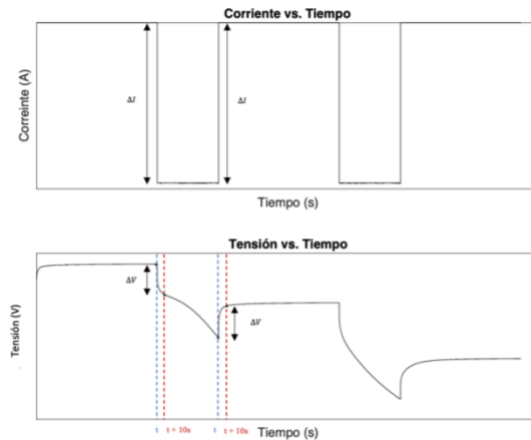


Figura 13. Pulsos de corriente de descarga con representación para el cálculo de la resistencia interna

Con los ensayos experimentales que se van a realizar lo que se quiere medir es la resistencia interna de la celda. Para el estudio de la resistencia interna lo que nos interesa del ensayo experimental es la corriente de los pulsos de carga y descarga y la diferencia de tensión que sufre la celda en dichos pulsos de corriente.

Para poder hacer la simplificación que hemos hecho en el circuito equivalente que representa a nuestra celda de batería es necesario hacer la medición de la resistencia interna de una manera muy particular. La medida de la tensión de la celda se va a tomar 10 segundos después del pulso de corriente, ya que pasado ese tiempo el condensador de la rama RC se considera que se ha cargado y se puede calcular fácilmente la resistencia interna del conjunto del circuito eléctrico que equivale a la celda de batería, Figura 14.

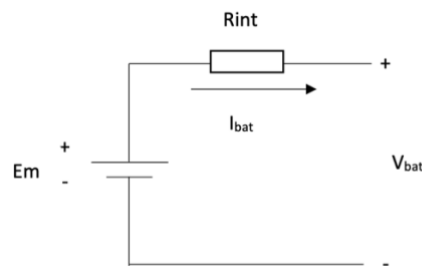


Figura 14. Circuito equivalente con la impedancia de la celda de batería que va a considerarse para el método de parametrización basado en un modelo simplificado

Por lo tanto, nuestro circuito equivalente que representa a la celda de batería tiene dos parámetros desconocidos, la tensión en circuito abierto (E_m) y la resistencia interna (R_{int}), los cuales van a extraer de los diferentes ensayos experimentales.

Como se está trabajando con ensayos experimentales, es de crucial importancia conocer el error que se está cometiendo, en este caso a la hora de medir la resistencia interna de la celda de batería. Para ello se va a hacer el estudio del error de la resistencia interna

aplicando las ecuaciones necesarias del cálculo de errores que han sido expresadas en la Sección 1.4 de este trabajo de fin de estudios.

La resistencia interna se calcula a partir de la división entre la diferencia de tensión que produce un pulso de corriente y la amplitud de dicho pulso de corriente.

$$R_{10s} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (35)$$

Para calcular el error que se comete a la hora de aplicar la Ecuación (35), es necesario conocer la incertidumbre sistemática estándar (bR_{10s}) y la incertidumbre aleatoria estándar ($S\bar{R}$), aplicando las ecuaciones; Ecuación (3) y Ecuación (6) respectivamente.

$$(bR_{10s})^2 = \left(\frac{\partial R_{10s}}{\partial \Delta I} * bCorriente \right)^2 + \left(\frac{\partial R_{10s}}{\partial \Delta V} * bTension \right)^2 \quad (36)$$

$$bR_{10s} = \sqrt{\left(\frac{-\Delta V}{\Delta I^2} * bCorriente \right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta I} * bTension \right)^2} \quad (37)$$

$$S\bar{R} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_{10s} - \bar{R}_{10s})^2}{N-1}}}{\sqrt{N}} \quad (38)$$

Por último, se obtiene la incertidumbre de la resistencia interna, a partir de la Ecuación (2), que se ha calculado a partir de las dos últimas ecuaciones, Ecuación (37) y Ecuación (38), error sistemático y error aleatorio.

$$\Delta R_{10s} = 2 * \sqrt{(\max (bR_{10s}))^2 + (S\bar{R})^2} \quad (39)$$

Cabe recordar que la incertidumbre sistemática estándar de la corriente y de la tensión son conocidas y son parámetros específicos del equipo de medición con el que se está trabajando, todo ello se encuentra detallado en la Sección 1.5.1.

3.3. Ensayos experimentales y resultados

3.3.1. Ensayos experimentales

Los tres ensayos experimentales constan de los mismos pasos, la única diferencia entre ellos es la intensidad que se le proporciona a la batería en la carga y la intensidad que se le pide a la batería en la descarga.

La programación consta de los siguientes pasos:

- 1) 10 pulsos de carga, cada uno de 0.49 Ah con una determinada corriente (diferente para cada ensayo: 1C, C/3 o C/5).
- 2) 10 pulsos de descarga, cada uno de 0.49 Ah con una determinada corriente (diferente para cada ensayo: 1C, C/3 o C/5).
- 3) Repetir dichos pasos 4 veces, de tal forma que obtenemos 4 ciclos de carga y descarga a pulsos de corriente.

Antes de comenzar cada ensayo, lo primero que se hará es programar un ciclo de carga/descarga para asegurarnos de que el ensayo a pulsos de corriente se realiza con la celda de batería en una situación estable.

Lo que se ha programado son pulsos de corriente a los que se va a someter a la batería, y del ensayo experimental obtenemos, entre otras muchas cosas la medida de tensión de la celda.

ID	Step name	StepTime(hh:mm:ss.ms)	Rate(C)	Volt.(V)	Cur.(A)	Cap.(Ah)	Stop Rate(C)	Stop Cur.(A)
1	CC_Dchg			2.5000	0.9800			
2	CCCV_Chg			4.2000	0.9800			0.1960
3	CC_Dchg			2.5000	1.6330			
4	Rest	01:00:00:000						
5	CCCV_Chg			4.2000	0.9800			0.1960
	IF		Cap.	>=	0.4900Ah	Goto:4		
6	Rest	01:00:00:000						
7	CC_Dchg			2.5000	0.9800			
	IF		Cap.	>=	0.4900Ah	Goto:6		
8	Rest	01:00:00:000						
9	Cycle	Begin ID:	5 Times:	4				
10	End							

Standard Settings Professional Settings

Start StepID: 1

Record Condition: Time 1 sec

Delay Protect: Step, Continue, Main Aux

BFGS Protect Condition: BFGS Rate, Detection Time, Volt.

Safety Limit: Volt. Lower 2.4500 V, Volt. Upper 4.2800 V, Cur. Lower -5 A, Cur. Upper 5 A, Cap. Upper, Delay Time

Plat Volt.: Plat1, Plat2, Plat3

Aux Safety Limit: Volt. Lower 2.4000 V, Volt. Upper 4.2800 V, Temp. Lower, Temp. Upper 40.0 °C, Diff Volt., Temp. Continue, Min, Max

Aux Record Condition: Time 1 sec, Volt., Temp.

Ratio: Material, Spec. Cap, Loop Impedance, Impedance, Aux Diff Volt., Diff Main Aux

Remarks: Creator, P/N, Remarks

Buttons: Save, Load, Backup Setting

Figura 15. Programación del ensayo experimental para el método de parametrización basado un modelo simplificado de la celda de batería con una amplitud de corriente de C/5

El primer ensayo experimental trata de 4 ciclos de carga/descarga de la celda de batería. Con una corriente de 1C. Se estima que la duración del ensayo completo va a ser de 90 horas aproximadamente (cuatro días aproximadamente).

El segundo ensayo experimental trata de 4 ciclos de carga/descarga de la celda de batería. Con una corriente de C/3. Se estima que la duración del ensayo completo va a ser de 110 horas aproximadamente (cuatro días y medio aproximadamente).

El tercer ensayo experimental trata de 4 ciclos de carga/descarga de la celda de batería. Con una corriente de C/5. Se estima que la duración del ensayo completo va a ser de 130 horas aproximadamente (cinco días y medio aproximadamente).

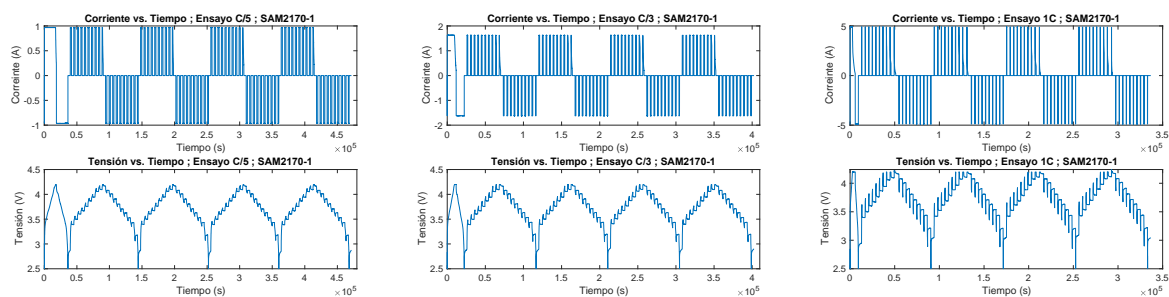


Figura 16. Ensayos experimentales para el método de parametrización basado en un modelo simplificado de la celda de batería con una amplitud de corriente de C/5, C/3 y 1C, celda SAM2170-1.

3.3.2. Resultados

Con los tres ensayos experimentales definidos, se aplican a las tres celdas de batería seleccionadas, SAM21700. En cada ensayo, y por cada pulso de corriente, tanto al principio como al final del pulso, se calcula la resistencia interna de la celda de batería. Como se ha dicho anteriormente, la resistencia interna se va a calcular a los 10 segundos, esto quiere decir que la diferencia de tensión que se coge para el cálculo es 10 segundos después de haberse producido el pulso de corriente, puesto que se considera que en dicho tiempo el condensador de la rama RC de nuestro circuito equivalente se ha cargado ($3\tau=9$ segundos).

Con los resultados de la resistencia interna se hace el estudio para el cálculo del error de la resistencia interna, para ello se ha utilizado una hoja de cálculo Excel, donde se han introducido los resultados obtenidos del ensayo experimental para todos los ensayos realizados, un total de 9 ensayos. Como ejemplo se muestra a continuación los resultados del ensayo experimental realizado a una corriente de C/5 para el primer ciclo de carga/descarga de la primera celda de batería de ion-litio.

		Ensayo C/5 Ciclo 1							
		carga				descarga			
		SOC (p.u.)	ΔI_c (A)	ΔV_c (V)	Rint (10s) (Ohmios)	SOC (p.u.)	ΔI_d (A)	ΔV_d (V)	Rint (10s) (Ohmios)
SAM2170-1	Pulso 1	0,000000	0,967200	0,073800	0,076303	1,000000	0,964100	0,037800	0,039208
		0,101954	0,967200	0,036600	0,037841	0,893872	0,964100	0,035400	0,036718
	Pulso 2	0,101954	0,967200	0,041200	0,042597	0,893872	0,964100	0,035000	0,036303
		0,203910	0,967200	0,035600	0,036807	0,787736	0,964100	0,035700	0,037029
	Pulso 3	0,203910	0,967200	0,037500	0,038772	0,787736	0,964100	0,036600	0,037963
		0,305871	0,967200	0,035100	0,036290	0,681590	0,967200	0,033800	0,034946
	Pulso 4	0,305871	0,964100	0,036000	0,037341	0,681590	0,964100	0,036000	0,037341
		0,407793	0,967200	0,036600	0,037841	0,575464	0,964100	0,033500	0,034747
	Pulso 5	0,407793	0,964100	0,037200	0,038585	0,575464	0,964100	0,034700	0,035992
		0,509745	0,967200	0,036000	0,037221	0,469344	0,964100	0,033500	0,034747
	Pulso 6	0,509745	0,967200	0,038400	0,039702	0,469344	0,964100	0,035700	0,037029
		0,611586	0,967200	0,034100	0,035256	0,363025	0,964100	0,035000	0,036303
	Pulso 7	0,611586	0,967200	0,036200	0,037428	0,363025	0,961000	0,036000	0,037461
		0,713465	0,970300	0,034100	0,035144	0,256578	0,964100	0,035000	0,036303
	Pulso 8	0,713465	0,967200	0,034700	0,035877	0,256578	0,961000	0,036900	0,038398
		0,815286	0,970300	0,035300	0,036381	0,150140	0,964100	0,037500	0,038896
	Pulso 9	0,815286	0,967200	0,034500	0,035670	0,150140	0,961000	0,039000	0,040583
		0,917143	0,967200	0,036600	0,037841	0,043712	0,961000	0,046800	0,048699
	Pulso 10	0,917143	0,967200	0,034700	0,035877	0,043712	0,964100	0,051400	0,053314
		1,000000	0,195300	0,008000	0,040963	0,000000	0,964100	0,128400	0,133181

Tabla 11. Resultados del primer ciclo del ensayo experimental con una corriente de C/5 para la celda SAM2170-1

3.4. Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos de los ensayos experimentales se han obtenido mediante la herramienta matemática Matlab, y una vez extraídos los resultados se han exportado a una hoja de cálculo Excel para así tener todos los resultados presentes, de los nueve ensayos experimentales, y así tener una mayor facilidad para manejar los datos y hacer el estudio de la resistencia interna de cada celda de batería.

Una vez tenidos los resultados en la hoja Excel, se han aplicado las ecuaciones para el cálculo de errores expuestas en secciones anteriores y se ha realizado dicho estudio.

A continuación, se muestra parte de la tabla Excel que ha sido utilizada para el estudio del error de la resistencia interna, en ella podemos ver dicho estudio realizado para los dos primeros pulsos de corriente de carga de la primera celda de batería.

		Ensayo C/5 Ciclo 1-Carga											
		SOC (p.u.)	ΔI_c (A)	ΔV_c (V)	Rint (10s) (Ohmios)	Incert. sistemática estándar, b			Incert. aleatoria est., s		Incertidumbre	Resultado	
						b2Q1 %	b2Q2 %	bR_int %	S	S \bar{R}	U $_R$	Rint (10s) (Ohmios)	
SAM2170-1	Pulso 1	Ciclo 1	0,000	0,96720	0,07380	0,07630	0,000197	0,002585	0,002592	0,03136	0,01568	0,03179	0,0923±0,0318
		Ciclo 2	0,000	0,96720	0,07440	0,07692	0,000199	0,002585	0,002592				
		Ciclo 3	0,000	0,97030	0,13520	0,13934	0,000359	0,002577	0,002601				
		Ciclo 4	0,000	0,96720	0,07410	0,07661	0,000198	0,002585	0,002592				
		Ciclo	0,000	0,96798	0,08938	0,09229	Máxima						
	Pulso 2	Ciclo 1	0,102	0,96720	0,03660	0,03784	0,000098	0,002585	0,002587	0,00117	0,00058	0,00530	0,0371±0,0053
		Ciclo 2	0,102	0,96720	0,03690	0,03815	0,000099	0,002585	0,002587				
		Ciclo 3	0,101	0,96720	0,03440	0,03557	0,000092	0,002585	0,002586				
		Ciclo 4	0,101	0,97030	0,03570	0,03679	0,000095	0,002577	0,002578				
		Ciclo	0,102	0,96798	0,03590	0,03709	Máxima						
SAM2170-1	Pulso 2	Ciclo 1	0,102	0,96720	0,04120	0,04260	0,000110	0,002585	0,002587	0,00128	0,00064	0,00533	0,0418±0,0053
		Ciclo 2	0,102	0,96720	0,04090	0,04229	0,000109	0,002585	0,002587				
		Ciclo 3	0,101	0,97030	0,03870	0,03989	0,000103	0,002577	0,002579				
		Ciclo 4	0,101	0,96720	0,04100	0,04239	0,000110	0,002585	0,002587				
		Ciclo	0,102	0,96798	0,04045	0,04179	Máxima						
	Pulso 2	Ciclo 1	0,204	0,96720	0,03560	0,03681	0,000095	0,002585	0,002587	0,00104	0,00052	0,00528	0,0359±0,0053
		Ciclo 2	0,205	0,96720	0,03540	0,03660	0,000095	0,002585	0,002587				
		Ciclo 3	0,203	0,97030	0,03350	0,03453	0,000089	0,002577	0,002578				
		Ciclo 4	0,202	0,97030	0,03470	0,03576	0,000092	0,002577	0,002578				
		Ciclo	0,203	0,96875	0,03480	0,03592	Máxima						

Tabla 12. Estudio del error asociado a la resistencia interna los dos primeros pulsos de carga del primer ciclo del ensayo experimental con una corriente de C/5 para la celda SAM2170-1

Con el estudio completo del error asociado a la medida de resistencia interna de la celda de batería correspondiente al circuito equivalente que modela en este caso la celda de batería, a continuación se va a realizar un análisis con los resultados obtenidos, divididos en tres apartados, cada uno de ellos analizará el estudio del error de la resistencia interna medida con cada uno de los tres ensayos experimentales con los que se está trabajando, ensayos realizados con una corriente 1C, C/3 y C/5, y teniendo en cuenta que cada ensayo experimental ha sido aplicado a cada una de las tres celdas de batería con las que se está trabajando.

A lo largo del análisis de resultados se va a ir justificando cuál se los tres ensayos utilizados es el más adecuado para la medición de la resistencia interna de una celda de batería de litio.

3.4.1. Error de la resistencia interna para el ensayo experimental con una corriente de 1C

A continuación, se muestra una tabla en modo resumen con los resultados del estudio de la resistencia interna realizado a la primera celda de batería, llamada SAM2170-1.

En ella se muestran los diferentes resultados de resistencia interna (con su respectivo error) obtenidos en función del estado de carga, así como la tensión en circuito abierto que pertenece a cada uno de los estados de carga expuestos.

SAM2170_1_1C						
	Carga			Descarga		
	Em (V)	SOC (p.u.)	Rint (Ohmios)	Em (V)	SOC (p.u.)	Rint (Ohmios)
Pulso 1	3,0340	0,0000	0,0531±0,002	4,1660	1,0000	0,0385±0,002
	3,4162	0,0674	0,033±0,0012	4,0804	0,8912	0,0339±0,0015
Pulso 2		0,0674	0,037±0,0012		0,8912	0,0369±0,0017
	3,5190	0,1347	0,0323±0,0012	4,0126	0,7825	0,0336±0,0014
Pulso 3		0,1347	0,035±0,0012		0,7825	0,0379±0,0016
	3,6157	0,2021	0,0317±0,0011	3,9099	0,6737	0,0333±0,0014
Pulso 4		0,2021	0,0339±0,0016		0,6737	0,0373±0,0015
	3,6858	0,2695	0,0319±0,0014	3,8106	0,5650	0,0335±0,0013
Pulso 5		0,2695	0,0351±0,0018		0,5650	0,0358±0,0015
	3,7779	0,3368	0,0323±0,0015	3,7124	0,4562	0,0334±0,0012
Pulso 6		0,3368	0,0356±0,002		0,4562	0,0359±0,0015
	3,8835	0,4041	0,0328±0,0016	3,6348	0,3475	0,0336±0,0014
Pulso 7		0,4041	0,0335±0,0021		0,3475	0,0354±0,0015
	3,9638	0,4718	0,0341±0,0017	3,5390	0,2387	0,0342±0,0013
Pulso 8		0,4718	0,0345±0,0024		0,2387	0,0358±0,0015
	4,0702	0,5958	0,0353±0,0031	3,4386	0,1300	0,0365±0,0013
Pulso 9		0,5958	0,0263±0,002		0,1300	0,038±0,0017
	4,1054	0,8419	0,0388±0,0057	3,2147	0,0212	0,0419±0,002
Pulso 10		0,8419	0,0191±0,0019		0,0212	0,0488±0,0024
	4,1660	1,0000	0,0422±0,0257	3,0571	0,0000	0,0728±0,0044

Tabla 13. Tabla resumen del estudio de la medida de la resistencia interna para el ensayo experimental realizado con una corriente de 1C, celda SAM2170-1

A estos resultados se ha llegado partiendo del estudio experimental realizado con pulsos de corriente de carga y descarga a una corriente de 1C. El ensayo experimental, como se ha expuesto anteriormente, trata de 4 ciclos de carga y descarga, por lo que esta tabla se ha obtenido

haciendo la media de todos los datos medidos para cada estado de carga, tanto en la carga como en la descarga de la celda de batería, y así como al final y al comienzo de cada pulso de corriente.

Se puede observar más detalladamente todos los pasos que se han seguido para llegar a este resultado final en la hoja de cálculo Excel.

Estos resultados expuestos pertenecen a una de las tres celdas de batería que se están estudiando a lo largo de este trabajo, para las otras dos celdas el procedimiento es el mismo, es por eso la razón por la cual no se exponen tan detalladamente todos los resultados obtenidos.

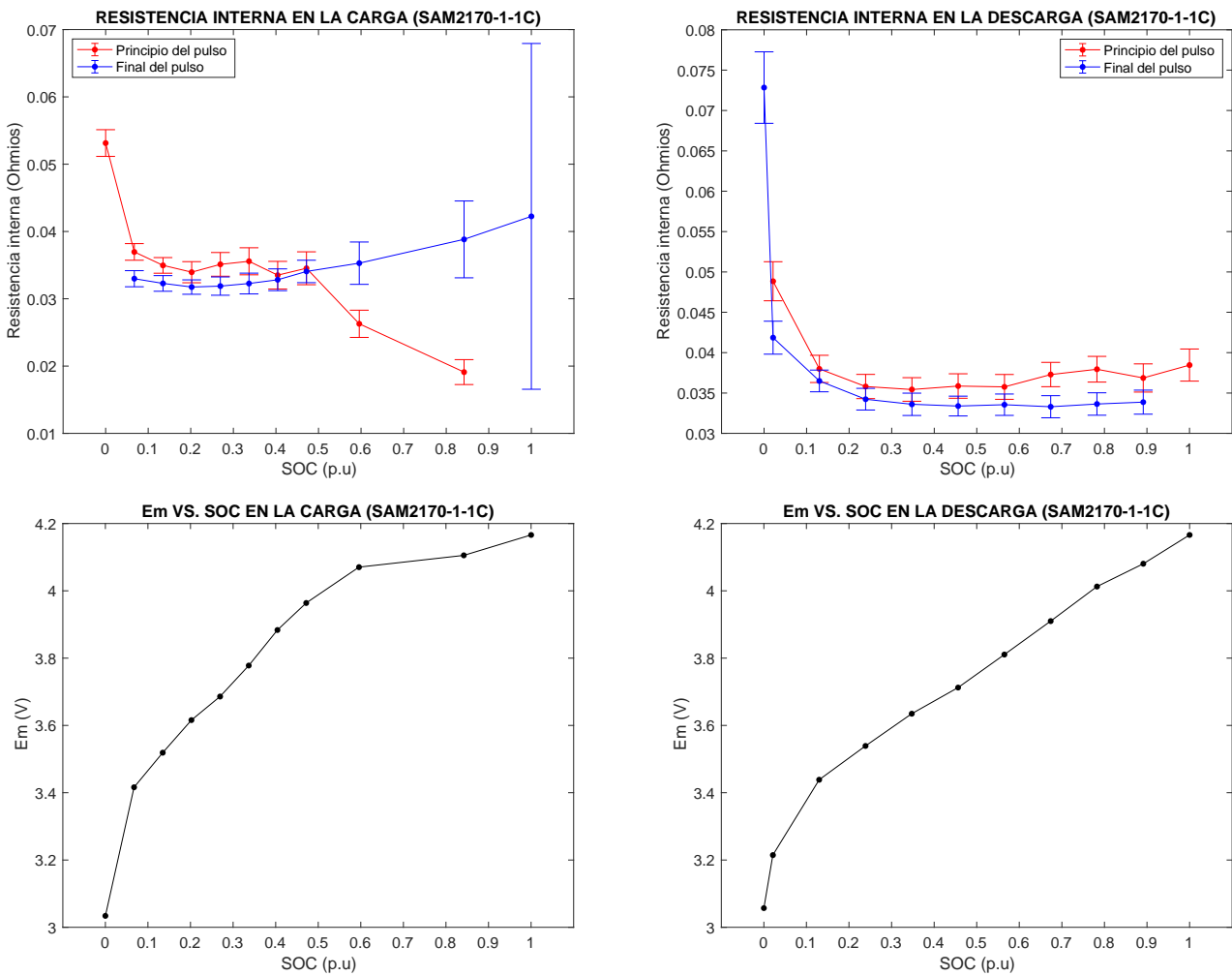


Figura 17. Representación tanto de la resistencia interna como de la tensión de circuito abierto de la celda de batería en función del estado de carga, tanto para la carga como para la descarga de la celda SAM2170-1, obtenido mediante el ensayo experimental a pulsos de corriente de 1C

Las cuatro gráficas mostradas representan los datos de la tabla anterior, Tabla 13. Lo ideal es leer la gráfica como si fueran dos columnas. En la primera columna nos encontramos con los datos que pertenecen a la carga de la celda, y en la segunda columna, sin embargo, se muestran los resultados de la descarga de la celda de batería.

Por otro lado, si hacemos una lectura de las gráficas por filas, en la primera de ellas nos encontramos los resultados de la resistencia interna tanto al final como al comienzo del pulso de corriente en función del estado de carga. En la segunda fila se encuentra representado la tensión en circuito abierto de la celda de batería en función del estado de carga.

Observando las gráficas es interesante lo que ocurre con la resistencia interna medida en los pulsos de carga, tanto al final como al comienzo del pulso. Cuando el estado de carga se aproxima al 60%, la celda de batería entra en una zona de carga a tensión constante, desde un punto de vista ideal, eso debería pasar con valores elevados del estado de carga, pero al tener una resistencia interna bastante alta puede ser que llegue a la máxima tensión a SOC's relativamente bajos. Por lo tanto, no es fiable la medición de la resistencia interna a corrientes altas a partir de un 60% de estado de carga durante la carga de la celda.

Además, no podemos afirmar que la medición de la resistencia interna pueda hacerse tanto al final como al comienzo de un pulso de corriente de carga, ya que hay valores de estados de carga para los cuales esa medición de impedancia de la celda al final y al comienzo de un pulso de corriente no tienen un valor común.

En el lado derecho de la Figura 17 nos encontramos con el caso de la resistencia interna medida en los pulsos de corriente de descarga de la celda. En este caso la celda no entra en una zona de descarga a tensión constante como ocurría en la carga, pero nos encontramos también con que no podemos afirmar que la medición de la resistencia interna se pueda hacer tanto al final como al comienzo de un pulso de corriente de descarga.

Está claro que, si necesariamente tenemos que medir la resistencia interna de una celda de batería con este tipo de ensayo, recordemos que estamos analizando el ensayo de pulsos de corriente tanto en carga como en descarga con una corriente de amplitud 1C, nos decantaríamos por hacer la medición de la resistencia interna en los pulsos de corriente de descarga, pero es muy posible que no tengamos precisión en dicha medición.

El ensayo experimental con una corriente de 1C no es válido para tener una buena precisión de la medición de la resistencia interna de una celda de batería

En resumen, podemos decir con ayuda de las gráficas anteriores, que este ensayo que estamos analizando no es válido para tener una buena precisión de la medición de la resistencia interna de una celda de batería ion litio, ya que dicha medición puede ser diferente si se hace en la carga, en la descarga o incluso si se toma al final o al comienzo de un pulso de corriente para un mismo estado de carga.

Para poder reafirmar lo anteriormente dicho, se les ha practicado este mismo estudio a otras dos celdas de batería exactamente iguales a la anterior, llamadas SAM2170-2 y SAM2170-3.

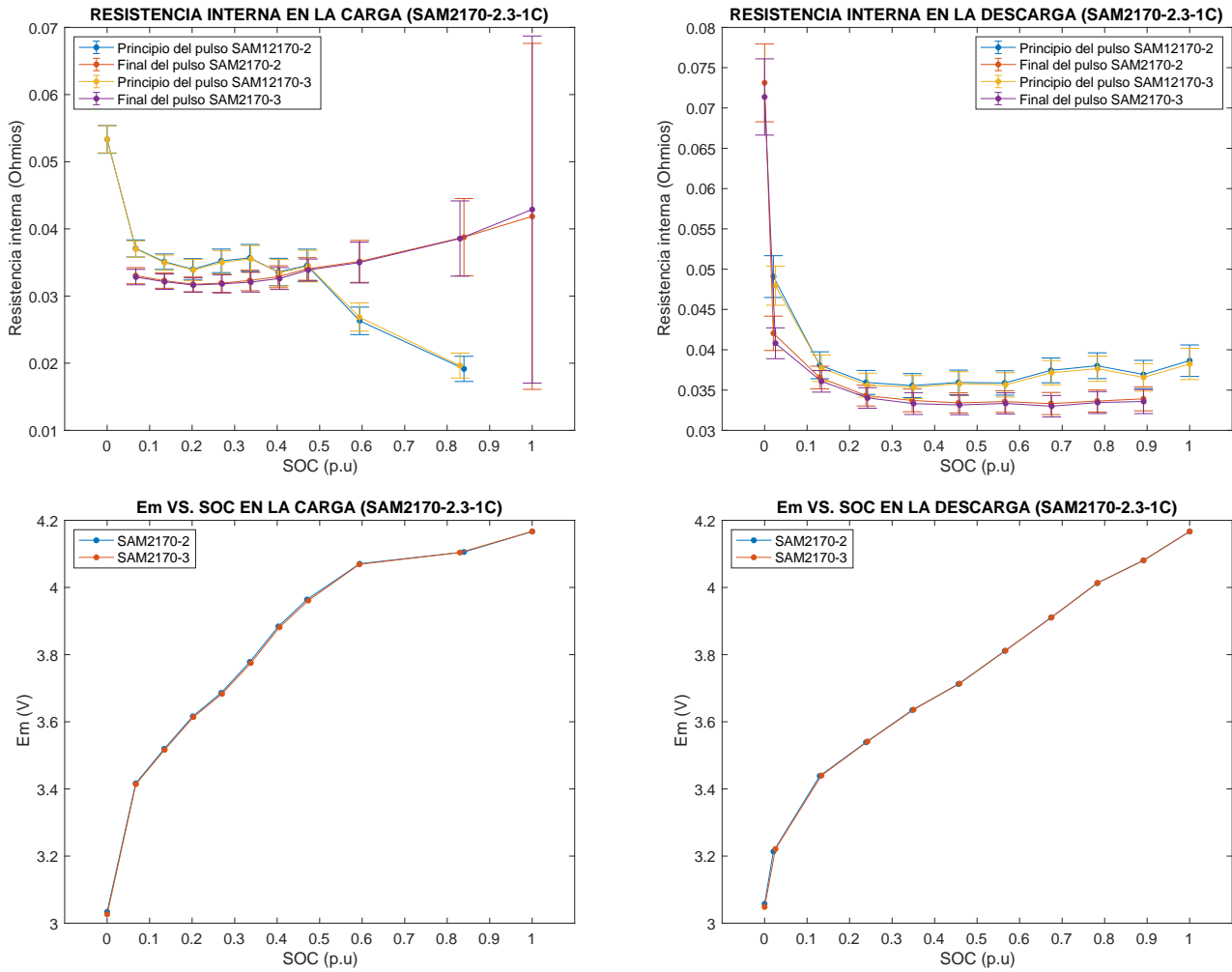


Figura 18. Representación tanto de la resistencia interna como de la tensión de circuito abierto de la celda de batería en función del estado de carga, tanto para la carga como para la descarga de las celdas SAM2170-2 y SAM2170-3, obtenido mediante el ensayo experimental a pulsos de corriente de 1C

Viendo estos resultados, junto con el resultado de la celda SAM2170-1 podemos hacer una clara justificación de que el ensayo de pulsos de corriente tanto para la carga como para la descarga de una celda de batería con una amplitud de corriente elevada, como es este caso a 1C, no se tiene una buena precisión para hacer la medición de la resistencia interna de la celda de batería.

3.4.2. Error de la resistencia interna para el ensayo experimental con una corriente de C/3

A continuación, se va a realizar el mismo estudio realizado para el ensayo experimental realizado a pulsos de corriente de carga y descarga con una amplitud de corriente de 1C, pero en esta ocasión con una amplitud de corriente de C/3.

	SAM2170_1_C/3					
	Carga			Descarga		
	Em (V)	SOC (p.u.)	Rint (Ohmios)	Em (V)	SOC (p.u.)	Rint (Ohmios)
Pulso 1	2,9221	0,0000	0,0778±0,0218	4,1594	1,0000	0,0395±0,0033
	3,3970	0,0951	0,0352±0,0031	4,0780	0,8940	0,0371±0,0032
Pulso 2	3,5006	0,0951	0,0399±0,0033	4,0104	0,8940	0,0372±0,0033
	3,6054	0,1902	0,0344±0,0032	3,9062	0,7881	0,0361±0,0032
Pulso 3	3,6719	0,1902	0,0371±0,0032	3,8078	0,7881	0,0379±0,0031
	3,7638	0,2854	0,0348±0,0032	3,7069	0,6820	0,0343±0,0031
Pulso 4	3,8688	0,2854	0,0362±0,0032	3,6288	0,6820	0,0375±0,0031
	3,9444	0,3806	0,036±0,0032	3,5293	0,5760	0,0343±0,0031
Pulso 5	4,0635	0,3806	0,038±0,0031	3,4327	0,5760	0,0354±0,0031
	4,0957	0,4758	0,035±0,0031	3,1912	0,4701	0,0344±0,0031
Pulso 6	4,1594	0,4758	0,0393±0,0031	3,1912	0,4701	0,0354±0,0031
		0,5710	0,0353±0,0031		0,4701	0,0342±0,0031
Pulso 7		0,5710	0,0379±0,0031		0,3641	0,0342±0,0031
		0,6662	0,0368±0,0031		0,3641	0,0353±0,0031
Pulso 8		0,6662	0,037±0,0031		0,2582	0,034±0,0031
		0,7615	0,0377±0,0031		0,2582	0,0358±0,0031
Pulso 9		0,7615	0,0371±0,0032		0,1523	0,0368±0,0031
		0,8698	0,0393±0,0045		0,1523	0,038±0,0031
Pulso 10		0,8698	0,0373±0,0033		0,0462	0,0436±0,0031
		1,0000	0,0439±0,0256		0,0462	0,0495±0,0034
	4,1594	1,0000	0,0439±0,0256	2,9241	0,0000	0,1043±0,0084

Tabla 14. Tabla resumen del estudio de la medida de la resistencia interna para el ensayo experimental realizado con una corriente de C/3, celda SAM2170-1

Con este otro ensayo de ciclos de carga/descarga a pulsos de corriente se quiere ver si la medición de la resistencia interna depende del momento en el que se mide, es decir, se puede medir la resistencia interna de una celda de batería para un mismo estado de carga al final del pulso de corriente o al comienzo del siguiente pulso de corriente.

Para hacer más fácil dicha justificación se hace uso de gráficas con barras de errores. Las barras de errores son muy útiles a la hora de querer mostrar el error de una medición, y en este caso más aún, ya que queremos ver si la medición de la resistencia interna solo depende del estado de carga. Por lo tanto, si para un mismo estado de carga las dos mediciones de resistencia interna que tenemos tomadas entran dentro del límite de error que marcan las barras

de errores, podremos decir que la medición de la resistencia interna no depende del momento en el que la medimos, al final o al comienzo del pulso de corriente.

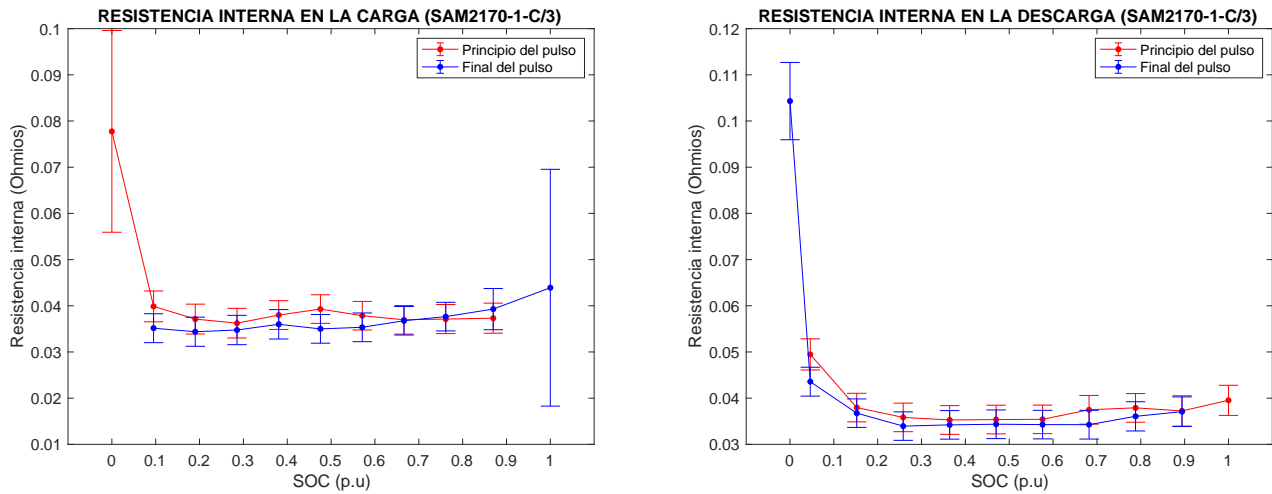


Figura 19. Representación de la resistencia interna frente al estado de carga, tanto para la carga como para la descarga de la celda SAM2170-1, obtenido mediante el ensayo experimental a pulsos de corriente de C/3

Con estas dos gráficas expuestas, podemos llegar a una conclusión muy interesante. La medición de la resistencia interna mediante un ensayo experimental de ciclos de carga/descarga a pulsos de corriente se puede hacer tanto al final del pulso de corriente como al comienzo del pulso de corriente, solo depende del estado de carga.

Por lo tanto, como se tiene la justificación de que la resistencia interna es posible medirla al comienzo y al final del pulso de corriente y dado que se tienen ambas mediciones, lo que se va a hacer a continuación es el cálculo de la resistencia interna únicamente dependiendo del estado de carga, lo que se consigue con este nuevo cálculo es aumentar el número de muestras tomadas y por lo tanto el error aleatorio disminuirá, aunque sabemos que el error sistemático no lo podemos disminuir.

SAM2170_1_C/3						
Carga			Descarga			
	Em (V)	SOC (p.u.)	Rint (Ohmios)	Em (V)	SOC (p.u.)	Rint (Ohmios)
Pulso 1	2,9221	0,0000	0,0778±0,0218	4,1594	1,0000	0,0395±0,0033
Pulso 2	3,3970	0,0951	0,0375±0,0036	4,0780	0,8940	0,0372±0,0032
	3,5006	0,1902	0,0357±0,0033	4,0104	0,7881	0,037±0,0032
Pulso 3	3,6054	0,2854	0,0355±0,0032	3,9062	0,6820	0,0359±0,0033
	3,6719	0,3806	0,037±0,0032	3,8078	0,5760	0,0348±0,0031
Pulso 4	3,7638	0,4758	0,0371±0,0035	3,7069	0,4701	0,0349±0,0031
	3,8688	0,5710	0,0366±0,0032	3,6288	0,3641	0,0347±0,0031
Pulso 5	3,9444	0,6662	0,0369±0,0031	3,5293	0,2582	0,0349±0,0032
	4,0635	0,7615	0,0374±0,0031	3,4327	0,1523	0,0374±0,0031
Pulso 6	4,0957	0,8698	0,0383±0,0045	3,1912	0,0462	0,0465±0,0039
	4,1594	1,0000	0,0439±0,0256	2,9241	0,0000	0,1043±0,0084

Tabla 15. Tabla resumen del estudio de la medida de la resistencia interna para el ensayo experimental realizado con una corriente de C/3, celda SAM2170-1, esta vez sin diferenciar entre la medición tomada al comienzo o al final del pulso de corriente, solo depende del estado de carga.

Si se grafican los datos de la tabla anterior al igual que se ha hecho en casos anteriores, con las barras de errores, podremos llegar a otra conclusión muy interesante que se ve a simple vista.

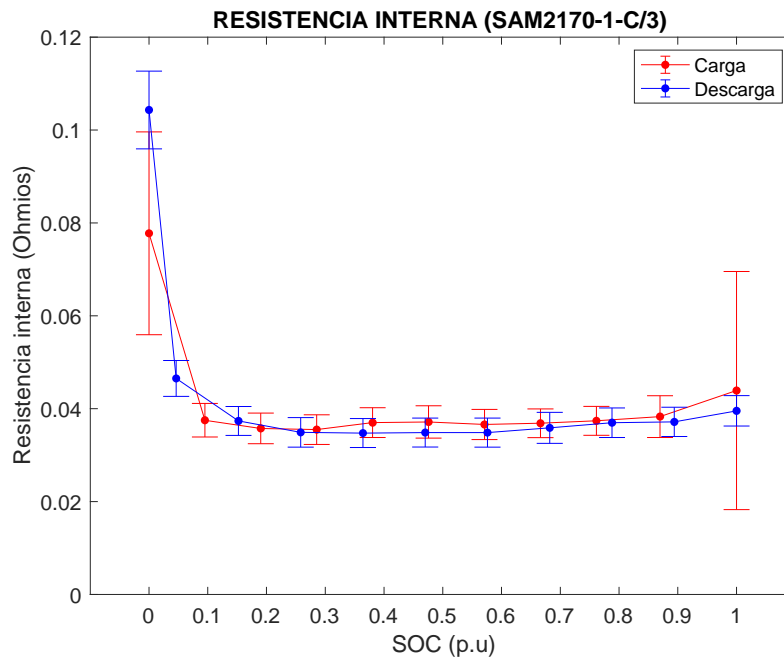


Figura 20. Representación de la resistencia interna frente al estado de carga, en carga y descarga, para la celda SAM2170-1, obtenido mediante el ensayo experimental a pulsos de corriente de C/3

Al igual que en figuras anteriores donde se muestran dos funciones de resistencia interna frente al estado de carga en situaciones diferentes con su correspondiente barra de error, si para las dos situaciones y para un mismo estado de carga las mediciones de las resistencias internas entran dentro de las barras de error podemos decir que es indiferente la situación en que se toma dicha medición. Es decir, en este caso, como todas las mediciones tomadas para un mismo estado de carga se encuentran dentro del error que nos podemos permitir, se puede decir que la medición de la resistencia interna es válida tanto en los pulsos de corriente de carga como en descarga.

Se acaba de decir que todas las mediciones tomadas para un mismo estado de carga se encuentran dentro del error que nos podemos permitir, esto a simple vista se puede decir que no es cierto para estados de carga pequeños (comprendidos entre 0 y 0.1, en p.u.).

Todos los gráficos que se han mostrado hasta ahora de conclusiones del estudio de la resistencia interna para el ensayo experimental con una corriente de C/3 corresponden a la primera calda de batería seleccionada SAM2170-1, pero durante todo este trabajo de fin de estudios se está estudiando simultáneamente con tres celdas de batería SAM21700, de manera que si tenemos algún dato inusual se pueda comprobar qué ocurre con las otras dos celdas de batería que han sido estudiadas. Pues bien, los resultados que se han obtenido para las tres celdas de batería hasta este punto son similares, es decir, la medición de la resistencia interna mediante el ensayo experimental de ciclos de carga/descarga a pulsos de corriente se puede hacer tanto al final del pulso de corriente como al comienzo del pulso de corriente, solo depende del estado de carga. Por lo tanto, al igual que con la celda SAM2170-1, se ha hecho el estudio de la resistencia únicamente dependiendo del estado de carga, tanto para los pulsos de corriente de carga como para los pulsos de corriente de descarga.

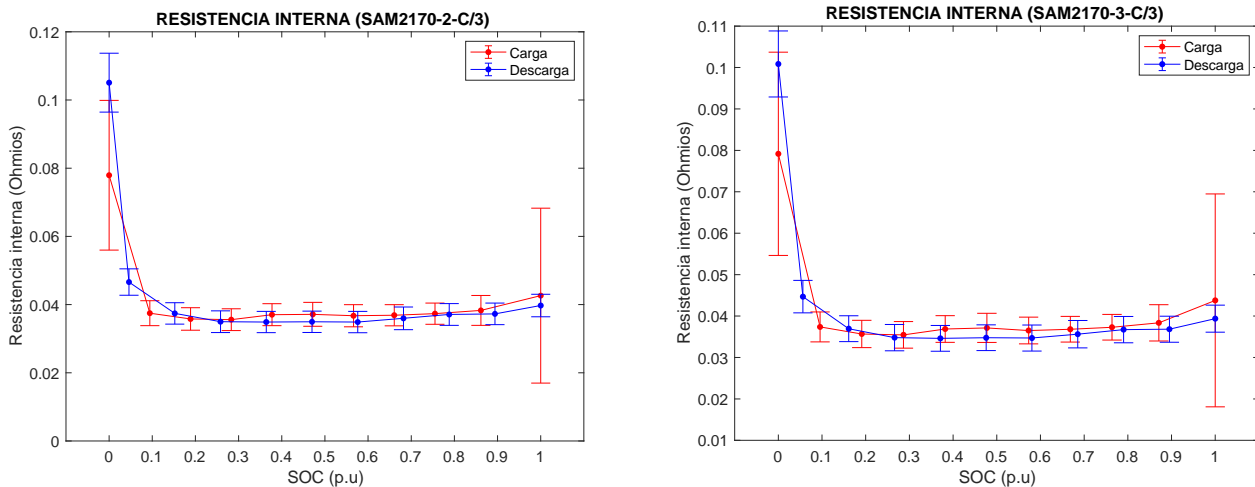


Figura 21. Representación de la resistencia interna frente al estado de carga, en carga y descarga, para las celdas SAM2170-2 y SAM2170-3, obtenido mediante el ensayo experimental a pulsos de corriente de C/3

Estas dos gráficas, al igual que la anterior, muestran la función de resistencia interna frente al estado de carga tanto para la carga como para la descarga de la celda de batería. Las mediciones de las que disponemos no son en la carga y en la descarga exactamente para un mismo estado de carga, pero se puede decir que son estados de carga próximos. Además, la función de resistencia interna frente al estado de carga para valores de SOC comprendidos entre 0.1 y 0.9 se puede decir que es constante, por lo tanto, es coherente decir que para dichos estados de carga es viable hacer la medición de la resistencia interna tanto en la carga como en la descarga de la celda de batería.

Como se comentaba anteriormente, hay un rango de estados de carga comprendido entre 0 y 0.1 que la función que sigue la resistencia interna no es lineal y puede llegar a aproximarse a una función exponencial. Si en ese rango de estado de carga las mediciones que tenemos para la resistencia interna tanto en la carga como en la descarga se encuentran en un intervalo de SOC muy elevado, las barras de errores nos indican que no es posible hacer la medición tanto en la carga como en la descarga, pero lo asociamos a la diferencia de estado de carga en las que están tomadas las dos mediciones.

Si las dos mediciones, tanto en carga como en descarga, se encontrarían con un estado de carga próximo, como es el caso de la celda de batería SAM2170-3, podemos decir que las mediciones que tenemos para un estado de carga próximo a 0.1 se puede hacer tanto en carga como en descarga.

Por lo tanto, vamos a considerar que todas las mediciones tomadas para un mismo estado de carga se encuentran dentro del error aceptable y podemos decir que la medición de la resistencia interna es posible hacerla tanto en la carga como en la descarga de una celda ensayada con pulsos de corriente.

Sin embargo, si nos fijamos más detalladamente en los gráficos, es visible que el error que se puede cometer a la hora de medir la resistencia interna en pulsos de descarga es algo inferior que si se hace la medición en pulsos de corriente de carga.

En resumen, la conclusión que obtenemos del estudio del error asociado a la medida de la resistencia interna con un ensayo experimental con una corriente de $C/3$ es que es posible hacer la medición de la resistencia interna con pulsos de corriente de carga y de descarga únicamente dependiendo del estado de carga, es decir, se puede tomar dicha medición tanto al final de un pulso de corriente como al comienzo del siguiente pulso de corriente. Además, podemos decir, y así lo hemos justificado, que la medición de la resistencia interna de la celda de batería si se realiza en los pulsos de corriente de descarga se obtiene una mayor precisión.

Es preferible realizar la medida de la impedancia interna empleando pulsos de descarga ya que el error es menor que el obtenido en carga, especialmente cuando el estado de carga es muy alto o muy bajo, realizado a una corriente de $C/3$

3.4.3. Error de la resistencia interna para el ensayo experimental con una corriente de C/5

Por último, se presenta una tabla resumen con los datos de la celda de batería SAM2170-1, del ensayo realizado a pulsos de corriente de carga y descarga con una amplitud de corriente de C/5.

	SAM2170_1_C/5					
	CARGA			DESCARGA		
	Em (V)	SOC (p.u.)	Rint (Ohmios)	Em (V)	SOC (p.u.)	Rint (Ohmios)
Pulso 1	2,8803	0,0000	0,0923±0,0318	4,1661	1,0000	0,0394±0,0052
	3,3883	0,1017	0,0371±0,0053	4,0799	0,8941	0,0369±0,0052
Pulso 2	3,4951	0,1017	0,0418±0,0053	4,0104	0,8941	0,0368±0,0052
	3,6011	0,2034	0,0359±0,0053	3,9094	0,7881	0,0375±0,0052
Pulso 3	3,6674	0,2034	0,0377±0,0053	3,8052	0,6822	0,0384±0,0052
	3,7551	0,3050	0,0362±0,0053	3,7081	0,5763	0,0356±0,0052
Pulso 4	3,8052	0,3050	0,0367±0,0053	3,6308	0,4704	0,0351±0,0052
	3,8655	0,4067	0,0377±0,0053	3,5294	0,3644	0,0365±0,0052
Pulso 5	3,7551	0,4067	0,0364±0,0052	3,4320	0,2584	0,0352±0,0052
	3,8655	0,5084	0,0388±0,0053	3,3294	0,1524	0,0365±0,0053
Pulso 6	3,9423	0,6100	0,0347±0,0052	3,2294	0,0464	0,0356±0,0053
	4,0560	0,6100	0,0375±0,0053	3,1294	0,0464	0,0369±0,0053
Pulso 7	4,0943	0,7115	0,0353±0,0052	3,0294	0,1524	0,0355±0,0053
	4,1661	0,7115	0,0357±0,0053	2,9294	0,1524	0,0378±0,0053
Pulso 8	4,0560	0,8131	0,0361±0,0052	2,8294	0,0464	0,0383±0,0053
	4,0943	0,8131	0,0359±0,0053	2,7294	0,0464	0,0392±0,0054
Pulso 9	4,0943	0,9146	0,0377±0,0053	2,6294	0,0464	0,0467±0,0057
	4,1661	0,9146	0,0359±0,0053	2,5294	0,0464	0,0513±0,0057
Pulso 10	4,1661	1,0000	0,0412±0,0256	2,8811	0,0000	0,1223±0,0138

Tabla 16. Tabla resumen del estudio de la medida de la resistencia interna para el ensayo experimental realizado con una corriente de C/5, celda SAM2170-1

En la Tabla 16 aparecen dos valores de resistencia para un mismo estado de carga, los cuales han sido tomados, uno al final del pulso de corriente y otro al principio del pulso de corriente. Lo que se quiere comprobar en este caso es la importancia de medir la resistencia interna para un mismo estado de carga al principio del pulso de corriente o al final del pulso de corriente, o por el contrario resulta irrelevante esa decisión, y es posible tomar la medida de la resistencia interna solo teniendo en cuenta el estado de carga, independientemente de que estemos al comienzo o al final de un pulso de corriente.

Para llegar a una conclusión, se van a representar dos gráficas a continuación, cada una de ellas representa la resistencia interna frente al estado de carga, la diferencia entre ambas es que una de ellas (gráfica de la derecha) representa la resistencia interna medida en los pulsos

de corriente de carga de la celda y la que se encuentra a la izquierda, se refiere a la resistencia interna medida en los pulsos de corriente de descarga de la celda de batería.

Se va a hacer uso de barras de errores, de modo y manera que sea más visual el error que no podemos sobrepasar para llegar a una conclusión.

Se muestran los resultados para la primera celda de batería, la cual se ha llamado como SAM2170-1.

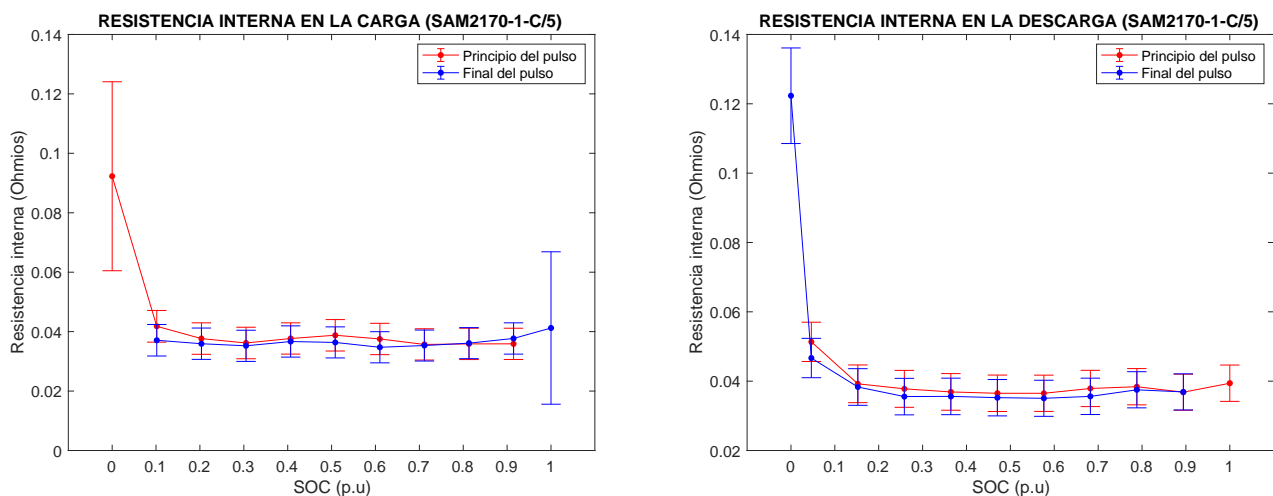


Figura 22. Representación de la resistencia interna frente al estado de carga, tanto para la carga como para la descarga de la celda SAM2170-1, obtenido mediante el ensayo experimental a pulsos de corriente de C/5

Con estas dos gráficas sobre la mesa, podemos llegar a una conclusión muy interesante, la medida de la resistencia interna es factible tomarla tanto al final como al comienzo de un pulso de carga/descarga, solo depende del estado de carga.

Además, lo que resulta muy llamativo de estas dos gráficas son las barras de errores. Con un estado de carga igual a cero, el error que tenemos si medimos la resistencia interna en los pulsos de carga es mucho mayor que, si lo hacemos en el momento de comenzar los pulsos de descarga. De igual manera sucede cuando queremos medir la resistencia con un estado de carga igual a 1, el error que cometemos en la medición de la resistencia interna una vez terminados los pulsos de descarga es mucho menor que si lo hiciéramos en el momento de terminar la carga, más adelante trataremos de aclarar a que se debe esta diferencia.

Por lo tanto, como hemos llegado a la conclusión de que la resistencia interna de una celda de batería se puede medir tanto al comienzo como al final de un pulso de corriente (siempre y cuando estemos con un mismo estado de carga), lo que se va hacer a continuación es aumentar las muestras tomadas para el estudio de la resistencia interna, de tal forma vamos aumentar por dos las mediciones de la resistencia interna, lo que implicara una disminución del error aleatorio que estaremos cometiendo y además dividiremos por dos los puntos de interés de resistencia interna.

	SAM2170_1_C/5					
	Carga			Descarga		
	Em (V)	SOC (p.u.)	Rint (Ohmios)	Em (V)	SOC (p.u.)	Rint (Ohmios)
Pulso 1	2,8803	0,0000	0,0923±0,0318	4,1661	1,0000	0,0394±0,0052
Pulso 2	3,3883	0,1017	0,0394±0,0055	4,0799	0,8941	0,0369±0,0052
Pulso 3	3,4951	0,2034	0,0368±0,0053	4,0104	0,7881	0,038±0,0052
Pulso 4	3,6011	0,3050	0,0357±0,0052	3,9094	0,6822	0,0368±0,0053
Pulso 5	3,6674	0,4067	0,0372±0,0052	3,8052	0,5763	0,0358±0,0052
Pulso 6	3,7551	0,5084	0,0376±0,0053	3,7081	0,4704	0,0359±0,0052
Pulso 7	3,8655	0,6100	0,0361±0,0053	3,6308	0,3644	0,0363±0,0053
Pulso 8	3,9423	0,7115	0,0355±0,0052	3,5294	0,2584	0,0367±0,0053
Pulso 9	4,0560	0,8131	0,036±0,0052	3,4320	0,1524	0,0388±0,0053
Pulso 10	4,0943	0,9146	0,0368±0,0053	3,1829	0,0464	0,049±0,0057
	4,1661	1,0000	0,0412±0,0256	2,8811	0,000	0,1223±0,0138

Tabla 17. Tabla resumen del estudio de la medida de la resistencia interna para el ensayo experimental realizado con una corriente de C/5, celda SAM2170-1, esta vez sin diferenciar entre la medición tomada al comienzo o al final del pulso de corriente, solo depende del estado de carga.

Como bien se ha estado comentado, la Tabla 17, expuesta encima de estas líneas, recoge los resultados de la resistencia interna con su correspondiente error tanto para la carga como para la descarga de la celda. En comparación con la tabla anterior, ahora está claro que la resistencia interna solo depende del estado de carga, y no se hace ninguna diferenciación entre si la resistencia interna medida al final o al comienzo de un pulso de corriente.

A continuación, se va a añadir un gráfico donde se representa la resistencia interna medida en la carga y en la descarga de la celda de batería, en este caso también esta gráfica pertenece a la primera celda de batería seleccionada, llamada SAM2170-1.

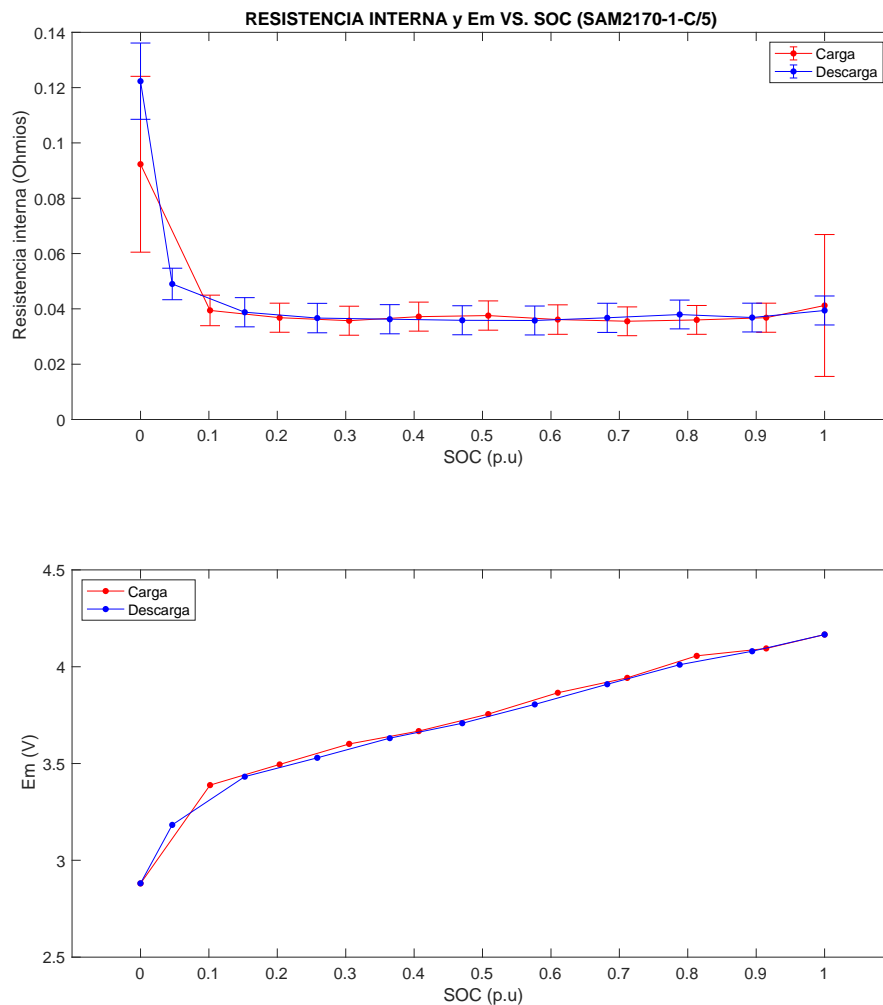


Figura 23. Representación tanto de la resistencia interna como de la tensión de circuito abierto de la celda de batería en función del estado de carga, en carga y descarga, para la celda SAM2170-1, obtenido mediante el ensayo experimental a pulsos de corriente de 1C

Como se observa en esta gráfica, está representada la resistencia interna a lo largo de todo el estado de carga para dos casos diferentes, en rojo podemos ver la resistencia interna medida en los pulsos de corriente de carga de la celda de batería, y de color azul vemos las mediciones de la resistencia interna medidas en los pulsos de corriente de descarga de la celda de batería. En ambos casos se representa el error que podemos estar cometiendo para cada medición de la resistencia interna.

Con esta gráfica se llega a la conclusión de que la resistencia interna se puede medir tanto en la carga como en la descarga con pulsos de corriente, pero hay algo que es muy significativo en la Figura 23 que son las barras de errores.

Como se ha comentado anteriormente, el error que se tiene en la medición de la resistencia interna una vez terminados los pulsos de corriente de descarga no es el mismo que

se tiene cuando se comienza los pulsos de corriente de carga, aunque en los dos casos estemos con un estado de carga nulo, es decir, con la batería totalmente descargada.

Esta diferencia de errores entre el estado de carga nulo y el estado de carga completo con el resto de los errores en diferentes estados de carga se ha ido observando a lo largo de todos los ensayos experimentales estudiados desde el ensayo experimental a una corriente de 1C, ensayo experimental con una corriente de C/3 y ahora con una corriente de C/5.

La diferencia de errores que se tiene a SOC's elevados con respecto a los diferentes estados de carga se asocia a que en SOC's elevados la celda de batería entra en una zona de carga constante, y eso es lo que hace que el error que se tiene al medir la resistencia interna cuando el SOC alcanza su máximo sea elevado, esto se puede observar en la Figura 23.

Como se ha ido observando a lo largo del desarrollo del método de parametrización basado en un modelo simplificado, cuanto mayor es la amplitud de los pulsos de corriente, la celda de batería entra antes en la zona de tensión constante, es decir, con menos estado de carga, por el contrario, cuando la amplitud los pulsos de corriente es menor, la batería entra en la zona de tensión constante cuando se encuentra con un estado de carga elevado, próximo a 1.

Por otro lado, la diferencia de errores que se observan en la medida de la resistencia interna cuando nos encontramos con un estado de carga nulo respecto a los errores que se dan cuando el estado de carga es intermedio se debe también a la tensión de circuito abierto. En la Figura 23 se ha representado dos gráficas, la primera de ellas representa la resistencia interna frente al estado de carga, y en la segunda la tensión de circuito abierto frente al estado de carga. Se puede observar que, para estados de carga pequeños, próximos a 0, la pendiente que tiene la tensión en circuito abierto es muy pronunciada (muy horizontal), tanto para la carga como para la descarga, esto significa que, con variaciones muy pequeñas de estado de carga, la tensión en circuito abierto se hace muy grande, lo que provoca un aumento de la resistencia interna y un aumento del error de dicha resistencia interna, por lo que perdemos precisión.

El cambio de pendiente que sufre la tensión de circuito abierto provoca un aumento del error a la hora de medir la resistencia interna de una celda de batería

Volviendo al ensayo que estamos estudiando en este apartado, ensayo experimental realizado a pulsos de carga y descarga von una amplitud de C/5, es verdad que se puede hacer la medición de la resistencia interna tanto en la carga como en la descarga, pero está claro que si se realiza dicha medición en los pulso de corriente de descarga el error que vamos a tener va a ser mucho menor, por lo tanto, siempre que se pueda, se tomara la medición de la resistencia interna en la descarga de la celda de batería.

Al igual que se ha realizado el estudio de la resistencia interna para la primera celda de batería seleccionada, a la cual se le ha llamado SAM2170-1, se ha realizado el mismo estudio a otras dos celdas de batería exactamente iguales, las cuales se han llamado SAM2170-2 y SAM2170-3. Los resultados que se han obtenido son prácticamente iguales como era de esperar.

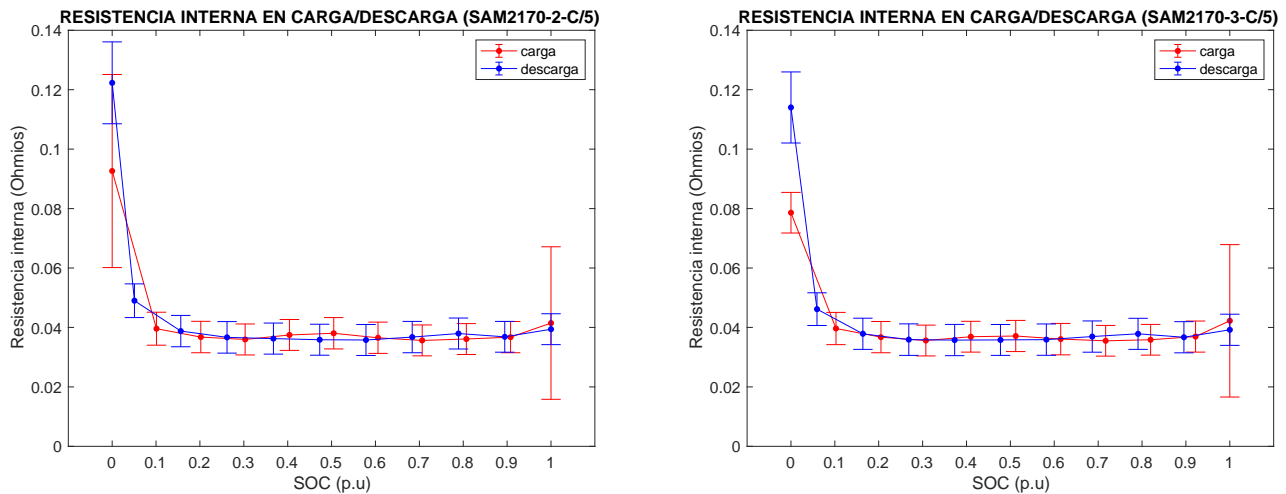


Figura 24. Representación de la resistencia interna frente al estado de carga, en carga y descarga, para las celdas SAM2170-2 y SAM2170-3, obtenido mediante el ensayo experimental a pulsos de corriente de C/5

En las dos gráficas anteriores se muestran los resultados obtenidos para las dos celdas de batería SAM2170-1 y SAM2170-2. Como era de esperar los resultados son prácticamente iguales a los de la celda SAM2170-1, ya que las tres celdas pertenecen a un mismo modelo de baterías.

En la celda SAM2170-3 a un estado de carga nulo se aprecia una diferencia muy importante con las barras de errores. Esto puede deberse simplemente a un error estadístico, si tuviéramos el mismo estudio con más celdas de baterías podríamos asegurarnos de que se debe a eso, y en ese caso habría que descartar dicha medida.

En resumen, podemos decir que la medición de la resistencia interna de una celda de batería con un ensayo experimental de pulsos de corriente de carga y descarga a C/5 lo ideal sería hacer en los pulsos de corriente de descarga, ya que el error que tendríamos sería muy inferior a hacer las mediciones en pulsos de corriente de carga. Pero de ambas maneras es factible hacer la medición de la resistencia interna.

Si la medición de la resistencia interna se hace en la descarga vamos a tener una mayor precisión en la medida, pero también es posible realizar dicha medida en la carga, todo ello con un ensayo experimental realizado a una corriente de C/5

3.5. Resumen

Una vez desarrollado el método de parametrización basado en un modelo simplificado de la celda de batería y observando las diferentes conclusiones extraídas de los diferentes estudios realizados con los tres ensayos experimentales, vamos a comprobar finalmente cuál de todos los modelos planteados es el más preciso para medir la impedancia de una celda de batería de iones de litio.

Del ensayo experimental realizado a pulsos de carga y descarga con una amplitud de corriente de 1C hemos llegado a la conclusión que no es fiable hacer la medición de la impedancia interna.

Con el ensayo experimental realizado a una corriente de C/3 hemos comprobado que el método más preciso para calcular la impedancia interna de la celda de batería, que al fin y al cabo es una resistencia interna, es hacerlo en los pulsos de descarga de la celda de batería.

Con el último ensayo estudiado a una corriente de C/5 hemos llegado a la misma conclusión que obteníamos con el ensayo experimental a C/3, la medición de la impedancia de la celda de batería, correspondiente al circuito equivalente que modela nuestra celda de batería es más precisa si se mide en los pulsos de corriente de descarga.

Por lo tanto, tenemos dos situaciones posibles para hacer la medición de la resistencia interna de nuestra celda de batería con cierta precisión, tanto el ensayo experimental con una corriente a pulsos de C/3 como con una corriente a pulsos de C/5. A continuación vamos a ver con cuál de los dos ensayos obtenemos una mayor precisión a la hora de medir la impedancia de la celda de batería.

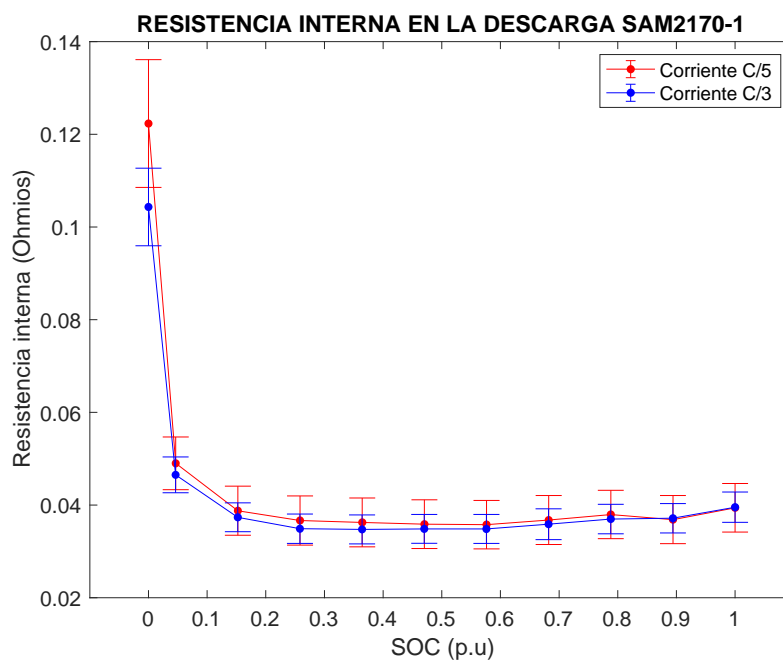


Figura 25. Representación de la resistencia interna frente al estado de carga, en la descarga de la celda SAM2170-1, obtenido del ensayo experimental a pulsos de corriente de C/3 y C/5

En esta gráfica se muestran los resultados obtenidos de los ensayos experimentales realizados con una amplitud de corriente de $C/3$ y $C/5$, los resultados corresponden a la descarga de la batería a pulsos de corriente, ya que como se ha justificado anteriormente son las dos situaciones con la que se obtiene una mayor precisión a la hora de calcular la impedancia de una celda de batería de iones de litio.

De estos dos modelos mejor valorados hasta la fecha, se observa en el Figura 25 que con el ensayo experimental realizado a pulsos de corriente de descarga con una amplitud de $C/3$ de obtiene un error menor que si el ensayo experimental se realizaría con una amplitud de corriente de $C/5$.

Como se ha estado realizando a lo largo de todo el trabajo de fin de estudios se va a comprobar también que con las otras dos celdas de batería que estamos trabajando se cumplen las características que estamos obteniendo.

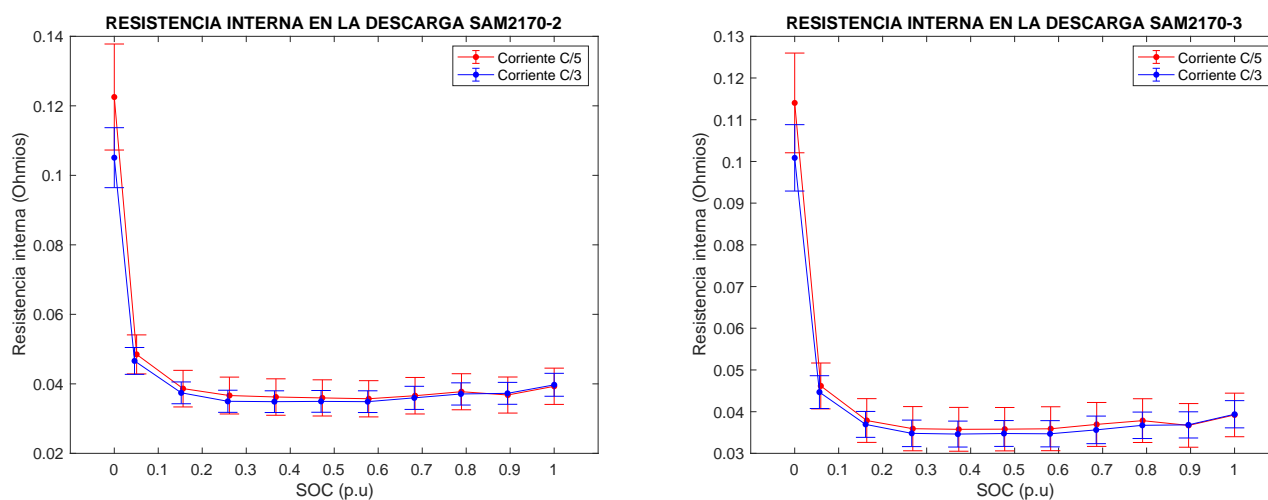


Figura 26. Representación de la resistencia interna frente al estado de carga, en la descarga de las celdas SAM2170-2 y SAM2170-3, obtenido del ensayo experimental a pulsos de corriente de $C/3$ y $C/5$

Con estas dos últimas gráficas correspondientes a otras dos celdas de batería SAM21700, podemos añadir una justificación más a nuestra conclusión de que con el ensayo experimental realizado a pulsos de corriente de amplitud $C/3$ obtenemos una mayor precisión a la hora de calcular la impedancia de la celda de batería

Con el ensayo experimental realizado a pulsos de corriente de amplitud $C/3$ obtenemos una mayor precisión a la hora de calcular la impedancia de la celda de batería

En resumen, de todo el desarrollo del método de parametrización basado en un modelo simplificado de la celda de batería nos quedamos con el modelo obtenido del ensayo experimental de ciclos de carga/descarga con pulsos de corriente de descarga con una amplitud de $C/3$.

SAM2170-1		
Ensayo C/3 Descarga		
SOC (p.u.)	Rint (Ohmios)	Em(V)
1,000	0,0395±0,0033	4,159
0,894	0,0372±0,0032	4,078
0,788	0,037±0,0032	4,010
0,682	0,0359±0,0033	3,906
0,576	0,0348±0,0031	3,808
0,470	0,0349±0,0031	3,707
0,364	0,0347±0,0031	3,629
0,258	0,0349±0,0032	3,529
0,152	0,0374±0,0031	3,433
0,046	0,0465±0,0039	3,191
0,000	0,1043±0,0084	2,924

Tabla 18. Resultado más favorable del modelo de parametrización basado un modelo simplificado de la celda de batería. Medición de la resistencia interna en la descarga con pulsos de corriente de amplitud C/3

Una de las ventajas que nos encontramos con el modelo seleccionado que hemos justificado que es el más preciso para el cálculo de la impedancia interna de la celda viene desde el propio ensayo realizado a la celda de batería.

El tiempo que nos va a costar realizar un ensayo experimental a C/3 va a ser menor que el tiempo que tardaría la batería en ser ensayada con el mismo ensayo, pero con una amplitud de corriente de C/5. Esto lo podemos ver en la Sección 3.2, donde se exponen los ensayos experimentales realizados. Los tres ensayos experimentales que se han realizado son iguales lo único que cambia, como sea dicho en apartados anteriores, es la amplitud de la corriente. El ensayo total realizado a una amplitud de corriente de C/3 ha durado 110 horas y, sin embargo, el mismo ensayo realizado a una amplitud de corriente de C/5 ha durado 130 horas.

Además de ganar precisión para el cálculo de la impedancia interna de la celda de batería con una corriente de C/3 estamos disminuyendo el tiempo que necesitamos para hacer dicho ensayo experimental

Capítulo 4: Estimación de parámetros mediante Battery Modeling

4.1. Introducción

El objetivo de este apartado es crear un modelo matemático que se comporte físicamente como la batería basada en un circuito eléctrico equivalente. Para ello se va a hacer uso de la herramienta “Battery Modeling” desarrollada por MathWorks. Esta herramienta está diseñada para el modelado de baterías de ion litio en Simulink-Matlab. El Objetivo de “Battery Modeling” es facilitar el diseño, control y desarrollo de sistemas de alimentación mediante baterías. En concreto “Battery Modeling” incluye, entre otras muchas cosas, la caracterización de baterías, estimación de estado de carga y estado de salud, para ello utiliza algoritmos de optimización. Además, también ofrece la posibilidad de simulación en tiempo real para el diseño de gestión de baterías.

De todas las posibilidades que ofrece “Battery Modeling”, la que nos va a interesar en este apartado es la estimación de parámetros de la celda de batería, para ello haremos uso de una herramienta dentro de “Battery Modeling” llamada ‘SyntheticData’ herramienta específicamente diseñada para la estimación de parámetros de un circuito equivalente que representa a la celda de batería.

El circuito equivalente que nos plantean consta del mismo circuito equivalente con el que se ha estado trabajando hasta ahora, un circuito Thevenin con varias ramas RC.

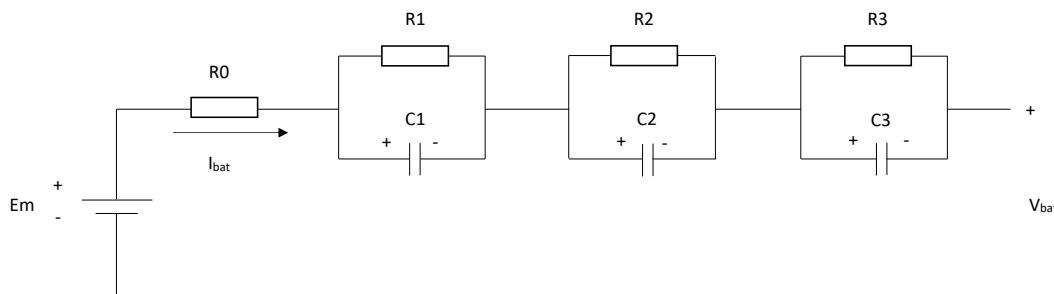


Figura 27. Circuito equivalente que representa la celda de batería utilizado en la herramienta “Battery Modeling”

Para simplificar los cálculos, se puede decidir la cantidad de ramas RC que vamos a querer que contenga nuestro circuito equivalente, normalmente se decidirá entre una rama o tres ramas, siendo mayor la precisión a la hora de estimar los parámetros de los elementos de dicho circuito cuantas más ramas RC tengamos en cuenta en nuestro circuito eléctrico. Esto implica también que, si queremos una mayor rapidez en la estimación, tendremos que coger menos ramas RC.

En lo que respecta a la parametrización, es de crucial importancia capturar los fenómenos electroquímicos y disipados observados al probar una batería real, así como sus dependencias de los estados y condiciones ambientales. Estos requisitos exigen el uso de matrices en lugar de parámetros escalares que funcionan como tablas de búsqueda que constituyen las huellas físicas de la química de iones de litio de interés.

Se van a obtener mediciones experimentales de cómo reacciona la batería a cierto estímulo, en este caso a una serie de pulsos de descarga. La estimación de parámetros va a consistir en excitar el modelo de la batería con la misma señal y de la misma manera con que se estimule el experimento, y comparar los resultados e iterar sobre esta comparación cambiando los valores de los parámetros hasta obtener convergencia [10].

4.2. Ensayos experimentales

Los tres ensayos experimentales con los cuales se va a trabajar en este nuevo apartado para la estimación de parámetros de una celda de batería ion litio van a ser exactamente los mismos ensayos que han sido utilizados para el desarrollo del método simplificado. Recordemos que se trata de tres ensayos experimentales de cuatro ciclos de carga/descarga con pulsos de corriente, la diferencia entre los tres ensayos está en la amplitud de los pulsos de corriente con los cuales se hace el ensayo experimental :1C, C/3 o C/5. Los tres ensayos experimentales están expuestos en la Sección 3.3.1.

4.3. Estimación de los parámetros

4.3.1. Preparación de los datos

Para obtener los parámetros del circuito equivalente que modela la batería de forma matemática se va a hacer uso de la herramienta “Battery Modeling” de MathWorks.

En dicha carpeta nos encontramos con subcarpetas, Figura 28, cada una de ellas con una función específica. En este caso, para la parametrización de los diferentes elementos del circuito equivalente se va a hacer uso de la carpeta ‘SyntheticData’.

Dentro de la carpeta ‘SyntheticData’ nos encontramos con diferentes archivos, los cuales son necesarios para la parametrización de los elementos del circuito eléctrico, Figura 29. Se introducen los datos (corriente, tensión y tiempo) obtenidos experimentalmente de la batería ensayada en el laboratorio de almacenamiento de la UPNA en el archivo ‘synthData.mat’.

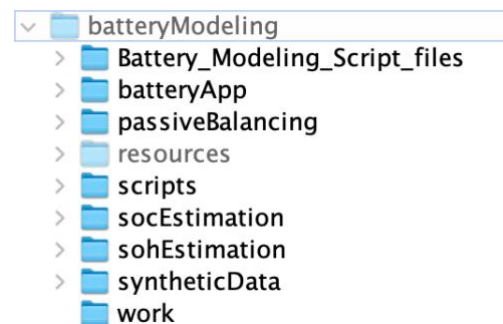


Figura 28. Carpetas que nos encontramos dentro de Battery Modeling

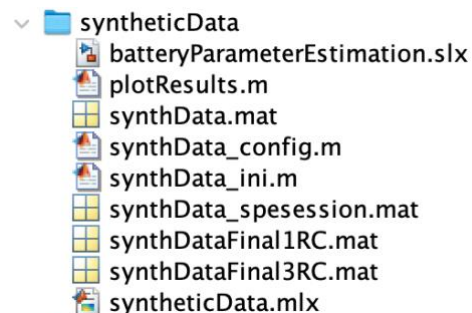


Figura 29. Archivos de syntheticData

Uno de los problemas con los que nos hemos ido encontrando a lo largo de este trabajo ha sido al introducir en la matriz ‘synthData.mat’ unos vectores relativamente grades, del orden de 1.000.000 elementos, esto es un número muy grande de datos con los que “Battery Modeling” no puede trabajar, es por eso por lo que es necesario trabajar con vectores con menos elementos, se ha aproximado que “Battery Modeling” trabaja adecuadamente con vectores máximos de 10.000 datos.

Solo vamos a estudiar el caso en el que la batería se descarga, es decir, cuando le pedimos pulsos de corriente a la batería, por eso tendremos que ajustar los vectores a introducir en synthData.mat para que solo se tenga en cuenta la descarga.

“Battery Modeling” solo puede trabajar con pulsos de corriente en la descarga de la celda de batería, la razón por la cual hace un estudio solo de la descarga puede venir de la mano de una de las conclusiones que se han obtenido del desarrollo del método simplificado. El error que se comete a la hora de medir la resistencia interna de una celda de batería es inferior en la descarga que en la carga.

Por lo tanto, vamos a seleccionar la descarga del primer ciclo de carga/descarga a pulsos de corriente de los tres ensayos experimentales que hemos seleccionado.

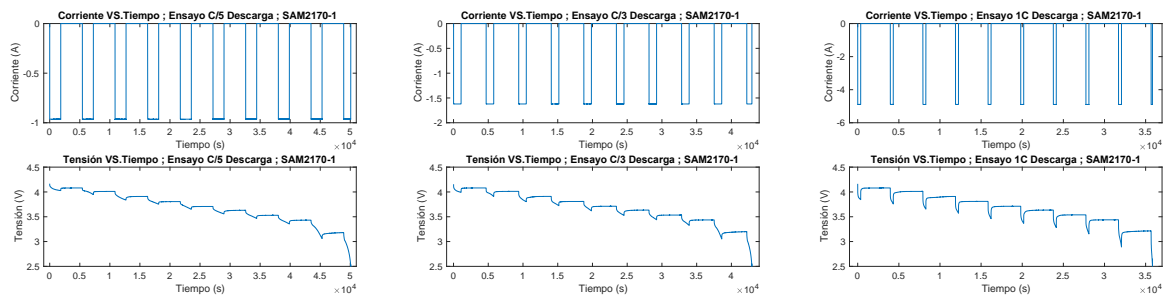


Figura 30. Ensayos experimentales (descarga) que se van a utilizar para el modelo parametrización mediante “Battery Modeling”

Una vez introducidos los datos de nuestro ensayo experimental, del cual queremos extraer los parámetros del circuito equivalente con el que estamos trabajando, hay que modificar el archivo ‘synthData_ini.m’. En este archivo tenemos que introducir las características de la batería que hemos elegido para lanzar el ensayo. Los parámetros que tenemos que hay modificar son: la capacidad, y los valores de tensión E_{min} , E_{max} y E_m . Además, podemos modificar el vector del estado de carga, en este caso se ha decidido utilizar un vector que representa el estado de carga comprendido desde 0 hasta 1 con intervalos de 0.1, de tal manera tenemos un vector de estado de carga de 11 elementos. Una vez modificado el archivo, se guarda. En este archivo se crean los vectores de los diferentes parámetros del circuito equivalente que queremos estimar.

```

% Battery capacity
Capacity = 4.9; % Ampere*hours
SOC_LUT = (0:.1:1)';
Qe_init = 0; % Ampere*hours
SOC0 = (Capacity-Qe_init)/Capacity;
expTemperature = [20 5 40];

%% Estimated Parameters - Initial starting points before estimation
% Em open-circuit voltage vs SOC
Em = 3.6*ones(size(SOC_LUT)); %Volts
Em_min = 2.5*ones(size(SOC_LUT)); %Volts
Em_max = 4.2*ones(size(SOC_LUT)); %Volts

```

Figura 31. Archivo 'synthData.m' modificado específicamente para el ensayo que estamos estudiando

4.3.2. Proceso de estimación de parámetros

A continuación, se abre el archivo 'batteryParameterEstimation.slx', este es un archivo de Simulink donde está el circuito con la batería de litio. Una vez abrimos este archivo, está programado para que ejecute automáticamente los archivos 'synthData_ini.m' y 'synthyData_cong.m', por eso es muy importante guardar el archivo 'synthData_ini.m' una vez esté modificado con los datos de nuestra batería.

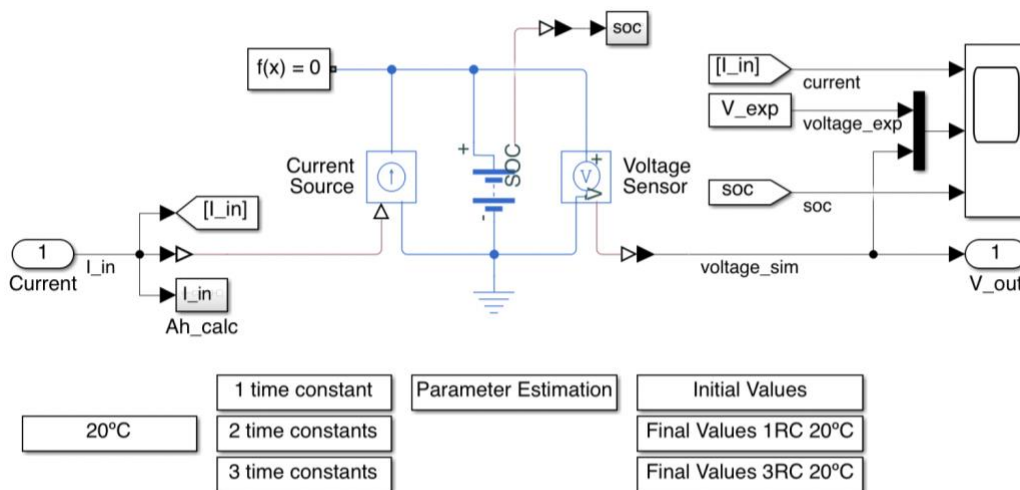


Figura 32. Circuito del archivo 'batteryParameterEstimation.slx'

Básicamente este circuito consta de una batería y una fuente de corriente en la cual introducimos los pulsos de corriente de descarga de la celda que hemos utilizado en el ensayo experimental. Con un sensor de tensión se mide la tensión entre terminales de la batería para que el optimizador los compare con el voltaje medido experimentalmente.

Se puede observar que hay tres cuadrados donde elegir el número de ramas RC que queremos que tenga nuestro circuito eléctrico, nosotros vamos a hacer la estimación para una única rama RC, por eso se pulsa donde pone "1 time constant". Se nos abrirá la siguiente

ventana con los gráficos de tensión y corriente de nuestro ensayo experimental, solo falta darle al botón de estimar.

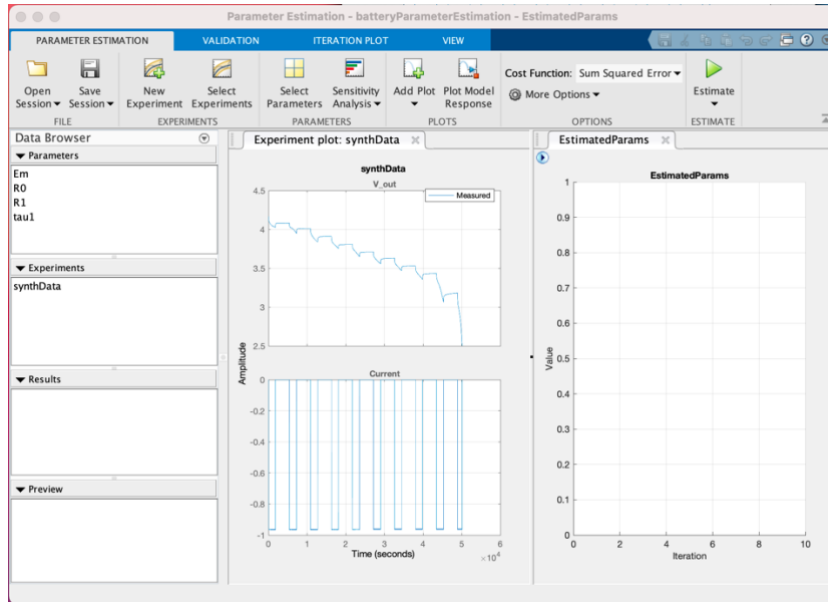


Figura 33. Ventana de estimación de parámetros de Battery Modeling

En el lado izquierdo podemos ver los parámetros a estimar. Debemos tener en cuenta que cada uno de ellos es en realidad un vector de 11 elementos correspondientes a 11 niveles de estado de carga.

Una vez se haya terminado la estimación, se muestran los resultados de la parametrización del circuito eléctrico, es decir los valores de Em, R0, R1 y tau1.

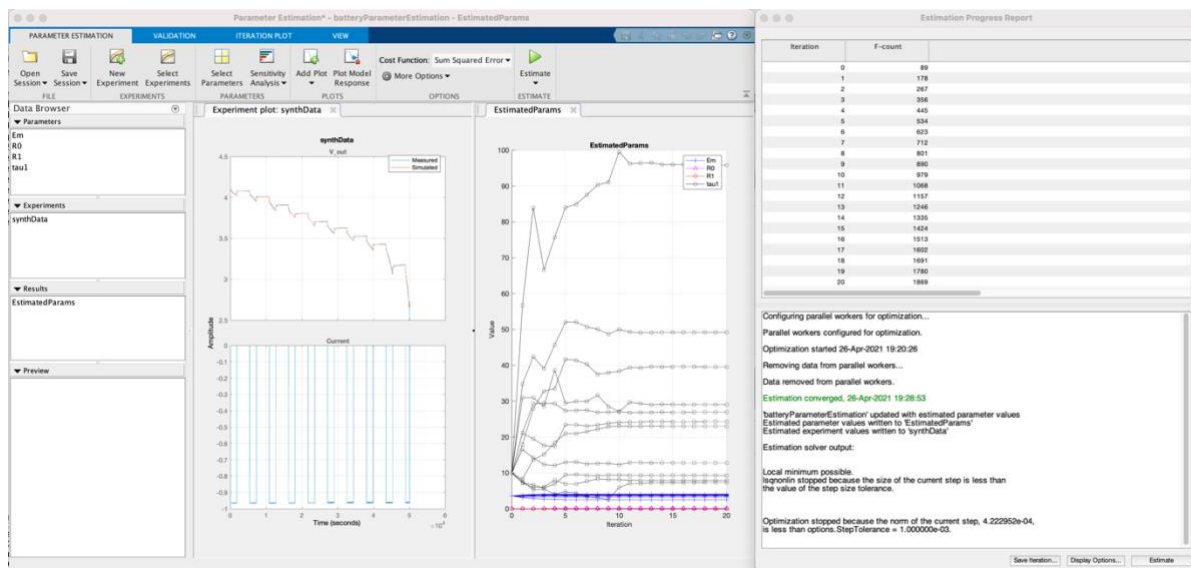


Figura 34. Estimación de parámetros terminada

Cuando se inicia la estimación, Simulink ejecuta el modelo una y otra vez y cada pocas corridas, evalúa qué tan lejos está de su objetivo, es decir, de la curva experimental. Si bien no se acerca lo suficiente, impone perturbaciones a los valores de los parámetros a estimar y evalúa si ese cambio mejora la situación o no. Esto se hace de manera muy eficiente utilizando algoritmos de optimización avanzados.

En el centro de la Figura 34 se puede ver la evolución de los parámetros, cada color representa a uno de los elementos del circuito equivalente y cada línea dentro de cada color corresponde a un nivel específico de estado de carga.

A la derecha se puede ver la ventana que se abre cuando comienza la estimación, con toda la información de dicha estimación, desde la hora que comienza a correr la estimación, el número de iteraciones que se están realizando, hasta la hora en que acaba dicha estimación señalando si se ha conseguido una convergencia o no. En este caso se puede observar que la estimación se ha ejecutado en 8 minutos aproximadamente.

Una vez obtenidos los resultados de la estimación se guardan en el ‘Workspace’ de Matlab, y ya están preparados para utilizarlos en diferentes gráficas que pueden ser de gran interés.

Todo el procedimiento que se ha mostrado de cómo se realiza la estimación de parámetros mediante la herramienta “Battery Modeling”, como se puede ver en las imágenes expuestas, se ha realizado para el ensayo de pulsos de descarga a una corriente de $C/5$ y para la primera celda de batería SAM2170-1, para el resto de ensayos y resto de celdas de batería el procedimiento es exactamente el mismo, es por eso que solo se muestra un caso en modo de muestra.

4.4. Resultados

Una vez realizados todas las estimaciones de los parámetros de cada celda de batería con cada ensayo experimental seleccionado, a continuación, se van a presentar en forma de gráfica los diferentes resultados. Se presentan los resultados obtenidos para la celda SAM2170-1.

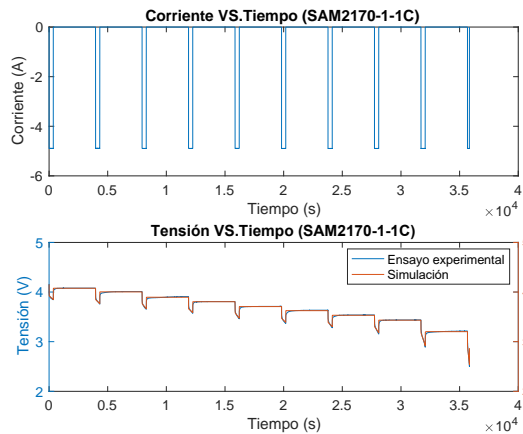


Figura 35. Ensayo experimental Vs. Simulación mediante Battery modeling con pulsos de corriente de descarga a 1C. Celda SAM2170-1

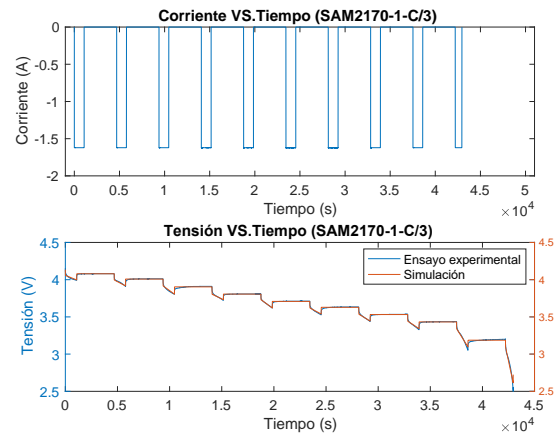


Figura 36. Ensayo experimental Vs. Simulación mediante Battery modeling con pulsos de corriente de descarga a C/3. Celda SAM2170-1

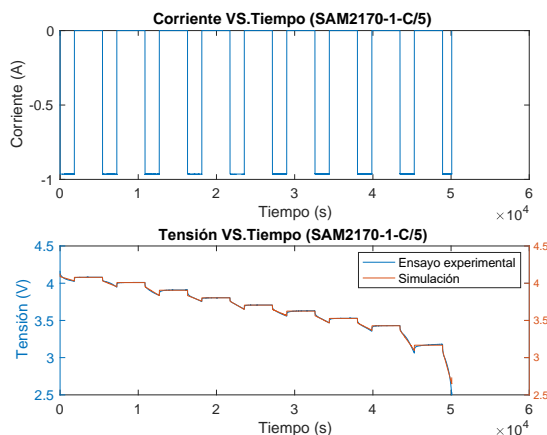


Figura 37. Ensayo experimental Vs. Simulación mediante Battery modeling con pulsos de corriente de descarga a C/5. Celda SAM2170-1

Evaluando el resultado final, podemos ver que en su mayor parte el optimizador hace un buen trabajo ajustando los eventos de caída de voltaje y la relajación. Pero se puede apreciar que este ajuste no es lo suficientemente bueno cuando el estado de carga se acerca al máximo.

En algunos casos, está claro que la relajación de voltaje exponencial es más compleja que una curva exponencial de constante de tiempo único, que es, lo que nos lleva a creer que el circuito equivalente debe ser más elaborado, una cosa fácil de intentar es agregar más constantes de tiempo.

El error que existe entre el ensayo experimental y la simulación va a existir siempre, pero se puede aproximar más la simulación al experimento si en vez de usar en el circuito equivalente utilizado para modelar la batería de litio una rama RC, agregar más ramas RC. Es decir, cuantas más ramas RC se utilicen en el circuito eléctrico, la aproximación entre la simulación y el experimento será mejor.

Una de las maneras para comprobar como de buena es la estimación respecto al ensayo experimentar es la utilización de un parámetro puramente estadístico, se calcula la raíz el error cuadrático medio, a partir de la Ecuación (7). Los resultados de la aplicación de dicha ecuación se presentan en la Tabla 19.

La raíz del error cuadrático medio (RECM) es una medida de uso frecuente de las diferencias entre los valores obtenidos de un modelo o un estimador y los valores experimentales o valores observados. Se calcula el error cuadrático medio para los tres modelos realizados a amplitudes de pulsos de corriente de 1C, C/3 Y C/5, cada uno de ellos representan a un circuito equivalente de nuestra celda de batería con una única rama RC.

En la Tabla 19 además de la raíz del error cuadrático medio se presenta la desviación máxima que se tiene entre la simulación y el ensayo experimental, calculada a partir de la Ecuación (8).

Además, al igual que se realizado a lo largo de todo el trabajo de fin de estudios, se ha hecho el mismo estudio con las otras dos celdas seleccionadas, SAM2170-2 y SAM2170-3, los resultados han sido similares, es por eso por lo que solo se muestran a continuación los valores obtenidos de la raíz del error cuadrático medio y de la desviación máxima para esas celdas junto con los resultados para la celda SAM2170-1.

	Ensayo	RECM	Desviación máxima (V)
SAM2170-1	1C	0.0136	0.2334
	C/3	0.0091	0.1691
	C/5	0.0093	0.1976
SAM2170-2	1C	0.0136	0.2587
	C/3	0.0091	0.1878
	C/5	0.0091	0.1733
SAM2170-3	1C	0.0135	0.2558
	C/3	0.0091	0.1960
	C/5	0.0095	0.1852

Tabla 19. Raíz del error cuadrático medio y desviación máxima para los tres ensayos experimentales realizados a las tres celdas de batería SAM21700

En este caso, para este trabajo de fin de estudios, se considera que la aproximación entre la simulación obtenida de Battery Modeling y el ensayo experimental es muy buena, por lo que no se hará el estudio con tres ramas RC, lo que conllevaría un tiempo elevado para unos resultados similares.

La desviación máxima se produce en el estado de carga mínimo, es decir cuando la batería está totalmente descargada, esto nos hace pensar que para estados de carga relativamente bajos el ajuste que hace “Battery Modeling” no es tan adecuado en comparación con el ajuste que realiza con estados de carga intermedios y altos.

4.5. Análisis de los resultados

Con todos los resultados sobre la mesa, se llega a la conclusión de que el ensayo más adecuado para el estudio de la impedancia de una celda de batería ion-litio es el ensayo realizado a pulsos de corriente de descarga a C/3, ya que si se hace una comparación entre todos los resultados expuestos en la Tabla 19, la simulación más próxima al ensayo experimental se obtiene con el ensayo realizado a C/3, con un RECM de 0.0091.

Estas conclusiones coinciden con las conclusiones obtenidas de desarrollo del método simplificado, ya que en este caso también la opción más precisa para la medición de la impedancia de una celda de batería de iones de litio es realizarla con un ensayo de pulsos de corriente de descarga con una amplitud de C/3.

Los parámetros obtenidos mediante Battery Modeling para la celda SAM2170-1 del ensayo de pulsos de corriente de descarga con una amplitud de C/3 son los siguientes.

SAM2170_1_C3 RESULTADOS BATTERY MODELING				
SOC (p.u.)	R0(Ohmios)	R1(Ohmios)	Em (V)	tau 1 (s)
0,000	0,077	0,010	2,524	56,206
0,100	0,052	0,004	3,188	25,835
0,200	0,056	0,000	3,433	6,651
0,300	0,054	0,000	3,531	5,364
0,400	0,055	0,002	3,629	9,612
0,500	0,054	0,001	3,709	13,410
0,600	0,046	0,001	3,806	1,417
0,700	0,060	0,000	3,903	13,717
0,800	0,057	0,000	4,009	6,917
0,900	0,050	0,001	4,079	16,226
1,000	0,047	0,000	4,135	16,620

Tabla 20. Resultados de la estimación de parámetros mediante Battery Modeling para en ensayo realizado a pulsos de corriente de descarga a C/3 para la celda de batería SAM2170-1

El ensayo estándar con el que los fabricantes de baterías de ion litio miden la impedancia de las celdas es el ensayo realizado con amplitudes de corriente de C/5, en la Figura 34 podemos ver como “Battery Modeling” a la hora de estimar los parámetros nos da información sobre el tiempo que tarda la herramienta en hacer dicha estimación, nos dice a la hora que comienza a hacer la optimización y la hora en que la estimación es convergente. A continuación, se presenta una tabla con el tiempo de ha llevado a “Battery Modeling” hacer la estimación de parámetros para cada uno de los ensayos realizados.

Ensayo	1C	C/3	C/5
Tiempo de estimación de parámetros mediante Battery Modeling (minutos)	4	5	9

Tabla 21. Tiempos de estimación de parámetros mediante "Battery Modeling" para los tres ensayos experimentales, siendo los resultados la media entre las tres celdas SAM21700 estimadas

A la conclusión a la cual se quiere llegar con la Tabla 21, es que los fabricantes podrían utilizar el ensayo con amplitudes de corriente de C/3, que hemos demostrado que es el más preciso a la hora de querer medir la impedancia de la celda de batería, pero además de ganar precisión, se reduce el tiempo de la estimación. También se reduce el tiempo del ensayo experimental si se realiza con una corriente de C/3 en lugar de con una corriente de C/5, como se puede observar en la Sección 3.3.1, donde aparecen los tres ensayos empleados con el tiempo correspondiente de duración de cada uno de ellos.

Capítulo 5: Comparativa entre ambos modelos. Modelo simplificado Vs. Método de parametrización mediante Battery Modeling.

5.1. Introducción

Una vez realizado el estudio de la impedancia de una celda de batería de ion litio de dos maneras diferente, con el modelo simplificado, Capítulo 3, y mediante el método de parametrización con la herramienta de “Battery Modeling”, Capítulo 4, en el siguiente apartado se va a hacer una comparación entre ambos modelos. Para ello se va a utilizar la herramienta Simulink-Matlab, con la cual se ha diseñado el circuito mostrado en la Figura 38.

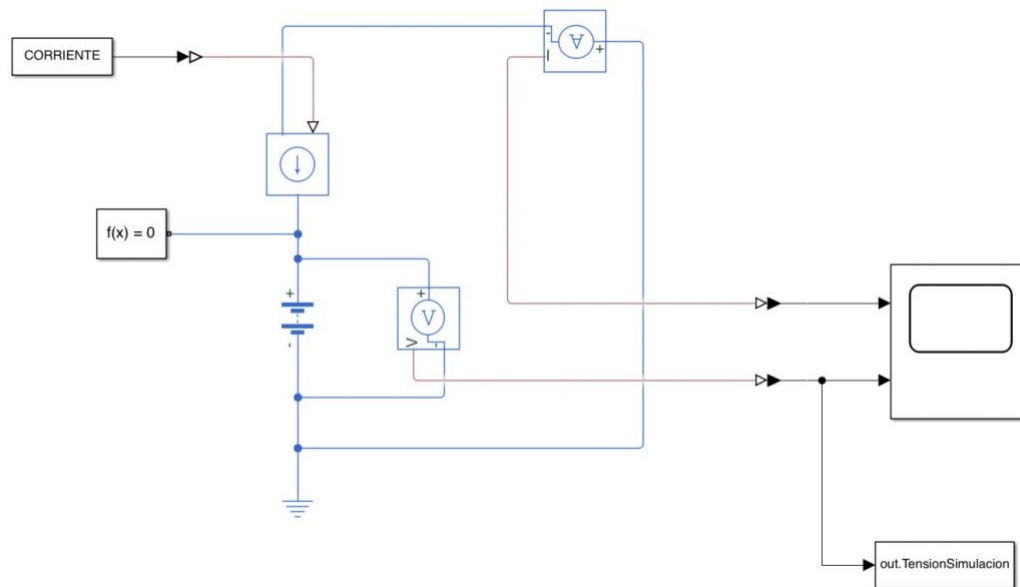


Figura 38. Esquema de simulación en Simulink

En la Figura 38 se muestra el circuito con el que se va a realizar el ensayo de una celda de batería seleccionada de la librería de Simulink. El bloque ‘Battery (table-based)’ representa a la celda de batería, en la cual se va a introducir los diferentes parámetros obtenidos de los dos modelos realizados para el estudio de la impedancia de una celda de batería de ion litio.

En serie con la celda de batería se ha colocado una fuente de corriente, por la cual introduciremos la misma corriente con la cual se ha realizado los ensayos experimentales en el laboratorio, los ensayos experimentales se encuentran en la Sección 3.3.1.

Con la corriente que se introduce por la celda de batería se mide la tensión entre los terminales del bloque ‘Battery (table-based)’ mediante un voltímetro y se representa en forma de gráfico en el ‘Scope’. De esta manera se puede ver si la tensión medida en esta simulación se aproxima a la tensión real medida de forma experimental.

5.2. Preparación de los datos y resultados

5.2.1. Preparación de los datos

En este capítulo, lo que realmente se quiere hacer es la comparación de la impedancia de la celda de batería que se ha obtenido con los dos modelos realizados para tal fin.

En el Capítulo 3 hemos llegado a la conclusión de que la manera más precisa para medir la impedancia de la celda es con pulsos de corriente de descarga de una amplitud de C/3, y hemos obtenido los parámetros expresados en la Tabla 18 como resultado para conocer todos los elementos del circuito equivalente que representa a nuestra celda de batería Figura 14.

Por otro lado, en el Capítulo 4, con el modelo realizado mediante “Battery Modeling”, hemos llegado a la misma conclusión, la manera más eficiente de medir la impedancia de una celda de batería es con pulsos de descarga de amplitud C/3, hemos obtenidos los parámetros expresados en la Tabla 20 como resultado para conocer todos los elementos del circuito equivalente que representa a nuestra celda de batería Figura 27, con una única rama RC.

La conclusión para ambos modelos es la misma pero los parámetros obtenidos que representan a la celda de batería mediante un circuito equivalente son distintos. En este capítulo, lo que realmente se quiere hacer es la comparación de la impedancia de la celda de batería que se ha obtenido con los dos modelos realizados para tal fin, para hacer dicha comparación, es necesario que los dos modelos cuenten con la misma curva Em vs. SOC. Como se va observado en el Capítulo 4 que la estimación de parámetros mediante Battery Modeling da unos buenos resultados, se ha escogido la curva Em vs. SOC que obtenemos de dicha estimación para la comparación de ambos modelos. Por lo tanto, los datos a introducir para cada uno de los modelos quedan de la siguiente manera.

BATTERY MODELING					MODELO SIMPLIFICADO		
SOC (p.u.)	R0 (Ohmios)	R1 (Ohmios)	Em (V)	tau 1 (s)	SOC (p.u.)	Rint (Ohmios)	Em (V)
0,000	0,077	0,010	2,524	56,206	0,000	0,0395	2,524
0,100	0,052	0,004	3,188	25,835	0,100	0,0372	3,188
0,200	0,056	0,000	3,433	6,651	0,200	0,037	3,433
0,300	0,054	0,000	3,531	5,364	0,300	0,0359	3,531
0,400	0,055	0,002	3,629	9,612	0,400	0,0348	3,629
0,500	0,054	0,001	3,709	13,410	0,500	0,0349	3,709
0,600	0,046	0,001	3,806	1,417	0,600	0,0347	3,806
0,700	0,060	0,000	3,903	13,717	0,700	0,0349	3,903
0,800	0,057	0,000	4,009	6,917	0,800	0,0374	4,009
0,900	0,050	0,001	4,079	16,226	0,900	0,0465	4,079
1,000	0,047	0,000	4,135	16,620	1,000	0,1043	4,135

Tabla 22. Parámetros (más precisos) obtenidos de los dos modelos desarrollados para la medición de la impedancia de la celda de batería, correspondientes a la celda SAM2170-1

Una vez introducidos los parámetros que representan a nuestra celda de batería en el bloque ‘Battery (table-based)’ del esquema de simulación de Simulink, Figura 38, lo único que falta por decidir es la corriente que vamos a introducirle a nuestra celda de batería.

Los ensayos que se han realizado tanto para el estudio del error de la resistencia interna como para el modelo de parametrización mediante Battery Modeling constan de pulsos de corriente de carga y descarga continuos, es decir, toda la carga y toda la descarga mediante un único pulso de corriente, y de ciclos de carga/descarga mediante pulsos de corriente, Figura 16. Por lo tanto, se puede decir que son ensayos experimentales bastante completos, es por eso por lo que los tres ensayos experimentales van a ser los que se van a utilizar para proporcionar el perfil de corriente en el esquema de simulación de Simulink, Figura 38.

5.2.2. Resultados

A continuación, se presentan los tres ensayos experimentales con las dos simulaciones realizadas con los parámetros obtenidos mediante “Battery Modeling” y el modelo simplificado, Tabla 22.

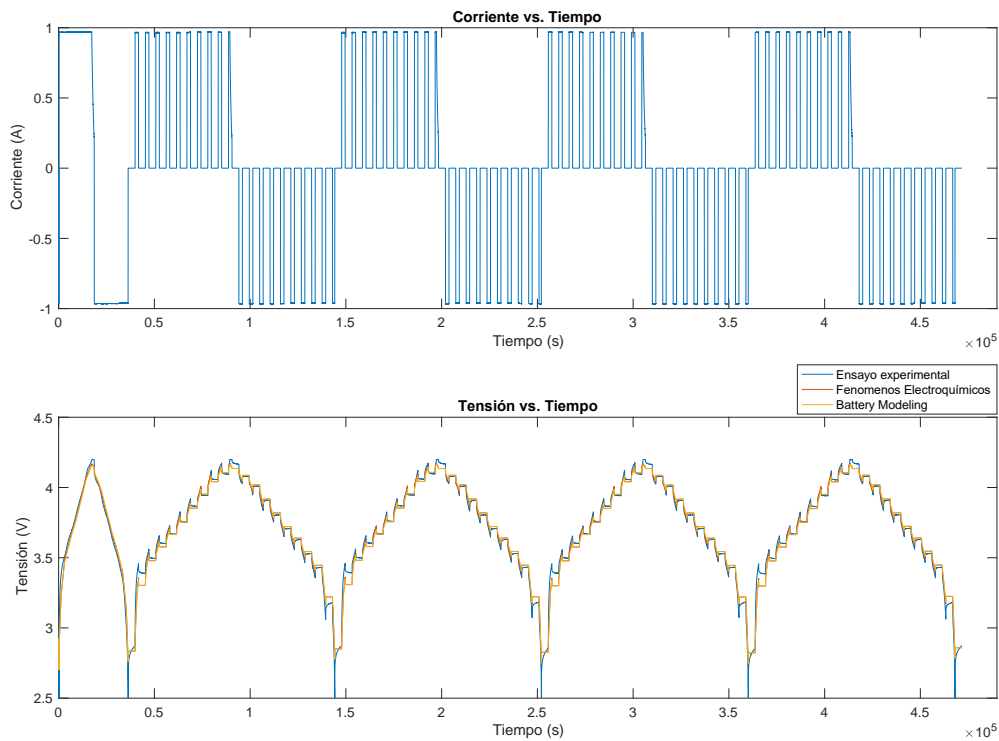


Figura 39. Pulsos de corriente de amplitud C/5

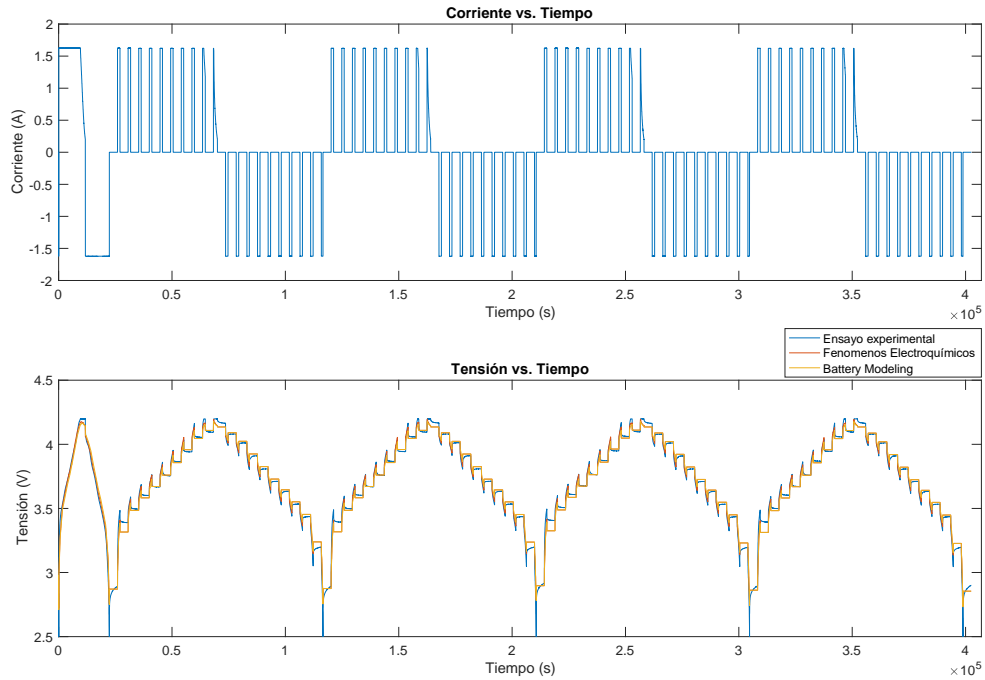


Figura 40. Pulsos de corriente de amplitud C/3

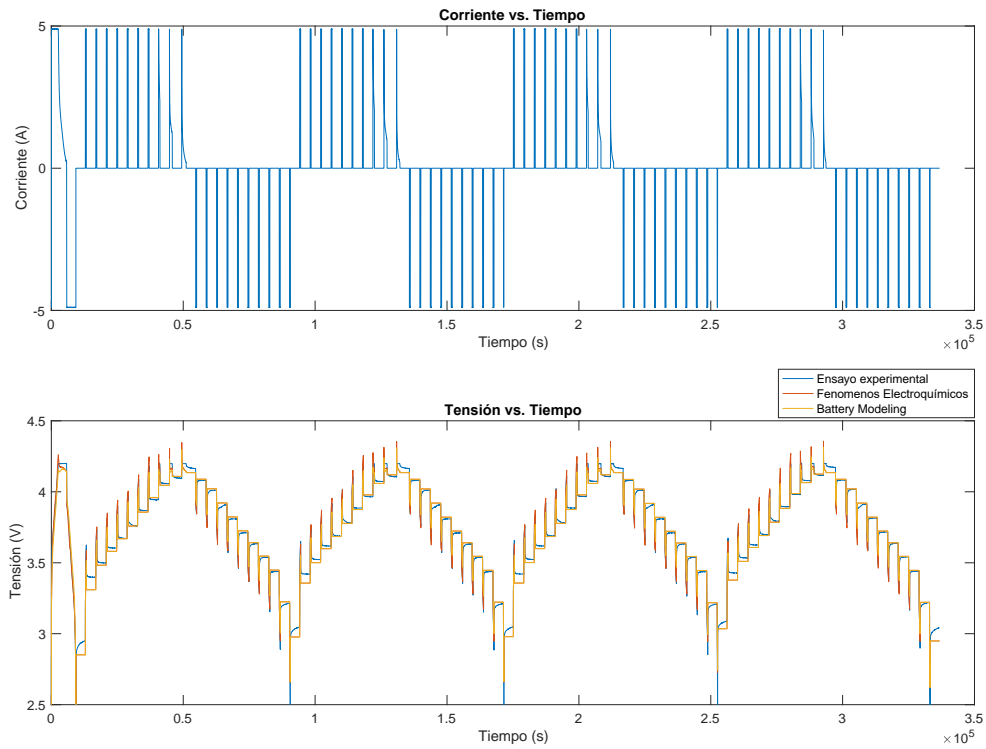


Figura 41. Pulsos de corriente de amplitud 1C

A lo largo de todo el trabajo de fin de estudios se ha ido comprobando y justificado que las tres celdas de batería SAM2170 se comportan de manera similar, ya que son exactamente el mismo modelo de celda de batería, es esa la razón por la cual para este último capítulo experimental del TFE se va a trabajar únicamente con una de las celdas de batería, SAM2170-1.

5.3. Análisis de los resultados

Con los resultados obtenidos de las simulaciones de Simulink se realiza el cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RECM), aplicando la Ecuación (7), y la desviación máxima, Ecuación (8) que se da entre el ensayo experimental y la simulación, para las dos simulaciones realizadas a cada ensayo experimental, una de ellas con la impedancia obtenida del modelo simplificado, y la otra de ellas mediante el método de parametrización con “Battery Modeling”.

		SAM2170-1	
		RMSE	Desviación Máxima (V)
Ensayo 1C	Battery Modeling	0.031398	0.30711
	Modelo Simplificado	0.037092	0.35989
Ensayo C/3	Battery Modeling	0.033792	0.28566
	Modelo Simplificado	0.040429	0.28522
Ensayo C/5	Battery Modeling	0.038751	0.29102
	Modelo Simplificado	0.043398	0.28728

Tabla 23. RMSE y desviación máxima entre las simulaciones y ensayos experimentales

Viendo los resultados expuestos en la Tabla 23, los dos modelos desarrollados en este trabajo fin de estudios, Capítulo 3 y Capítulo 4, para el cálculo de la impedancia de una celda de batería son muy aproximados al ensayo experimental, aunque el modelo realizado mediante Battery Modeling presenta más precisión que el modelo simplificado, esto puede deberse que para ese modelo se ha tenido en cuenta la respuesta dinámica de la batería y sin embargo, en el modelo simplificado hemos hecho una aproximación de asociar toda la impedancia de la celda a una única resistencia interna.

Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras

6.1. Conclusiones

En este trabajo de fin de estudios se ha estudiado el comportamiento de una celda de batería de iones de litio, focalizándose principalmente en los errores que se cometen a la hora de medir la eficiencia coulombica, eficiencia energética, capacidad e impedancia en una celda de batería de litio.

Se ha comprobado que la medición de la impedancia de una celda de batería puede hacerse de diversas maneras, y se ha comprobado que en gran medida depende de diversos parámetros de la propia celda como puede ser el estado de carga o la propia capacidad de la celda estudiar. Al comienzo del trabajo de fin de estudios se han citado varios objetivos a cumplir, con respecto a ellos se puede decir lo siguiente.

En primer lugar, en el Capítulo 2 (estudio del error de la medida de la eficiencia energética, eficiencia coulombica y capacidad), se ha comprobado que los equipos de medición empleados para la medida de la eficiencia energética son adecuados y es posible realizar dicha medida sin disponer de cicladores con cámaras térmicas. Por otro lado, se ha comprobado que para la medición de la eficiencia coulombica no tenemos suficiente precisión con el equipo de medición empleado, ya que se obtienen valores superiores al 100%. Por último, se ha realizado el estudio del error de la medida de capacidad, donde se ha llegado a la conclusión de que para dicha medida es necesario tener en cuenta otro parámetro muy importante a la hora de hacer una caracterización de las baterías que es la temperatura.

Por otro lado, se ha hecho la medición de la impedancia de una celda de batería de dos maneras diferentes, las dos se han basado en un circuito equivalente que representa a la celda. La primera de ellas ha consistido en desarrollar un modelo simplificado, Capítulo 3, y en segundo lugar ha entrado en juego la estimación de parámetros mediante “Battery Modeling”, Capítulo 4.

Con el primero de los modelos desarrollados, el simplificado, se ha llegado a la conclusión de que la medición de la impedancia de una celda de batería se puede hacer tanto en la carga como en la descarga con pulsos de corriente comprendidos entre amplitudes de $C/3$ a $C/5$. No obstante, dicha medición es preferible que se tome en pulsos de descarga, ya que minimizamos el posible error que podamos estar cometiendo. Además, para ser lo más precisos posible, la amplitud de corriente de los pulsos de descarga más adecuada es a $C/3$, ya que de este modo conseguimos minimizar todavía más el error, ganando en precisión y minimizamos el tiempo necesario para practicar el ensayo experimental en comparación de hacerlo con pulsos de corriente de amplitud $C/5$. Por otro lado, la medición de impedancia de una celda de batería con pulsos de corriente de amplitud $1C$ queda totalmente descartada, ya que, en este caso, con estados de carga no muy elevados la celda de batería entra en la zona de tensión constante y el error se dispara, perdiendo toda la precisión que podríamos tener para hacer la medición de la impedancia de la celda.

Con el segundo de los modelos con el que se ha trabajado en este trabajo de fin de estudios se han llegado a conclusiones similares. Para ello se ha utilizado la herramienta de

MathWorks “Battery Modeling”, la cual solo trabaja con la estimación de parámetros de una celda de batería con pulsos de corriente de descarga, esto puede deberse a la conclusión a la cual se ha llegado con anterior modelo estudiado, la medición de la impedancia de una celda de batería es más precisa y conlleva menor error si se toma en la descarga a pulsos de corriente de la propia celda. Por lo tanto, una vez obtenidos los resultados para este otro modelo, se ha llegado a la conclusión de que la medición de la impedancia de la celda de batería es más precisa con amplitudes de pulsos de corriente de descarga a $C/3$. Además, a la hora de utilizar “Battery Modeling” para la estimación de parámetros, el tiempo de estimación es menor con esta amplitud de corriente, por lo tanto, además de ganar en precisión ganamos también en el tiempo de estimación de los parámetros.

Por último, en el Capítulo 5, se ha realizado la comparación de los dos modelos estudiados para la medición de la impedancia de una celda de batería con la herramienta Simulink-Matlab. Se ha llegado a la conclusión que con el modelo obtenido de la parametrización mediante “Battery Modeling” se consiguen resultados más próximos al ensayo experimental, aunque es verdad que la diferencia entra ambos modelos, parametrización mediante “Battery Modeling” y modelo simplificado, son mínimos, por lo que cualquiera de los dos modelos podría servir para la medición de la impedancia de una celda de batería de litio.

6.2. Líneas futuras

A lo largo de todos estos meses se ha intentado estudiar el error cometido a la hora de medir numerosos parámetros que caracterizan una celda de batería, como pueden ser la eficiencia energética, eficiencia coulombica, capacidad o la impedancia de una celda de batería de litio. Con los objetivos que hemos obtenido a lo largo de todos estos meses cabe la posibilidad de ampliar los estudios realizados y aplicarlos a otro tipo de estudios, que puedan estar relacionados con los estudiados en este trabajo de fin de estudios, como puede ser la incorporación de los análisis de errores en próximos ensayos que se puedan realizar.

Con el cálculo del error de la eficiencia energética y capacidad se ha llegado a la conclusión de que es necesario tener en cuenta otra de las características, que se podría decir que es una de las más importantes de una celda de batería, que es la temperatura, por ello podría ser interesante analizar el error de la medición de la eficiencia coulombica y capacidad teniendo en cuenta esta característica y para ello realizar los ensayos experimentales con cicladores que contengan cámaras térmicas para poder tener controlado este otro parámetro. En definitiva, se trataría de desarrollar un método de medición de eficiencia coulombica con suficiente precisión.

En el Capítulo 3, se ha desarrollado un método para la medición de la impedancia de la celda de batería basado un modelo simplificado, se ha llegado a la conclusión de que las medidas de impedancia en carga, descarga, al comienzo y al final de los pulsos de corriente son equivalentes, por lo tanto, sería interesante desarrollar un método de caracterización de la impedancia combinando toda esta información que se puede extraer de un mismo ensayo experimental. Además, cabe la posibilidad de replicar el mismo estudio realizado, pero esta vez para la caracterización de la tensión de circuito abierto de la celda de batería.

Por otro lado, en el Capítulo 4 se ha hecho uso de la herramienta “Battery Modeling” para la caracterización de los elementos de la celda de bacteria, para ello la herramienta proporcionada por MathWorks hace uso de un circuito equivalente Thevenin con posibilidad de elegir entre el número de ramas RC a añadir a nuestro circuito que representa a la celda de batería. Este trabajo de fin de estudios se ha realizado utilizando únicamente esta herramienta con una única rama RC, por lo que podría resultar de gran interés el estudio de la influencia del número de ramas RC en la precisión del modelo.

Referencias

- [1] Enerdata, “Global Energy Statistical Yearbook,” 2019. [En línea]. Available: <https://yearbook.enerdata.net/>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [2] M. Jacoby, “It’s time to recycle lithium-ion batteries,” C&EN Glob. Enterp., vol. 97, no. 28, pp. 29–32, 2019.
- [3] Iñigo Garatea Alcázar. Trabajo de fin de estudios. Universidad Publica de Navarra.
- [4] Hugh W. Coleman and W. Glenn Steele. (2018). *Experimentation, validation, and uncertainty analysis for engineers. Fourth edition.* Hoboken, NJ, USA: Wiley
- [5] Colaboradores de Wikipedia. Error sistemático [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2020 [fecha de consulta: 21 de mayo del 2021]. Disponible en <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Error_sistem%C3%A1tico&oldid=130193692>.
- [6] Colaboradores de Wikipedia. Error aleatorio [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2020 [fecha de consulta: 21 de mayo del 2021]. Disponible en <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Error_aleatorio&oldid=125820951>.
- [7] Colaboradores de Wikipedia. Desviación típica [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2021 [fecha de consulta: 21 de mayo del 2021]. Disponible en <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Desviaci%C3%B3n_t%C3%ADpica&oldid=134744203>.
- [8] Colaboradores de Wikipedia. Error estándar [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2021 [fecha de consulta: 21 de mayo del 2021]. Disponible en <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Error_est%C3%A1ndar&oldid=135067789>.
- [9] Colaboradores de Wikipedia. Raíz del error cuadrático medio [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2020 [fecha de consulta: 21 de mayo del 2021]. Disponible en https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ra%C3%ADz_del_error_cuadr%C3%A1tico_medio&oldid=125822564.
- [10] MathWorks, [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/videos/modeling-batteries-using-simulink-and-simscape-1562930245321.html>. [Último acceso: Agosto 2020].

