

Modelización de las curvas características de carga y descarga de una batería en condiciones dinámicas.



Luque López, Rafael

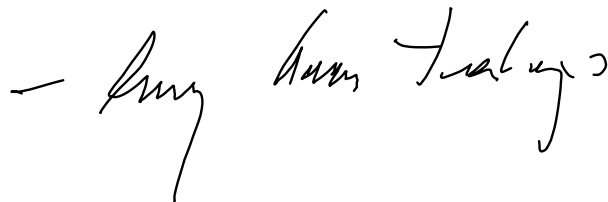
Mataix Caballero, Diego

Vega Mateos, Javier

Zapatero Montaña, Pablo

Para realizar la modelización completa del comportamiento de una batería de *Li-ion*, en los procesos de carga y descarga, no basta con la modelización del comportamiento estático de la batería, si no que se debe tener en cuenta sus características de funcionamiento en régimen dinámico. De hecho, un correcto ajuste de los modelos dinámicos es esencial para emplear este tipo de baterías para uso espacial, donde la batería está sometida a distintas cargas a lo largo de una órbita, así como a un gran número de ciclos de carga-descarga, que dependen del tipo de órbita del satélite. Este estudio pretende realizar un análisis comparativo entre los ajustes del modelo dinámico de batería realizados de manera tanto analítica como numérica, y entre dos modelos del circuito equivalente de distinta complejidad.

Palabras clave: Batería; Modelización; Conversión dinámica; *Li-ion*; Potencia; Condensador; Simulink; Carga; Descarga;



Índice

1. Introducción	4
2. Metodología	5
2.1. Ajuste analítico del modelo dinámico de una batería con un solo par RC	5
2.2. Ajuste numérico	7
2.2.1. Importación de datos	7
2.2.2. Ajuste numérico del modelo dinámico de una batería con un solo par RC	7
2.2.3. Ajuste numérico del modelo dinámico de una batería con dos pares de RC	9
2.2.4. Función de coste en Simulink	10
3. Resultados	10
3.1. Ajuste analítico del modelo dinámico de una batería 1RC	10
3.2. Ajuste numérico	14
3.2.1. Ajuste del modelo dinámico con parámetros del modelo estático	14
3.2.2. Ajuste numérico del modelo dinámico de una batería 1RC	15
3.2.3. Ajuste numérico del modelo dinámico de una batería 2RC	15
3.3. Comparación entre los distintos modelos estudiados	16
3.3.1. Comparación entre el ajuste analítico y numérico del modelo 1RC	16
3.3.2. Comparación entre los ajustes numéricos del modelo 1RC y 2RC	17
4. Conclusiones	18

Índice de Figuras

1. Circuito equivalente modelo 1RC [1].	4
2. Circuito equivalente modelo 2RC [1].	5
3. Captura del modelo 1RC creado en Simulink del circuito equivalente.	8
4. Captura del modelo 2RC creado en Simulink del circuito equivalente.	8
5. Captura del modelo 2RC creado en Simulink del circuito equivalente.	9
6. Ajuste analítico de la curva experimental filtrada correspondiente al tramo 2 ($I = 0,5$ A).	11
7. Ajuste analítico de la curva experimental filtrada correspondiente al tramo 3 ($I = -0,2$ A).	11
8. Ajuste analítico de la curva experimental filtrada correspondiente al tramo 4 ($I = -4,2$ A).	12
9. Ajuste analítico de la curva experimental filtrada correspondiente al tramo 5 ($I = 0,8$ A).	12
10. Ajuste analítico de la curva experimental filtrada correspondiente al tramo 6 ($I = 2$ A).	13
11. Ajuste mediante parámetros hallados analíticamente de la curva experimental.	14
12. Ajuste de la curva de una batería en proceso de conversión dinámico mediante parámetros basados en análisis estático.	14
13. Ajuste de la curva de una batería en proceso de conversión dinámico mediante el modelo 1RC.	15
14. Ajuste de la curva de una batería en proceso de conversión dinámico mediante el modelo 2RC.	16
15. Comparativa del ajuste de la curva de una batería en proceso de conversión dinámico mediante el modelo 1RC analítico y 1RC.	17

16. Comparativa del ajuste de la curva de una batería en proceso de conversión dinámico mediante el modelo 1RC y 2RC.	18
---	----

Índice de Tablas

1. Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando el modelo exponencial completo de descarga estática para la determinación del voltaje interno.	7
2. Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando un modelo exponencial de carga estática para la determinación del voltaje interno.	7
3. Valores iniciales de los parámetros del modelo 1RC.	9
4. Valores iniciales de los parámetros del modelo 2RC.	10
5. Valores de los parámetros del modelo analítico 1RC.	13
6. Valores de los parámetros del modelo 1RC.	15
7. Valores de los parámetros del modelo 2RC.	16
8. Parámetros finales del ajuste analítico y numérico del modelo 1RC.	17
9. Parámetros finales de los ajustes numéricos de los modelos de 1RC y 2RC.	18

1. Introducción

El funcionamiento habitual de una batería consiste, esencialmente, en dos procesos: la carga, cuando obtiene energía de una fuente externa y la descarga, cuando suministra esa energía almacenada a los dispositivos conectados. Por lo tanto, el estudio de las curvas características de la batería pasa también por dos casos: la carga y la descarga. La modelización eléctrica de una batería consiste en la reducción de un circuito con varias celdas en serie y en paralelo a su equivalente de Thevenin. El acoplamiento de ambos procesos a los que se va a someter repetidamente una batería se conoce como un ciclo de histéresis que pasa por carga o descarga a tenor de la apertura o cierre de dos diodos. La batería estudiada es una batería *Li-ion* con celdas SAMSUNG INR18650-29E.

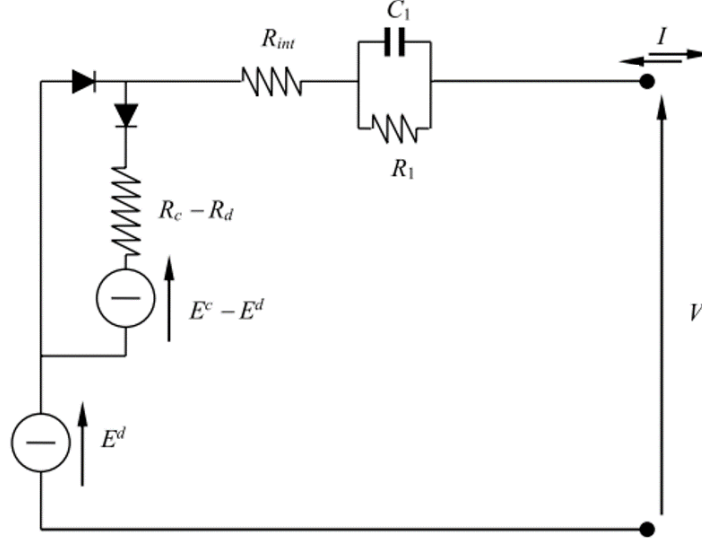


Figura 1: Circuito equivalente modelo 1RC [1].

A partir del modelo de comportamiento de batería desarrollado en publicaciones anteriores [2], este estudio pretende plantear ciertas modificaciones a los modelos estáticos, mediante la inclusión de pares de resistencia-condensador (de aquí en adelante RC) en serie para ajustar el comportamiento dinámico en carga y descarga de la batería ya mencionada. Para ello se desarrolla primeramente un ajuste de forma analítica para un modelo con un solo par RC y se compara con los datos experimentales disponibles de la batería estudiada. Se sigue con el desarrollo de un modelo Simulink para realizar dos tipos de ajuste: un modelo basado en un par RC (de aquí en adelante, modelo 1RC) y otro basado en dos pares RC (de aquí en adelante, modelo 2RC); seguidamente se comparan los resultados con los obtenidos anteriormente. El esquema seguido para el desarrollo de los modelos 1RC y 2RC vienen representados en las Figuras 1 y 2.

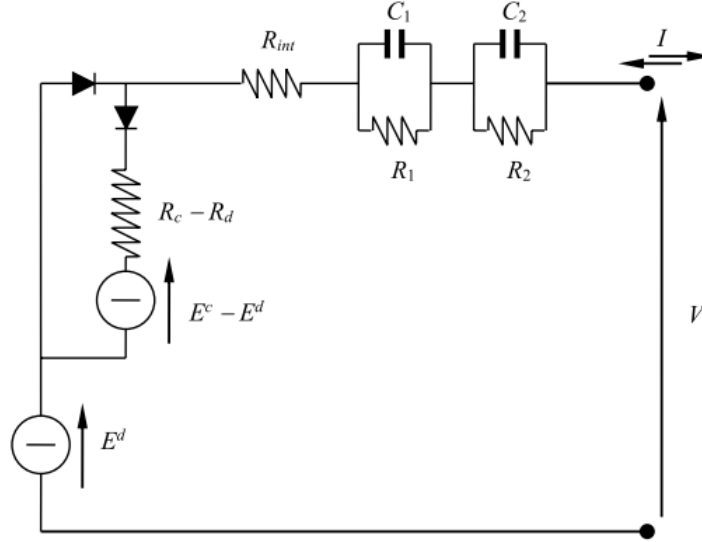


Figura 2: Circuito equivalente modelo 2RC [1].

La bibliografía existente respecto al análisis de baterías en el sector espacial es amplia y detallada: repositorio de distintas tecnologías usadas en las baterías espaciales y criterios de selección [3], modelos predictivos acerca de su vida útil [4], así como estudios relacionados con lo que aquí nos ocupa, en cuanto al comportamiento bidireccional carga-descarga de una batería, desde la optimización de sistema de control para minimizar el desfase controlador-actuador en procesos dinámicos de carga y descarga [5] hasta el ajuste de las curvas de estos procesos usando algoritmos genéticos [6].

2. Metodología

Los procesos que se siguen en este estudio pasan por dos fases: determinar el ajuste analítico del modelo dinámico de una batería, y posteriormente desarrollar los ajustes numéricos para los modelos. En este último caso se sigue un proceso de modelado según se describe en el trabajo de Porras *et al.*, 2018 [1], para el caso del modelo dinámico de una batería con 1RC, y con 2RC. Finalmente se comparan los resultados obtenidos con los distintos métodos empleados.

Los ajustes del modelo dinámico de una batería presentados en este estudio se basan en el trabajo previo realizado por los autores [2], respectivo al ajuste del modelo estático de la batería.

2.1. Ajuste analítico del modelo dinámico de una batería con un solo par RC

En esta sección se expone el primero de los modelos desarrollados, que sumará al circuito equivalente del modelo estático un condensador y una resistencia adicionales, cuyos valores se obtendrán en esta primera aproximación de forma analítica.

Del circuito equivalente con un único par resistencia-condensador, se tiene que la evolución del potencial al producirse un cambio de intensidad puede describirse como:

$$\Delta V = (R_d - R_1)(I_2 - I_1) - (I_2 - I_1)R_1 \exp\left(\frac{-t}{R_1 C_1}\right), \quad (1)$$

donde R_d y R_1 son las resistencias del circuito equivalente indicadas en la Figura 1, C_1 es la capacidad del condensador del circuito, i_1 e i_2 son las intensidades antes y después del cambio respectivamente, ΔV es la diferencia de potencial y t el tiempo desde el cambio de intensidad.

Se pretenden calcular los valores de C_1 y R_1 , que definen el comportamiento transitorio de la batería. Para aislar el segundo término de la expresión 1, que define este comportamiento transitorio, se tratan los datos experimentales de la siguiente forma:

- Se separan las curvas asociadas a cada uno de los cambios de intensidad.
- Se coloca el origen de tiempos en el punto del cambio de intensidad.
- Se voltean las curvas correspondiente a procesos de carga para que todas sean exponenciales decrecientes.
- Se ajusta una recta al tramo final de cada curva para obtener el valor del término estacionario (expresión 1).
- Se resta a cada curva la recta previamente calculada.

Una vez aislado el término transitorio para cada salto de intensidad, puede obtenerse el valor de R_1 en el instante $t = 0$ como:

$$R_1 = \frac{\Delta V}{\Delta I} \Big|_{t=0}. \quad (2)$$

Por otro lado, se conoce que el exponente de la expresión 1 tiene valor -1 cuando $\left| \frac{\Delta V}{I_2 - I_1} \right|$ disminuye al 36,8 % de su valor máximo inicial. Se tiene entonces que:

$$\frac{t'}{R_1 C_1} = 1, \quad (3)$$

donde el instante t' puede determinarse por la igualdad:

$$\left| \frac{\Delta V}{\Delta I} \right|_{t=t'} = e^{-1} \left| \frac{\Delta V}{\Delta I} \right|_{t=0}. \quad (4)$$

Finalmente, una vez determinado el instante t' se puede obtener el valor de C_1 según la expresión 3.

Este proceso se repite para todos los tramos de la curva experimental en el que se produzca un salto de intensidades, excepto para el primero, del que, obviamente, no se dispone de información sobre la intensidad del tramo anterior. Por último, se realiza una media de los valores de las resistencias y capacidades obtenidas para cada tramo y se utilizan como valor inicial de iteración en el ajuste numérico de Simulink.

Se ha implementado un segundo modelo de ajuste para procurar una mejora en el ajuste de las curvas, según aparece reflejado en la expresión:

$$\Delta V = (R_d - R_1)(I_2 - I_1) - (I_2 - I_1)R_1 \exp \left(\frac{-t}{R_1 C_1} + k \left(\frac{-t}{R_1 C_1} \right)^2 \right), \quad (5)$$

donde el valor de k se obtiene de:

$$k = -1 - \ln \left(\frac{1}{R_1} \left| \frac{\Delta V}{\Delta I} \right|_{t=t'} \right). \quad (6)$$

2.2. Ajuste numérico

2.2.1. Importación de datos

Para el ajuste de curvas de forma numérica se ha de realizar un paso previo antes del desarrollo del modelo de Simulink. Este consiste en la importación de las curvas correspondientes a los procesos de carga y descarga en régimen estático de la batería, con sus correspondientes parámetros de ajuste. A modo de recordatorio, la expresión del voltaje de fuente tanto para el caso de carga como de descarga vienen dados por las expresiones:

$$E^d(\phi) = E_0^d + E_1^d \phi + (E_{2,0}^d + E_{2,1}^d I + E_{2,2}^d I^2) \exp[(E_{3,0}^d + E_{3,1}^d I) \phi], \quad (7)$$

$$E^c(\phi) = E_0^c - E_1^c \phi - E_2^c \exp[(E_{3,0}^c + E_{3,1}^c I) \phi]. \quad (8)$$

Los valores de los parámetros importados de cada caso se recogen en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando el modelo exponencial completo de descarga estática para la determinación del voltaje interno.

Modelo exponencial completo	
Coeficiente	Valor final
R_d [Ω]	0,1315
E_0^d [V]	24,148
E_1^d [$V \cdot W^{-1} \cdot s^{-1}$]	$-3,547 \cdot 10^{-6}$
$E_{2,0}^d$ [V]	$1,439 \cdot 10^{-9}$
$E_{2,1}^d$ [Ω]	$-1,603 \cdot 10^{-9}$
$E_{2,2}^d$ [$\Omega \cdot A^{-1}$]	$2,091 \cdot 10^{-10}$
$E_{3,0}^d$ [$W^{-1} \cdot s^{-1}$]	$1,834 \cdot 10^{-5}$
$E_{3,1}^d$ [$W^{-1} \cdot s^{-1} \cdot A^{-1}$]	$2,019 \cdot 10^{-15}$
RMSE [V]	0,107

Tabla 2: Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando un modelo exponencial de carga estática para la determinación del voltaje interno.

Modelo exponencial	
Coeficiente	Valor final
R_c [Ω]	0,0875
E_0^c [V]	24,168
E_1^c [$V \cdot W^{-1} \cdot s^{-1}$]	$3,265 \cdot 10^{-6}$
E_2^c [V]	$5,089 \cdot 10^{-14}$
$E_{3,1}^c$ [$W^{-1} \cdot s^{-1}$]	$2,458 \cdot 10^{-5}$
$E_{3,2}^c$ [$W^{-1} \cdot s^{-1} \cdot A^{-1}$]	$1,800 \cdot 10^{-7}$
RMSE [V]	0,0983

2.2.2. Ajuste numérico del modelo dinámico de una batería con un solo par RC

Para la realización de los ajustes numéricos se emplea la herramienta Simulink de Matlab. Con esto se pretende emplear la herramienta esquemática de bloques para diseñar el modelo del circuito equivalente, como se muestra en la Figura 3. Para poder afinar la representación y evitar errores en la simulación, se desplaza la resistencia R_{int} antes de la bifurcación del ciclo de carga. Esto atiende al hecho de que la resistencia de descarga obtenida en el proceso de modelización estática es superior a la resistencia del circuito equivalente de carga.

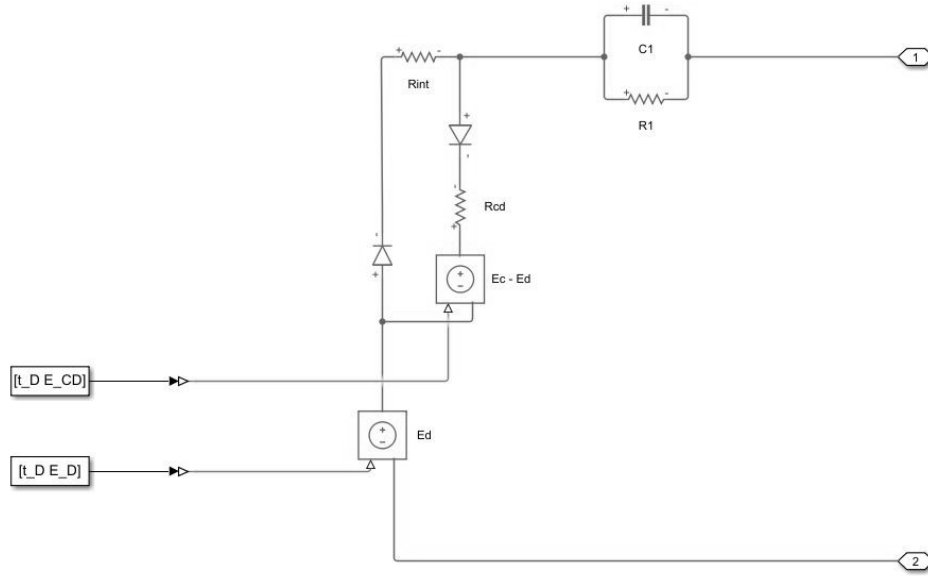


Figura 3: Captura del modelo 1RC creado en Simulink del circuito equivalente.

El modelo del circuito equivalente (Figura 3) se incluye a su vez como un subsistema dentro del modelo completo de ajustes de parámetros de la batería, que se muestra en la Figura 4. Este sistema contiene todos los bloques necesarios para poder simular el comportamiento dinámico de una batería, así como tomar las medidas de corriente y potencial necesarias para el ajuste de parámetros.

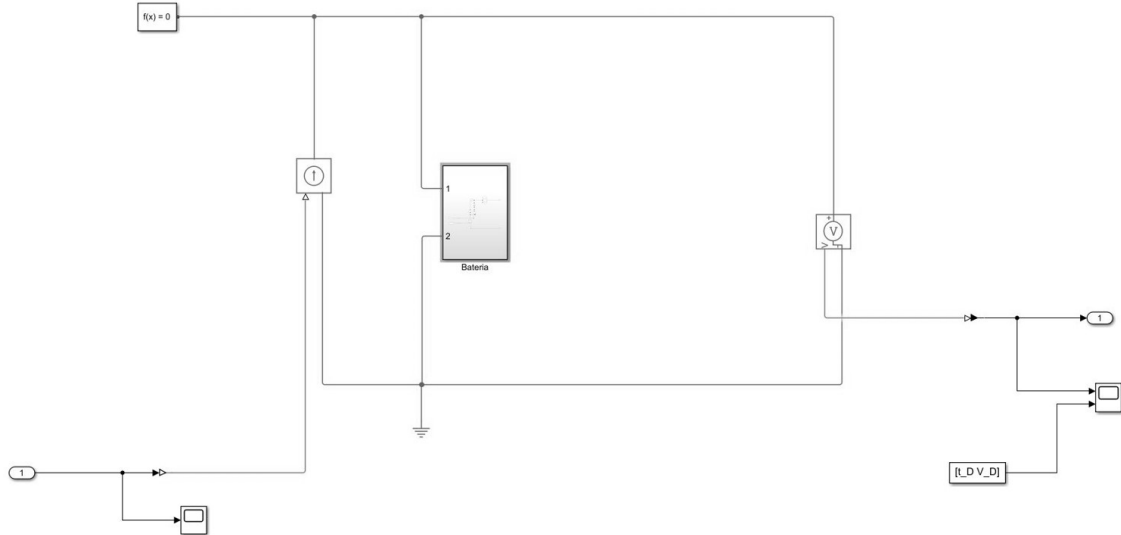


Figura 4: Captura del modelo 2RC creado en Simulink del circuito equivalente.

Para realizar este ajuste, se parte de la resolución analítica obtenida con el método descrito en la Sección 2.1, y se emplean los valores de resistencia obtenidos para usarse como primera iteración en el proceso de ajuste de parámetros. Por lo tanto, estos valores se cargan en el modelo de Simulink, junto a unos valores de referencia para la capacidad de los condensadores, y se pasa al uso de la herramienta *Parameter Estimation* de Simulink. En la herramienta se definen como *inputs* del modelo los datos experimentales de intensidad y potencial que

emplea el algoritmo de estimación de parámetros como curva base con la que determinar el error del modelo, y se definen los *outputs* como los valores obtenidos al finalizar el ajuste del modelo. Finalmente, se seleccionan como parámetros a estimar los valores de capacidad del condensador, así como las resistencias empleadas. Esto es, por lo tanto, un proceso iterativo en el que se desea minimizar el error del modelo, prestando especial atención a que las resistencias del modelo cumplan con los requisitos dados por las siguientes expresiones:

$$R_{d_{estático}} = R_{int} + R_1, \quad (9)$$

$$R_{c_{estático}} = R_{cd} + R_1, \quad (10)$$

donde R_{cd} , R_{int} y R_1 son las resistencias del circuito equivalente del modelo dinámico y $R_{c_{estático}}$ y $R_{d_{estático}}$ las resistencias de carga y descarga, respectivamente, obtenidas en el ajuste estático de la batería. Esto se impone para mantener una cierta coherencia entre el análisis estático y el dinámico.

Los valores iniciales de estos parámetros se resumen en la Tabla 3.

¿de donde salen estas valores?

Tabla 3: Valores iniciales de los parámetros del modelo 1RC.

$R_{int} [\Omega]$	$R_{cd} [\Omega]$	$C_1 [F]$	$R_1 [\Omega]$
0,1375	0,0875	1574	0,0036

2.2.3. Ajuste numérico del modelo dinámico de una batería con dos pares de RC

Para este caso, a la modelización anterior se añade algo más de complejidad introduciendo otro par RC más. Este extra de complejidad implica no disponer de una resolución analítica para obtener un primer valor de ajuste de los parámetros en el ciclo de iteración.

El planteamiento que se sigue es idéntico al del apartado anterior. Primeramente, se desarrolla un modelo de bloques en Simulink que represente la batería estudiada, según se indica en la Figura 5. Por último es reseñable resaltar que la fuente del ciclo de carga, para ser coherente con el modelo de bloques y ofrezca un voltaje igual al de carga, ha de ser la diferencia entre el voltaje de carga y el de descarga.

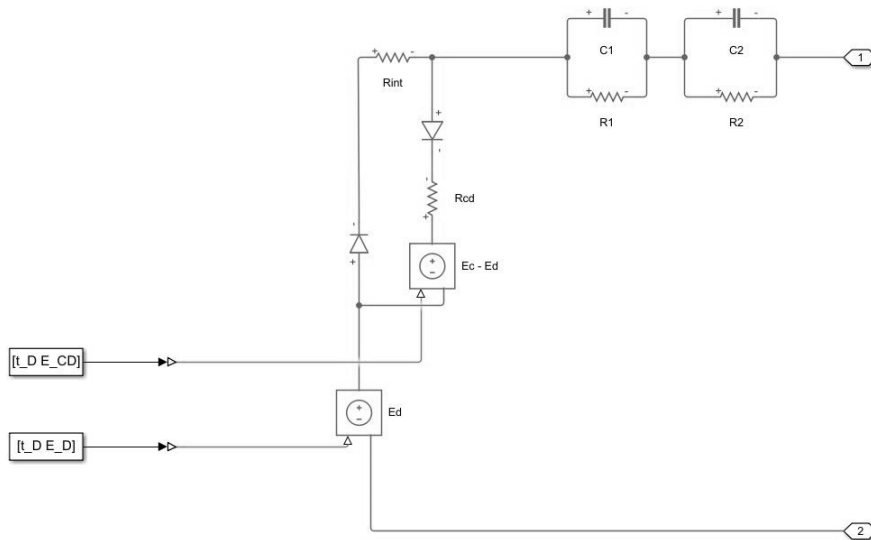


Figura 5: Captura del modelo 2RC creado en Simulink del circuito equivalente.

Tras esto, se genera un modelo de bloques para simular el experimento que permita ajustar el valor de los parámetros de este modelo con un error aceptable a la curva de datos experimentales, según se detalla en la Sección 2.2.2.

Seguidamente, se crea un nuevo experimento en el que se tienen que introducir las curvas de voltaje e intensidad a modo de *input*, y dar una aproximación inicial a los parámetros que se desean ajustar que, para este modelo, serán el valor de las dos resistencias y condensadores en serie y las resistencias R_{int} y R_{cd} . Los valores iniciales de estos parámetros se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4: Valores iniciales de los parámetros del modelo 2RC.

R_{int} [Ω]	R_{cd} [Ω]	C_1 [F]	C_2 [F]	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]
0,1375	0,0875	1000	1000	0,01	0,01

Como ya se ha comentado, los valores iniciales para las resistencias R_{int} y R_{cd} se rescatan de los valores de resistencia en descarga y carga del modelo estático. Los valores iniciales de capacidad de los condensadores y sus resistencias en paralelo se toman como referencia de ajustes ya realizados en otros estudios [7]. Para conservar el comportamiento modelado en los estudios estáticos de la batería, debe comprobarse que:

$$R_{d_{estático}} = R_{int} + R_1 + R_2, \quad (11)$$

$$R_{c_{estático}} = R_{cd} + R_1 + R_2, \quad (12)$$

donde R_{cd} , R_{int} , R_1 y R_2 son las resistencias del circuito equivalente del modelo dinámico y $R_{c_{estático}}$ y $R_{d_{estático}}$ las resistencias de carga y descarga, respectivamente, obtenidas en el ajuste estático de la batería.

2.2.4. Función de coste en Simulink

Como se ha comentado en los apartados anteriores, para realizar los ajustes numéricos se emplea la herramienta Simulink de Matlab. A la hora de realizar dichos ajustes es preciso seleccionar la función de coste a emplear, En este caso se ha seleccionado el *Sum Squared Error* (SSE de aquí en adelante), que viene definido por la expresión:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (V_{modelo,i} - V_{exp,i})^2. \quad (13)$$

3. Resultados

En este apartado se exponen y analizan los resultados obtenidos en cada una de las modelizaciones y ajustes realizados.

3.1. Ajuste analítico del modelo dinámico de una batería 1RC

Los resultados de ajuste de curvas respecto a las curvas experimentales filtradas para cada tramo se resumen en las siguientes figuras. La Figura 6 para el tramo 2, la Figura 7 para el tramo 3, la Figura 8 para el tramo 4, la Figura 9 para el tramo 5 y la Figura 10 para el tramo 6.

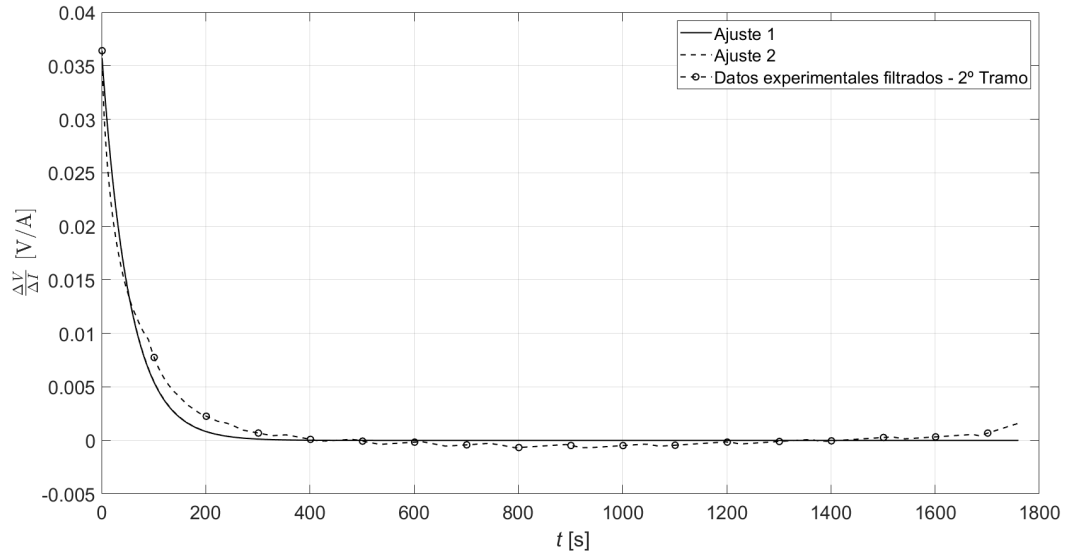


Figura 6: Ajuste analítico de la curva experimental filtrada correspondiente al tramo 2 ($I = 0,5$ A).

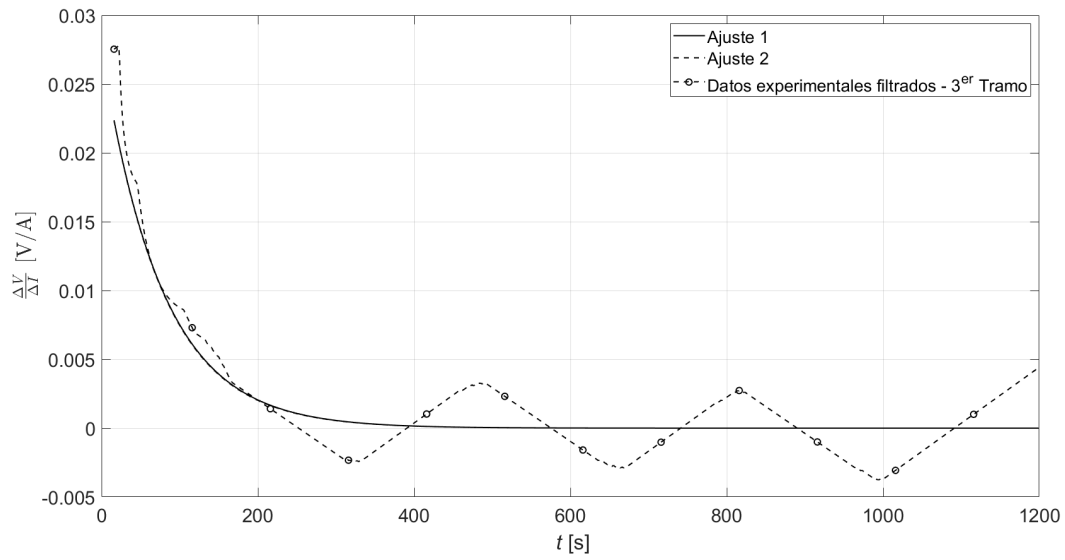


Figura 7: Ajuste analítico de la curva experimental filtrada correspondiente al tramo 3 ($I = -0,2$ A).

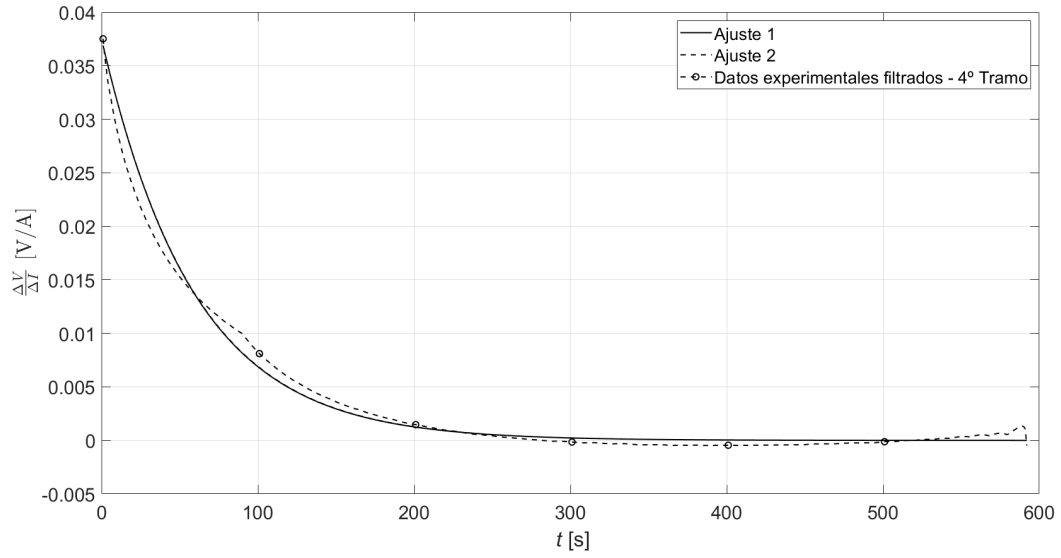


Figura 8: Ajuste analítico de la curva experimental filtrada correspondiente al tramo 4 ($I = -4, 2$ A).

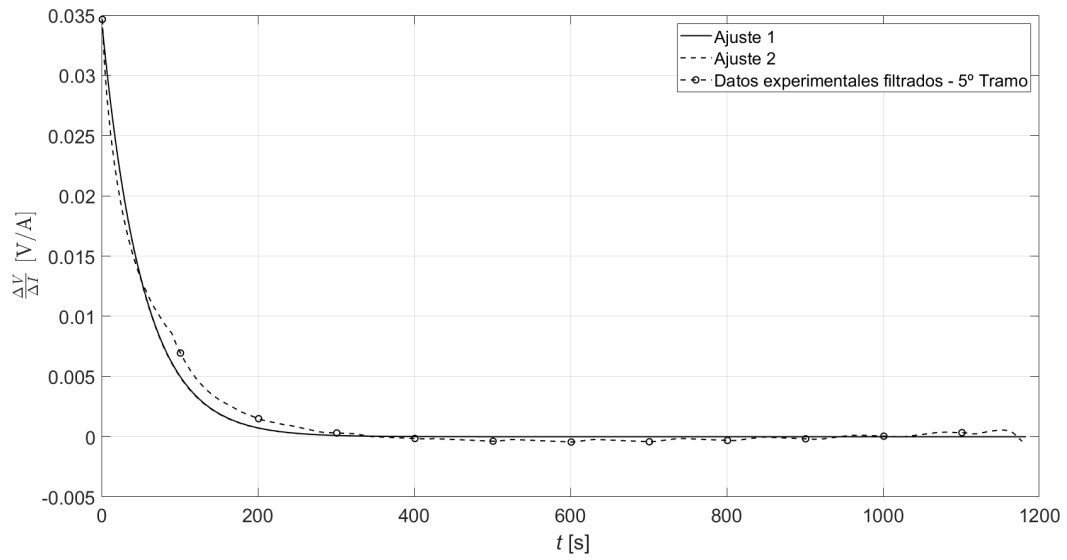


Figura 9: Ajuste analítico de la curva experimental filtrada correspondiente al tramo 5 ($I = 0, 8$ A).

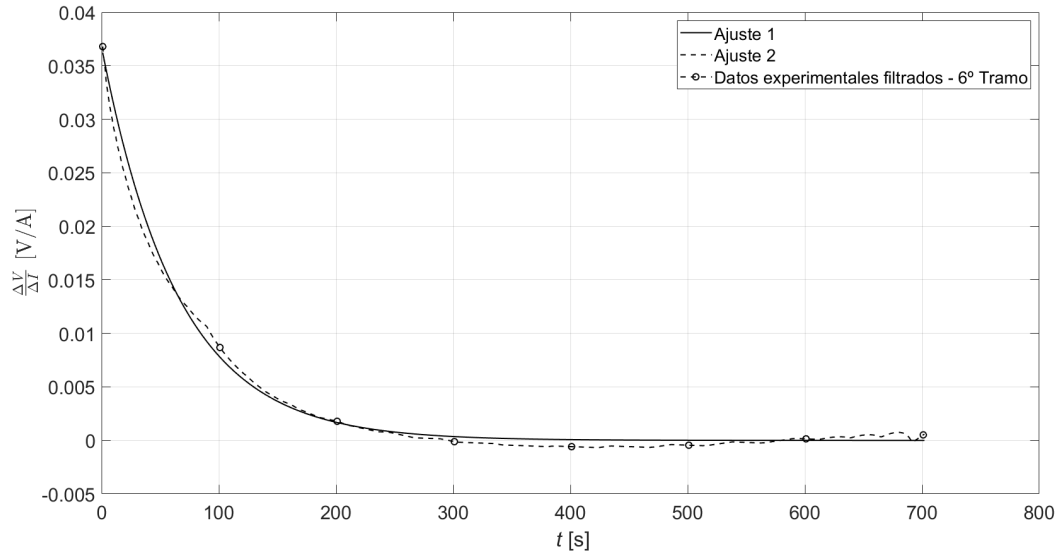


Figura 10: Ajuste analítico de la curva experimental filtrada correspondiente al tramo 6 ($I = 2$ A).

Primeramente, cabe destacar la nula mejora del modelo desarrollado en la expresión 6, por lo que se opta por escoger el modelo con menos parámetros de la expresión 1 en aras de la simplicidad. Mención especial merece la curva correspondiente al tramo 3 (ver Figura 7). Se puede observar que existen tramos de voltaje negativo en la curva experimental filtrada. Esto mismo también ocurría en el resto de tramos, pero de manera menos pronunciada, por lo que los suavizados para estos tramos han dado buenos resultados. Existe la posibilidad de digitalizar la gráfica correspondiente al tramo 3 para asegurar que ningún punto de la curva de diferencia de potencial rebase el límite negativo. No obstante, dado que la curva que interesa que represente fielmente la realidad es la curva ajustada y, para este tramo, tiende a valores nulos sin alcanzar ningún valor negativo, se ha dado por bueno.

Una vez realizado el ajuste de cada tramo, tal como se detalla en la Sección 2, se promedian el valor de las resistencias y capacidades obtenidas para cada tramo y los resultados se recogen en la Tabla 5.

Tabla 5: Valores de los parámetros del modelo analítico 1RC.

C_1 [F]	R_1 [Ω]	SSE [V^2]
1574	0,00363	0,2

Utilizando el valor de estos parámetros para definir una curva de ajuste respecto a la curva de datos experimentales obtenemos lo representado en la Figura 11.

¿Por qué no se incluyen los datos correspondientes a cada tramo?

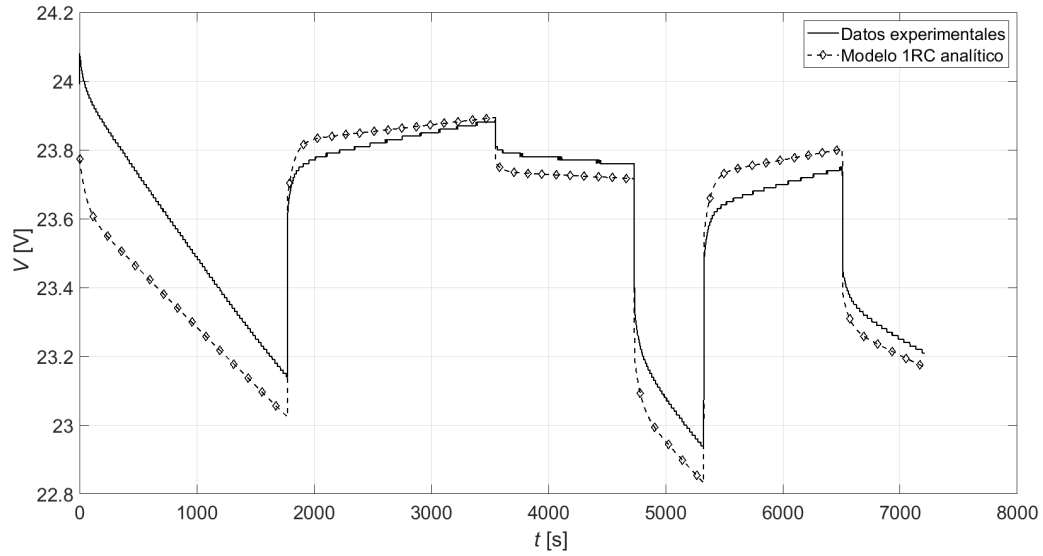


Figura 11: Ajuste mediante parámetros hallados analíticamente de la curva experimental.

Se puede observar que si bien produce un ajuste no del todo desechable a primera vista, han de probarse ajustes numéricos de mayor complejidad para procurar una minimización del error obtenido.

3.2. Ajuste numérico

3.2.1. Ajuste del modelo dinámico con parámetros del modelo estático

Con intención de ilustrar la necesidad de implementar métodos de ajuste diferentes para procesos de carga dinámicos se presenta la curva de ajuste que ofrecería un modelo basado exclusivamente en parámetros obtenidos mediante análisis estático. Esto puede verse en la Figura 12.

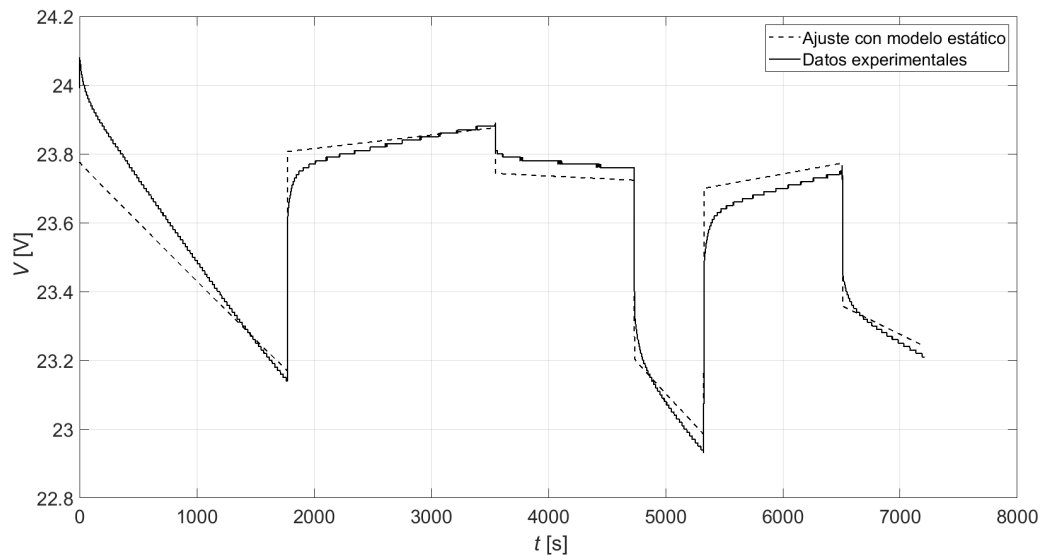


Figura 12: Ajuste de la curva de una batería en proceso de conversión dinámico mediante parámetros basados en análisis estático.

Como puede comprobarse, la curva se ajusta con éxito a los datos experimentales durante cada tramo, no es así,

en cambio, en los puntos de cambio de tramo que, tal como indica la Figura 12, se realiza de forma brusca. La introducción de condensadores en serie suaviza estos cambios de tramo y permite un ajuste más fiel a la realidad.

3.2.2. Ajuste numérico del modelo dinámico de una batería 1RC

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el ajuste de las curvas de comportamiento dinámico de las baterías, empleando la metodología descrita en la Sección 2.2.2. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 13.

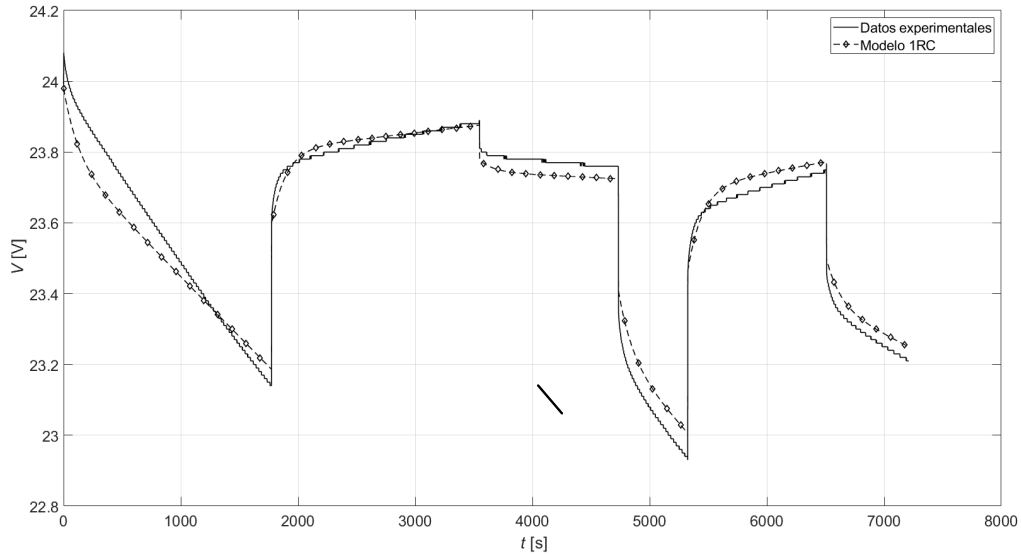


Figura 13: Ajuste de la curva de una batería en proceso de conversión dinámico mediante el modelo 1RC.

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos para los parámetros del ajuste numérico del modelo dinámico de la batería SAMSUNG INR18650-29E, así como el error SSE, que presenta el modelo.

Tabla 6: Valores de los parámetros del modelo 1RC.

R_{int} [Ω]	R_{cd} [Ω]	C_1 [F]	R_1 [Ω]	SSE [V^2]
0,0800	0,04	2603,6	0,047	0,0306

3.2.3. Ajuste numérico del modelo dinámico de una batería 2RC

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el ajuste de las curvas de comportamiento dinámico de las baterías, empleando la metodología descrita en la Sección 2.2.3. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 14.

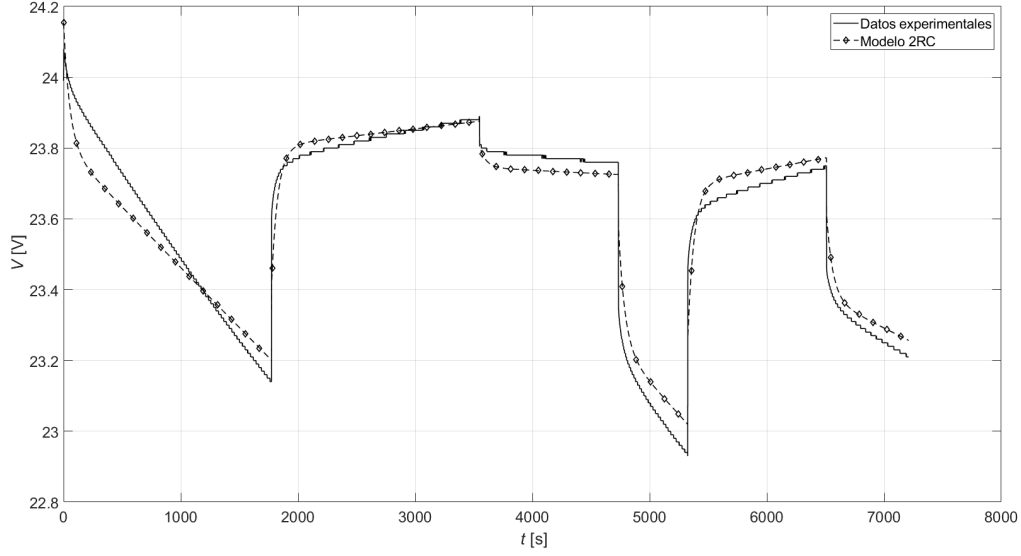


Figura 14: Ajuste de la curva de una batería en proceso de conversión dinámico mediante el modelo 2RC.

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos para los parámetros del ajuste numérico del modelo dinámico de la batería SAMSUNG INR18650-29E, así como el error SSE, que presenta el modelo.

Tabla 7: Valores de los parámetros del modelo 2RC.

R_{int} [Ω]	R_{cd} [Ω]	C_1 [F]	C_2 [F]	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	SSE [V^2]
0,0364	$2,78 \cdot 10^{-15}$	1067,6	1420,2	0,04	0,047	0,0368

3.3. Comparación entre los distintos modelos estudiados

En esta sección se pretende comparar los resultados obtenidos en cada una de las modelizaciones y ajustes realizados.

3.3.1. Comparación entre el ajuste analítico y numérico del modelo 1RC

Los ajustes obtenidos de manera analítica y numérica para el modelo de 1RC presentan grandes diferencias entre si, como se muestra en la Figura 15.

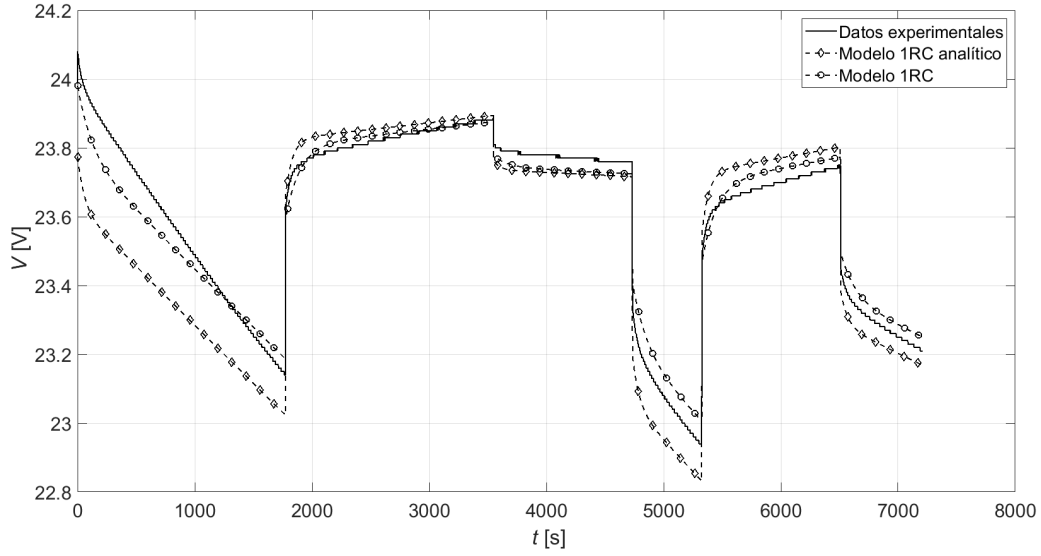


Figura 15: Comparativa del ajuste de la curva de una batería en proceso de conversión dinámico mediante el modelo 1RC analítico y 1RC.

Las diferencias entre ambos casos se debe a que el ajuste analítico se desarrolla con el único objetivo de emplearse como primera aproximación para los valores iniciales de los parámetros de 1RC, ya que no es capaz de modelar de manera precisa el comportamiento dinámico de la batería, como puede verse en la Figura 15. En cambio, el ajuste numérico presenta un error mucho menor, así como una curva mucho más suave que sigue más de cerca a los resultados experimentales.

Tabla 8: Parámetros finales del ajuste analítico y numérico del modelo 1RC.

Ajuste	R_{int} [Ω]	R_{cd} [Ω]	C_1 [F]	R_1 [Ω]	SSE [V^2]
Analítico 1RC	0,1375	0,0875	1574	0,0036	0,20
Numérico 1RC	0,0800	0,04	2603,6	0,047	0,0306

3.3.2. Comparación entre los ajustes numéricos del modelo 1RC y 2RC

Los ajustes obtenidos de manera numérica para los modelos 1RC y 2RC se presentan muy similares entre si, como se puede observar en la Figura 16.

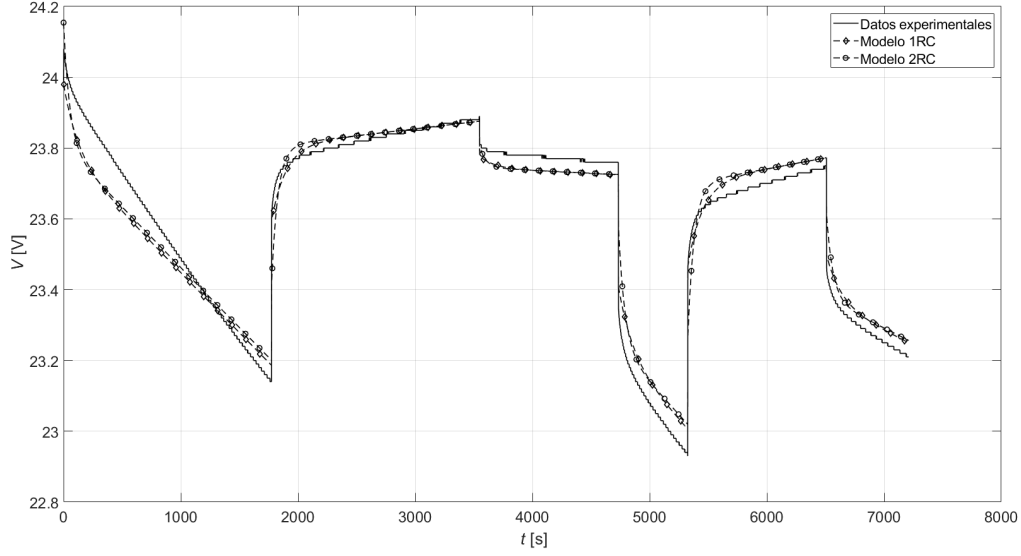


Figura 16: Comparativa del ajuste de la curva de una batería en proceso de conversión dinámico mediante el modelo 1RC y 2RC.

Dado el nivel de complejidad añadido que presenta el modelo 2RC al incorporar dos parámetros más, y el aumento de capacidad computacional requerida asociado, hacen que el modelo 1RC sea una buena opción a la hora de modelar el comportamiento dinámico de una batería. En la Tabla 9 se muestran los parámetros obtenidos con cada modelo, así como el error SSE de los modelos. Se puede observar como el ajuste conseguido con el modelo 1RC es incluso más preciso que el realizado con el modelo 2RC.

Tabla 9: Parámetros finales de los ajustes numéricos de los modelos de 1RC y 2RC.

Modelo	R_{int} [Ω]	R_{cd} [Ω]	C_1 [F]	C_2 [F]	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	SSE [V^2]
1RC	0,0800	0,04	2603,6	N/A	0,047	N/A	0,0306
2RC	0,0364	$2,78 \cdot 10^{-15}$	1067,6	1420,2	0,04	0,047	0,0368

4. Conclusiones

Se exponen diversas modelizaciones para la carga y descarga de baterías *Li-ion*, validando y ajustando estos modelos dinámicos frente a datos experimentales aportados de una batería formada por celdas SAMSUNG INR18650-29E.

Respecto al ajuste analítico del modelo 1RC se puede concluir que presenta unos resultados con error un orden de magnitud mayor al que se obtiene a través del ajuste numérico, pero puede ser de utilidad para usarse como una primera aproximación a los valores iniciales del algoritmo de ajuste de parámetros, pero no es completamente necesario. Por lo que podría emplearse directamente el ajuste numérico del mismo modelo.

El modelo 1RC presenta un ajuste con un error SSE muy bajo que ajusta la curva con gran éxito empleando únicamente 4 parámetros, lo que presenta claras ventajas en términos de capacidad computacional con respecto al ajuste numérico del modelo 2RC. Este último, de hecho, presenta un error SSE un 20,26 % mayor al del modelo 1RC. Que el modelo 2RC presente peores resultados que el modelo 1RC, más sencillo y con menos parámetros, se

ts peor ?

debe muy posiblemente al número de parámetros a estimar, ya que estos requieren de un análisis más detallado con unos niveles de convergencia más finos, con el fin de poder ajustar los seis parámetros de manera eficaz.

Cabe destacar que tanto en el ajuste empleando el modelo 1RC como en el ajuste empleando el modelo 2RC se ha conseguido cumplir con las condiciones impuestas en las expresiones 11 y 12. La imposición de estas restricciones ha requerido de alcanzar una solución de compromiso entre la precisión del ajuste y el cumplimiento para con las restricciones mencionadas.

Todas las modelizaciones realizadas se logran contando con una capacidad computacional y un tiempo de trabajo moderados, sin embargo cabe destacar la alta sensibilidad de algunos de los parámetros de estos modelos, especialmente en los términos exponenciales, que dificultan el ajuste de los mismos.

Referencias

- [1] A. Porras-Hermoso, S. Pindado, J. Cubas, Lithium-ion battery performance modeling based on the energy discharge level, *Measurement Science and Technology* 29 (2018).
- [2] D. M. Caballero, R. L. López, J. V. Mateos, P. Z. Montaña, Modelización de las curvas características de carga y descarga de una batería en condiciones estáticas (2021).
- [3] C. A. Hill, Satellite battery technology - A tutorial and overview, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 26 (2011) 38–43.
- [4] Y. Song, D. Liu, Y. Hou, J. Yu, Y. Peng, Satellite lithium-ion battery remaining useful life estimation with an iterative updated rvm fused with the kf algorithm, *Chinese Journal of Aeronautics* 31 (2018) 31–40.
- [5] J. Calvente, L. Martínez-Salamero, P. Garcés, R. Leyva, A. Capel, Dynamic optimization of bidirectional topologies for battery charge/discharge in satellites, Vol. 4, (2001), pp. 1994–1999.
- [6] K. Thirugnanam, H. Saini, P. Kumar, Mathematical modeling of li-ion battery for charge/discharge rate and capacity fading characteristics using genetic algorithm approach, (2012).
- [7] Ángel Porras-Hermoso, B. Cobo-Lopez, J. Cubas, S. Pindado, Simple solar panels/battery modeling for spacecraft power distribution systems, *Acta Astronautica* 179 (2021) 345–358.