

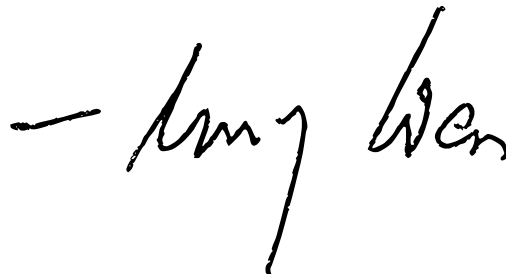
Modelización de las curvas características de carga y descarga de una batería en condiciones estáticas.



Luque López, Rafael
Mataix Caballero, Diego
Vega Mateos, Javier
Zapatero Montaña, Pablo

Un sistema de generación potencia se basa, principalmente, en la obtención de energía de distintas fuentes para su utilización en los distintos equipos que incluye un satélite. Estas fuentes pueden ser químicas, solares o nucleares. En condiciones de operación normales, con cierta incidencia solar y sin demasiados equipos funcionando al mismo tiempo, la potencia proporcionada por los paneles solares (fuente de energía solar) es suficiente para abastecer de energía al satélite. No obstante, en determinadas circunstancias, como periodos de eclipse o funcionamiento simultáneo de varios equipos, la potencia suministrada por los paneles puede resultar insuficiente o inexistente. La solución más común es la introducción de baterías que ofrezcan potencia a los distintos equipos a raíz de la conversión de energía química de la electrólisis en energía eléctrica. En este estudio se presenta una modelización en conversión estática tanto en procesos de carga como de descarga de una batería *Li-ion*.

Palabras clave: Batería; Modelización; *Li-ion*; Conversión estática; Potencia; Química; Carga; Descarga;



Índice

1. Introducción	4
2. Metodología	6
2.1. Determinación del número de celdas de la batería	6
2.2. Modelización del comportamiento estático de la batería en descarga	6
2.2.1. Modelo lineal	7
2.2.2. Primer modelo exponencial	8
2.2.3. Modelo exponencial completo	8
2.3. Modelización del comportamiento estático de la batería en carga	8
2.3.1. Modelo lineal	8
2.3.2. Modelo exponencial	9
3. Resultados	9
3.1. Determinación del número de celdas de la batería	9
3.2. Modelización del comportamiento estático de la batería en descarga	10
3.2.1. Modelo lineal	10
3.2.2. Primer modelo exponencial	11
3.2.3. Modelo exponencial completo	11
3.3. Modelización del comportamiento estático de la batería en carga	12
3.3.1. Modelo lineal	12
3.3.2. Modelo exponencial	13
4. Conclusiones	14

Índice de Figuras

1. Esquema interno de una batería <i>Li-ion</i> . Los iones de litio están representados por puntos rojos; en el ánodo, los átomos de carbono están representados por puntos negros, agrupados en capas hexagonales [1].	4
2. Circuito equivalente de Thevenin de una batería <i>Li-ion</i> en procesos de carga (derecha) y descarga (izquierda) [2].	5
3. Modelo eléctrico de una batería <i>Li-ion</i> en procesos estáticos de carga y descarga [2].	5
4. Modelización del comportamiento de la batería en el caso de descarga empleando el modelo lineal. En la figura se muestran los resultados experimentales como líneas continuas, y los resultados obtenidos con el modelo con líneas discontinuas. Cada una de las curvas, tanto experimentales como la del modelo, corresponden a una corriente de descarga específica.	10
5. Modelización del comportamiento de la batería en el caso de descarga empleando la primera aproximación del modelo exponencial. En la figura se muestran los resultados experimentales como líneas continuas, y los resultados obtenidos con el modelo con líneas discontinuas. Cada una de las curvas, tanto experimentales como la del modelo, corresponden a una corriente de descarga específica.	11

6.	Modelización del comportamiento de la batería en el caso de descarga empleando el modelo exponencial completo. En la figura se muestran los resultados experimentales como líneas continuas, y los resultados obtenidos con el modelo con líneas discontinuas. Cada una de las curvas, tanto experimentales como la del modelo, corresponden a una corriente de descarga específica.	12
7.	Modelización del comportamiento de la batería en el caso de carga empleando el modelo lineal. En la figura se muestran los resultados experimentales como líneas continuas, y los resultados obtenidos con el modelo con líneas discontinuas. Cada una de las curvas, tanto experimentales como la del modelo, corresponden a una corriente de carga específica.	13
8.	Modelización del comportamiento de la batería en el caso de carga empleando el modelo exponencial completo. En la figura se muestran los resultados experimentales como líneas continuas, y los resultados obtenidos con el modelo con líneas discontinuas. Cada una de las curvas, tanto experimentales como la del modelo, corresponden a una corriente de carga específica.	14

Índice de Tablas

1.	Estimaciones iniciales de arranque para el modelo lineal de descarga.	8
2.	Estimaciones iniciales de arranque para el modelo lineal de carga.	9
3.	Estimaciones iniciales de arranque para el modelo exponencial de carga.	9
4.	Número de celdas SAMSUNG INR18650-29E, tanto en serie como en paralelo, que componen la batería estudiada.	9
5.	Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando un modelo lineal de descarga para la determinación del voltaje interno.	10
6.	Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando un primer modelo exponencial de descarga para la determinación del voltaje interno.	11
7.	Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando el modelo exponencial completo de descarga para la determinación del voltaje interno.	12
8.	Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando un modelo lineal de carga para la determinación del voltaje interno.	13
9.	Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando un modelo exponencial de carga para la determinación del voltaje interno.	14

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. Estos procesos aparecen representados en la Figura 1.

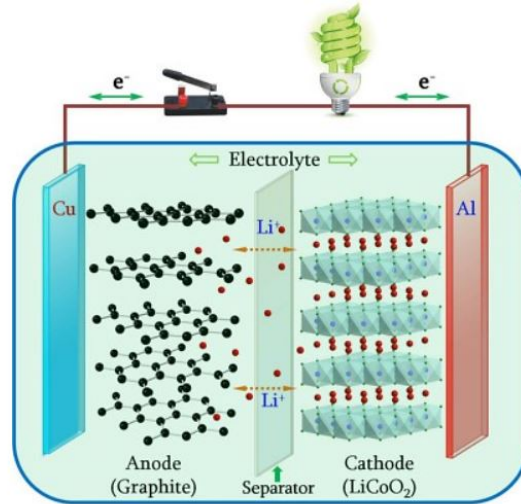


Figura 1: Esquema interno de una batería *Li-ion*. Los iones de litio están representados por puntos rojos; en el ánodo, los átomos de carbono están representados por puntos negros, agrupados en capas hexagonales [1].

Durante el proceso de carga de la batería, los iones de litio se desplazan desde el cátodo de LiCoO₂ hacia el ánodo de grafito, mientras que los electrones hacen lo mismo, pero a través del circuito externo. En la descarga, proceso que permite utilizar la batería para alimentar un dispositivo, los iones se desplazan en sentido opuesto, desde el ánodo hacia el cátodo, igual que los electrones a través del circuito externo, donde se conecta el dispositivo que se quiere hacer funcionar (en la Figura 1, una bombilla).

El estudio de las curvas características de la batería pasa 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, tal como muestra la Figura 2. El acoplamiento de ambos procesos a los que se va a someter repetidamente una batería a lo largo de su vida útil se representa en la Figura 3 como un ciclo de histéresis que pasa por carga ó descarga a tenor de la apertura o cierre de dos diodos. La batería estudiada es una batería *Li-ion* con celdas SAMSUNG INR18650-29E.

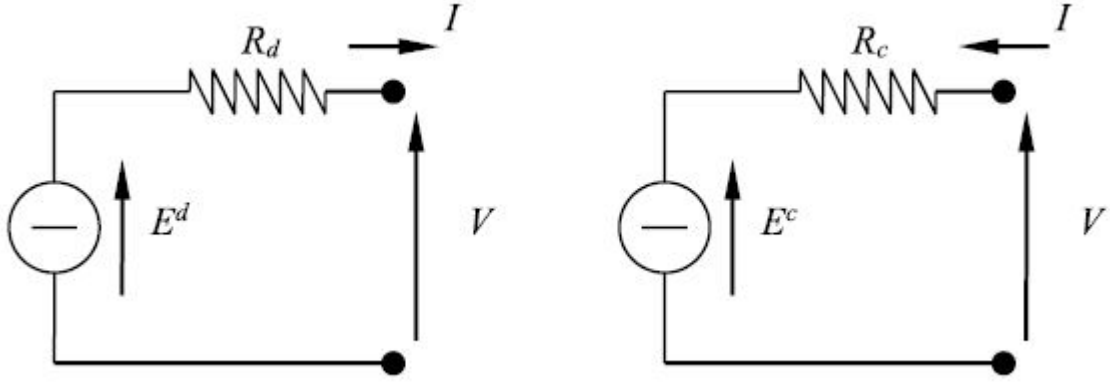


Figura 2: Circuito equivalente de Thevenin de una batería *Li-ion* en procesos de carga (derecha) y descarga (izquierda) [2].

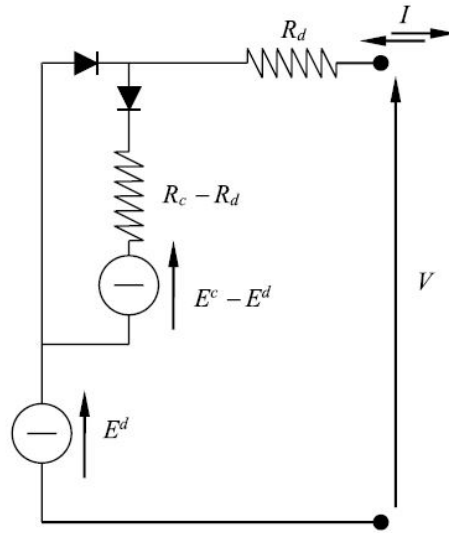


Figura 3: Modelo eléctrico de una batería *Li-ion* en procesos estáticos de carga y descarga [2].

El procedimiento de ajuste resulta similar al circuito equivalente de los paneles solares [3]: se plantea la ecuación del circuito para varios modelos (lineal y exponencial) y se tratan de ajustar los presentes coeficientes para minimizar el error cuadrático medio respecto a las curvas experimentales. El número de coeficientes ajustables dependerá de la complejidad del modelo que se quiera plantear y se establecerá una solución de compromiso entre esfuerzo computacional y mejora apreciable del ajuste de la curva. La presentación de las curvas se realizará en gráficos $V-\phi$ en lugar de los habituales $V-I \cdot t$.

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 [4], modelos predictivos acerca de su vida útil [5], 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 [6] hasta el ajuste de las curvas de estos procesos usando algoritmos genéticos [7].

2. Metodología

Los procesos que se siguen en este estudio pasan por dos fases: determinar el número de celdas que componen la batería estudiada, comparando los datos experimentales con los proporcionados por el fabricante, y modelizar el comportamiento estático de la batería. En este último se sigue un proceso de modelado según se describe en el trabajo de *Porras et al*, 2018 [2]. Al modelo que determina el comportamiento de la batería se le va añadiendo complejidad progresivamente, pasando de un modelo inicialmente lineal a un modelo exponencial con un mayor número de coeficientes a ajustar, consiguiendo finalmente un muy buen ajuste mediante 8 coeficientes en el caso de descarga y 6 en el de carga.

En publicaciones más recientes (*Porras et al*, 2021 [8]) los autores proponen modelos más complejos, involucrando la determinación un mayor número de coeficientes de ajuste. Sin embargo, los modelos aplicados aportan ya unos resultados con errores del orden del 0,4 % del potencial máximo de la batería, como se describe en la sección 3, por lo que se decide no aumentar la complejidad de los modelos, lo cual supondría reducciones del error de orden menor (según se describe en [8]) y un aumento de coste computacional al integrar estos modelos en procesos de simulación más complejos.

2.1. Determinación del número de celdas de la batería

En primer lugar, se desea determinar el número de celdas, tanto en paralelo como en serie, que componen la batería. Para ello, es necesario obtener los datos del fabricante de las celdas de la batería [9] y compararlos con los resultados experimentales obtenidos.

Para determinar el número de celdas en serie basta con dividir el potencial máximo obtenido por las curvas experimentales de la batería en la descarga, por el potencial nominal de una celda. Por otro lado, para determinar el número de celdas en paralelo se emplea la ley de Peukert. En primer lugar se obtienen los tiempos de descarga para cada una de las intensidades de descarga estudiadas y se emplean en la siguiente expresión:

$$k = \frac{\log(t_{1,5}/t_5)}{\log(I_{1,5}/I_5)}, \quad (1)$$

donde k es la constante de Peukert, y el subíndice indica la intensidad de descarga de la medida de tiempo o intensidad empleada, $t_{1,5}$ es el tiempo de descarga a 1,5 A, t_5 es el tiempo de descarga a 5 A, $I_{1,5}$ la corriente de descarga de 1,5 A y I_5 la corriente de descarga de 5 A. Una vez obtenida la constante, se puede calcular la capacidad a 1 A·h, C_p empleando la ley de Peukert con la siguiente expresión:

$$C_p = I^k t. \quad (2)$$

Finalmente, es posible obtener el número de celdas en paralelo dividiendo C_p por la capacidad nominal de una celda proporcionada por los datos del fabricante.

2.2. Modelización del comportamiento estático de la batería en descarga

En primer lugar, se asume que la eficiencia es lo suficientemente alta como para considerar nulas las pérdidas, lo que permite calcular el nivel de descarga de energía (ϕ) según se indica en [2], mediante la expresión:

$$\phi = \phi_0 + \int_{t_0}^t E^d I \, dt = \phi_0 + \int_{t_0}^t (VI + R_d I^2) \, dt, \quad (3)$$

para el caso de la carga la expresión queda como:

$$\phi = \phi_0 - \int_{t_0}^t E^c I \, dt = \phi_0 - \int_{t_0}^t (VI - R_c I^2) \, dt, \quad (4)$$

donde E^d y E^c son los niveles de voltaje interno de la batería, R_d y R_c son las resistencias internas (ver Figura 2), y ϕ_0 es el nivel de descarga en el instante t_0 .

Dado que para el cálculo de ϕ se requiere un valor de R_d y R_c , se calculará este coeficiente en primer lugar de forma analítica, y a continuación se iterará con el mismo durante el proceso de modelización, recalculando ϕ para cada iteración.

En este apartado se exponen los modelos empleados para la modelización de la descarga, en orden creciente de complejidad. En todos los casos se definirá el voltaje según el circuito equivalente:

$$V(\phi, I) = E^d - R_d I. \quad (5)$$

Se modeliza el valor de E^d en función de varios coeficientes, y se buscan valores más precisos de R_d .

2.2.1. Modelo lineal

En primer lugar se emplea un modelo lineal, que permite obtener un valor más preciso de R_d para el cálculo de ϕ y unos coeficientes que serán útiles como valores iniciales de iteración para algunos de los coeficientes de los siguientes modelos, facilitando la resolución de los mismos. Se modeliza E^d como una función lineal de ϕ según la expresión:

$$E^d(\phi) = E_0^d + E_1^d \phi, \quad (6)$$

donde E_0^d y E_1^d son los coeficientes a determinar del modelo.

La obtención de los coeficientes se realizará de forma numérica. Se calcula para ello el RMSE (error cuadrático medio) mediante la siguiente expresión:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{\text{modelo},i} - V_{\text{exp},i})^2}, \quad (7)$$

y se buscan valores de los coeficientes que minimicen el mismo mediante la función *fminsearch* de MATLAB. Como coeficientes se incluyen los que definen a $E^d(\phi)$ y la resistencia R_d , que también será ajustada.

A fin de realizar optimizar el proceso iterativo es conveniente introducir unos valores iniciales coherentes con los resultados experimentales. Para ello se realiza una estimación previa del valor tanto de la resistencia, R_d , como de los coeficientes E_0^d y E_1^d . El valor de la resistencia se estima tomando dos situaciones de descarga similares a distintas corrientes, esto es dos puntos con valores similares de $I \cdot t$, y haciendo uso de la siguiente expresión:

$$R_d = \frac{V_2 - V_1}{I_1 - I_2}. \quad (8)$$

Por su parte, el valor inicial de E_0^d se estima tomando valor inicial de los datos de descarga experimentales. En la Tabla 1 se muestran los valores iniciales que se han empleado para comenzar el proceso iterativo.

Tabla 1: Estimaciones iniciales de arranque para el modelo lineal de descarga.

R_d [Ω]	E_0^d [V]	E_1^d [$V \cdot W^{-1} \cdot s^{-1}$]
0,096	24	$-1 \cdot 10^{-6}$

2.2.2. Primer modelo exponencial

Se considera a continuación un modelo con un término exponencial, se plantea en su forma más simple, introduciendo dos nuevos coeficientes según la expresión:

$$E^d(\phi) = E_0^d + E_1^d \phi + E_2^d \exp(E_3^d \phi), \quad (9)$$

Este modelo se ajusta de forma similar al lineal, empleando los coeficientes del mismo como valores iniciales. Se busca con esa modelización ajustar la curvatura existente en la curva V - ϕ para las descargas elevadas.

2.2.3. Modelo exponencial completo

Como último modelo, se propone una modelización más precisa del término exponencial. En esta ocasión el número de coeficientes aumenta para contar con variación según la intensidad:

$$E^d(\phi) = E_0^d + E_1^d \phi + (E_{2,0}^d + E_{2,1}^d I + E_{2,2}^d I^2) \exp[(E_{3,0}^d + E_{3,1}^d I) \phi]. \quad (10)$$

2.3. Modelización del comportamiento estático de la batería en carga

El modelo de ajuste de carga, más sencillo que el de descarga por contener menos coeficientes que se deben ajustar, pasa por definir el nivel de descarga según la expresión 4, donde ϕ_t representa la energía total descargada para el nivel de corriente considerado (a 1,5 A, 2,5 A y 5 A). Esta forma de definir el nivel de energía ϕ devolverá gráficos de carga de potencial decreciente con ϕ , aunque físicamente correspondan a una curva lineal monótonamente creciente en la representación V - $I \cdot t$ clásica (al menos, hasta la carga escalonada en el tramo final de la carga).

La ecuación del circuito equivalente de Thevenin para este caso se especifica en la expresión:

$$V(\phi, I) = E^c(\phi) + R_c I. \quad (11)$$

Los dos modelos estudiados (lineal y exponencial), al igual que para el caso de descarga, pasan por ajustar los coeficientes que definen E^c , así como R_c , para minimizar el error cuadrático medio entre las curvas experimentales y la curva del modelo.

2.3.1. Modelo lineal

La ecuación que describe el potencial de carga del generador del circuito equivalente para el modelo equivalente es la siguiente:

$$E^c(\phi) = E_0^c + E_1^c \phi, \quad (12)$$

donde E_0^c representa la ordenada en el origen (dado que no se comienza con un nivel de carga nulo) y E_1^c la pendiente de la recta de carga.

El proceso de obtención de estos coeficientes pasa un proceso recursivo de iteración, donde se comienza con unos valores iniciales coherentes con el modelo [2]. El primer valor inicial, para el coeficiente R_c , se puede estimar

directamente de las curvas experimentales, tomando dos puntos muy próximos en $I \cdot t$ para dos corrientes distintas, según aparece reflejado en la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1}. \quad (13)$$

Para el resto de estimaciones iniciales, se tomará el potencial máximo para E_0^c y una suave pendiente negativa para E_1^c . Estos arranques de iteración puede verse representados en la Tabla 2.

Tabla 2: Estimaciones iniciales de arranque para el modelo lineal de carga.

R_c [Ω]	E_0^c [V]	E_1^c [$V \cdot W^{-1} \cdot s^{-1}$]
0,056	20	$-1 \cdot 10^{-6}$

2.3.2. Modelo exponencial

La ecuación que describe el potencial de carga del generador del circuito equivalente para el modelo equivalente es la siguiente:

$$E^c(\phi) = E_0^c - E_1^c \phi - E_2^c \exp \left[(E_{3,0}^c + E_{3,1}^c I) \phi \right], \quad (14)$$

donde E_0^c y E_1^c representan lo mismo que en la expresión 12 (a excepción del signo de la pendiente, que, en este caso se definirá como un número positivo), E_2^c expresa el peso de la exponencial en la curva y $E_{3,0}^c$ y $E_{3,1}^c$ la velocidad de caída.

Para este caso, los valores de arranque en la iteración serán los obtenidos en el apartado lineal para los tres primeros coeficientes, y tomando como valores de referencia para los otros tres aquellos desarrollados en Porras et al. 2018 [2]. Estos aparecen representados en la Tabla 3.

Tabla 3: Estimaciones iniciales de arranque para el modelo exponencial de carga.

R_c [Ω]	E_0^c [V]	E_1^c [$V \cdot W^{-1} \cdot s^{-1}$]	E_2^c [V]	$E_{3,0}^c$ [$W^{-1} \cdot s^{-1}$]	$E_{3,1}^c$ [$W^{-1} \cdot A^{-1} \cdot s^{-1}$]
-0,128	20,2091	$3,39 \cdot 10^{-6}$	$2,64 \cdot 10^{-14}$	$2,34 \cdot 10^{-5}$	$-1,0805 \cdot 10^{-2}$

3. Resultados

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

3.1. Determinación del número de celdas de la batería

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos para el número de celdas SAMSUNG INR18650-29E, tanto en serie como en paralelo, que componen la batería estudiada.

Tabla 4: Número de celdas SAMSUNG INR18650-29E, tanto en serie como en paralelo, que componen la batería estudiada.

Número de celdas	
Serie	Paralelo
6	6

Esto se refiere
a 6 celdas de fe

Las celdas de la
ley de Faraday

3.2. Modelización del comportamiento estático de la batería en descarga

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el ajuste de las curvas $V-\phi$ de descarga, empleando la metodología descrita en la sección 2.2.

3.2.1. Modelo lineal

Los resultados de la primera iteración se presentan en la Figura 4, donde cada una de las curvas, tanto las 3 experimentales como las 3 del modelo, corresponden a una corriente de descarga específica. Este modelo presenta una buena aproximación a la parte lineal de la curva $V-\phi$, pero no es capaz, por razones obvias, de ajustar la parte exponencial.

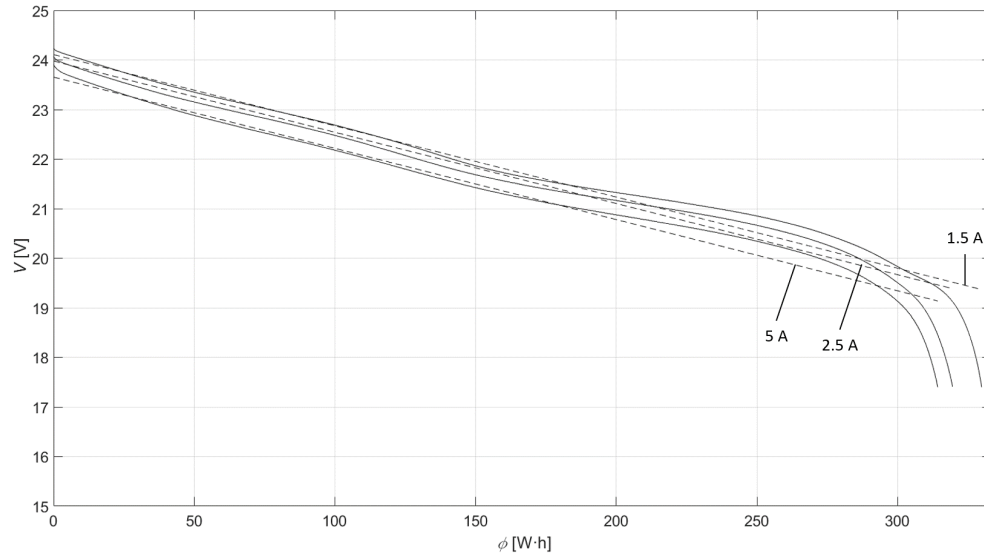
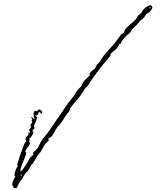


Figura 4: Modelización del comportamiento de la batería en el caso de descarga empleando el modelo lineal. En la figura se muestran los resultados experimentales como líneas continuas, y los resultados obtenidos con el modelo con líneas discontinuas. Cada una de las curvas, tanto experimentales como la del modelo, corresponden a una corriente de descarga específica.

En la Tabla 5 se muestran los coeficientes, R_d , E_0^d y E_1^d que determinan el ajuste de este modelo, así como el RMSE que presenta el modelo. Se puede apreciar que el error es suficientemente alto como para requerir que se realice un ajuste más completo de la curva que tenga en cuenta la parte exponencial.

Tabla 5: Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando un modelo lineal de descarga para la determinación del voltaje interno.

Modelo lineal	
Coeficiente	Valor final
R_d [Ω]	0,1299
E_0^d [V]	24,304
E_1^d [$V \cdot W^{-1} \cdot s^{-1}$]	$-3,992 \cdot 10^{-6}$
RMSE [V]	0,2582



3.2.2. Primer modelo exponencial

Con el fin de obtener un ajuste que sea válido para la totalidad de la curva $V-\phi$ se presenta una modificación al modelo para tener en cuenta la parte exponencial de la curva. En la Figura 5, donde cada una de las curvas, tanto las 3 experimentales como las 3 de la primera iteración del modelo exponencial, corresponden a una corriente de descarga específica. Este modelo presenta claras ventajas respecto al modelo lineal pero no es capaz de ajustar bien la parte exponencial de la curva, donde especialmente para el caso de descarga a 5 A, los resultados experimentales difieren claramente del modelo.

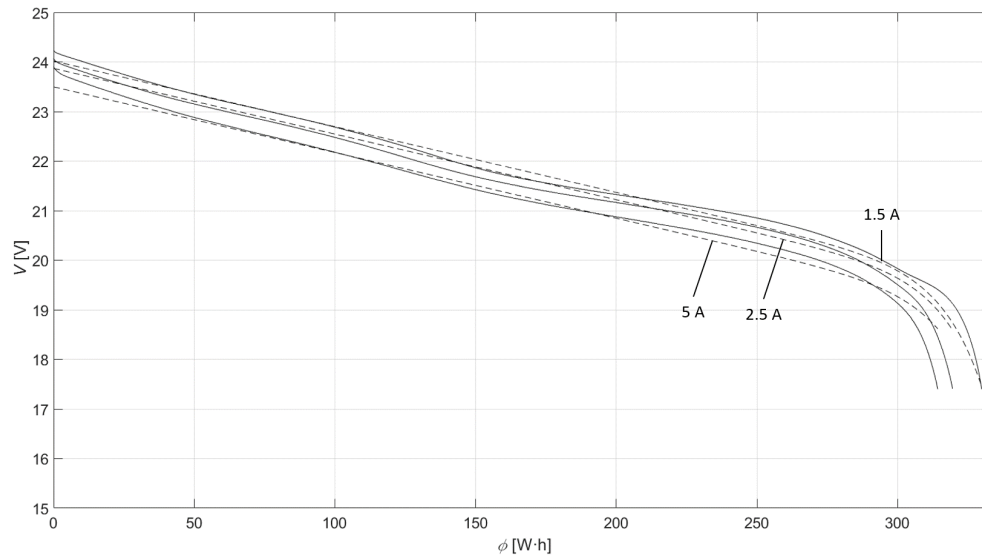
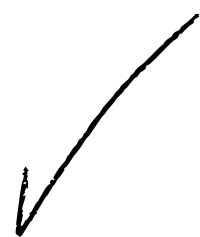


Figura 5: Modelización del comportamiento de la batería en el caso de descarga empleando la primera aproximación del modelo exponencial. En la figura se muestran los resultados experimentales como líneas continuas, y los resultados obtenidos con el modelo con líneas discontinuas. Cada una de las curvas, tanto experimentales como la del modelo, corresponden a una corriente de descarga específica.

Los 5 coeficientes que determinan el ajuste de este modelo se muestran en la Tabla 6, así como el RMSE, que como se puede observar, es un 40 % inferior al que proporciona el modelo lineal visto anteriormente.

Tabla 6: Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando un primer modelo exponencial de descarga para la determinación del voltaje interno.

Primer modelo exponencial	
Coficiente	Valor final
R_d [Ω]	0,1489
E_0^d [V]	24,243
E_1^d [$V \cdot W^{-1} \cdot s^{-1}$]	$-3,68 \cdot 10^{-6}$
E_2^d [V]	$-1,22 \cdot 10^{-10}$
E_3^d [$V \cdot W^{-1}$]	$1,99 \cdot 10^{-5}$
RMSE [V]	0,1534



3.2.3. Modelo exponencial completo

En este apartado se expone el modelo más completo realizado para la descarga. Como se muestra en la Figura 6 el ajuste obtenido con este modelo es ya muy próximo a la curva real para todo ϕ y para todas las intensidades consideradas.

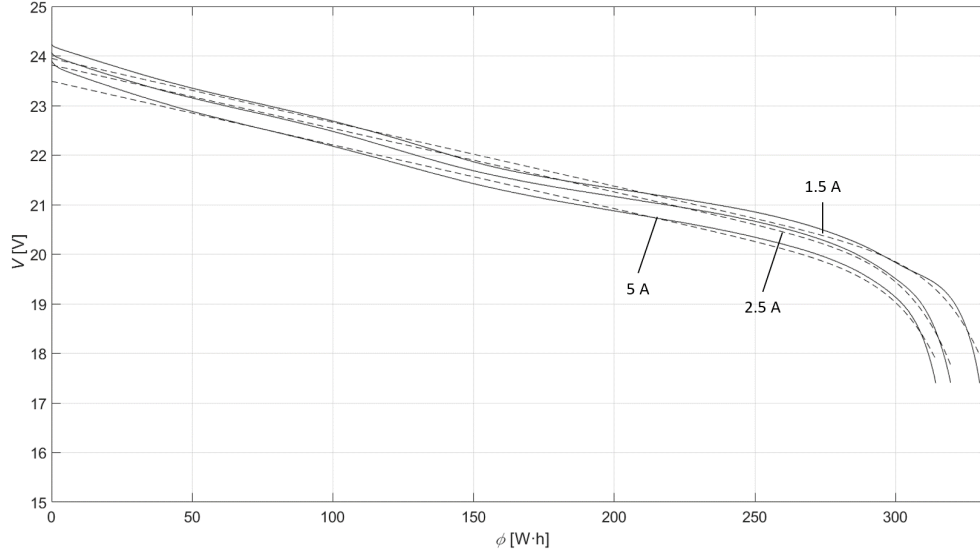


Figura 6: Modelización del comportamiento de la batería en el caso de descarga empleando el modelo exponencial completo. En la figura se muestran los resultados experimentales como líneas continuas, y los resultados obtenidos con el modelo con líneas discontinuas. Cada una de las curvas, tanto experimentales como la del modelo, corresponden a una corriente de descarga específica.

En la Tabla 7 se muestran los 8 coeficientes que determinan el ajuste de la curva, así como el RMSE que es ya un 30 % inferior que el que proporciona la primera iteración del modelo exponencial de descarga y un 58,6 % respecto al modelo lineal de descarga.

Tabla 7: Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando el modelo exponencial completo de descarga 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

3.3. Modelización del comportamiento estático de la batería en carga

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el ajuste de las curvas V - ϕ de carga, empleando la metodología descrita en la sección 2.3.

3.3.1. Modelo lineal

Los resultados de la primera iteración, se presentan en la Figura 7, donde cada una de las curvas, tanto las 3 experimentales como las 3 del modelo, corresponden a una corriente de descarga específica. Este modelo presenta

una buena aproximación a la parte lineal de la curva $V - \phi$, pero no es capaz, por razones obvias, de ajustar la parte exponencial.

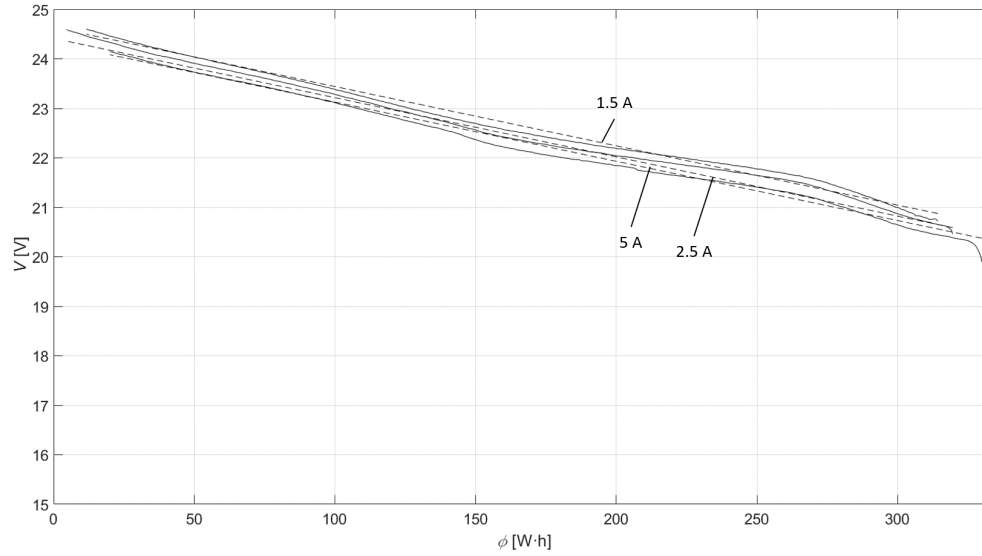


Figura 7: Modelización del comportamiento de la batería en el caso de carga empleando el modelo lineal. En la figura se muestran los resultados experimentales como líneas continuas, y los resultados obtenidos con el modelo con líneas discontinuas. Cada una de las curvas, tanto experimentales como la del modelo, corresponden a una corriente de carga específica.

En la Tabla 8 se presentan los 3 coeficientes que componen el modelo lineal de carga, así como el RMSE. En este caso el error del modelo lineal de carga es un 59 % inferior al que se obtiene con el modelo lineal de descarga. Esto es debido a que la curva presenta un comportamiento lineal en casi su totalidad, a excepción del tramo final, como se puede observar en la Figura 8.

Tabla 8: Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando un modelo lineal de carga para la determinación del voltaje interno.

Modelo lineal	
Coeficiente	Valor final
R_c [Ω]	0,0891
E_0^c [V]	24,189
E_1^c [$V \cdot W^{-1} \cdot s^{-1}$]	$-3,32 \cdot 10^{-6}$
RMSE [V]	0,1052



3.3.2. Modelo exponencial

Finalmente, se añade un nivel de complejidad más al modelo, empleando la ecuación 14 de modo que el modelo tenga en cuenta la parte exponencial final de la curva de carga. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8.

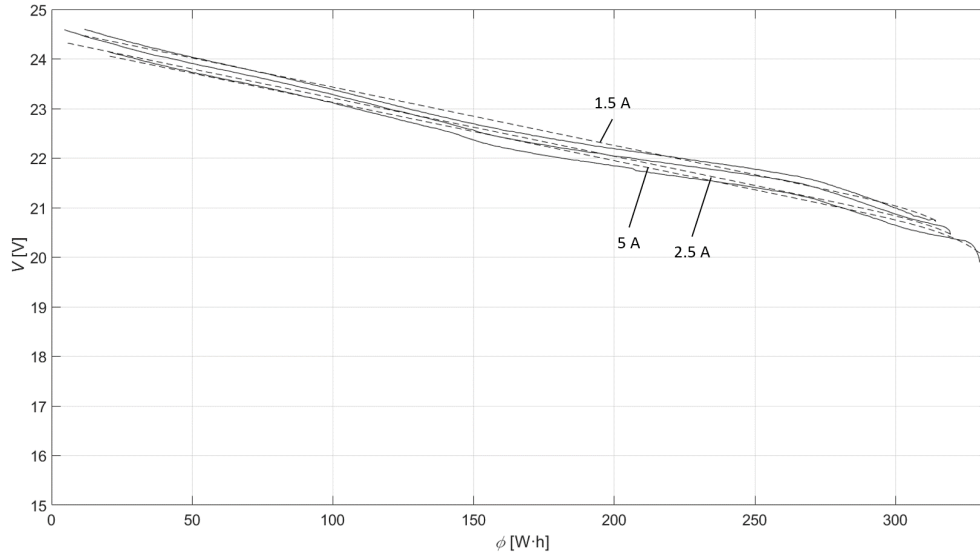


Figura 8: Modelización del comportamiento de la batería en el caso de carga empleando el modelo exponencial completo. En la figura se muestran los resultados experimentales como líneas continuas, y los resultados obtenidos con el modelo con líneas discontinuas. Cada una de las curvas, tanto experimentales como la del modelo, corresponden a una corriente de carga específica.

En la Tabla 9 se muestran los 6 coeficientes que componen el modelo exponencial de carga, así como el RMSE del modelo. Se puede apreciar como la mejora respecto al modelo lineal de carga es de solo un 6,6 %, por lo que en este caso sería factible emplear el modelo lineal de carga con el fin de ahorrar esfuerzo computacional y sus costes asociados.

Tabla 9: Coeficientes del modelo de circuito equivalente empleando un modelo exponencial de carga para la determinación del voltaje interno.

Modelo exponencial	
Coeficiente	Valor final
$R_c [\Omega]$	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

los signos negativos
así también son
fuerza largo

4. Conclusiones

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

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con los distintos modelos empleados, se considera que en todos los casos se ha logrado obtener unas modelizaciones suficientemente precisas, obteniendo ajustes con errores del orden del 0,4 % del potencial máximo de la batería para los ajustes más complejos y del 1 % en los ajustes lineales de descarga, mientras que en el caso de la carga el error apenas varía. Teniendo en cuenta esto y los niveles de descar-

ga a los que una batería de este tipo suele ser sometida, se podría emplear el modelo lineal tanto para la descarga como para la carga en aplicaciones que no requieran una gran precisión. De este modo, en esas circunstancias de descargas poco profundas se podría obtener un ahorro de esfuerzo computacional importante respecto a la simulación de los modelos complejos.

Todas estas modelizaciones 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] Proceso de carga-descarga de una batería de iones de Litio.
URL <https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2019/11/28/proceso-de-carga-descarga-de-una-bateria-de-iones-de-litio/>
- [2] A. Porras-Hermoso, S. Pindado, J. Cubas, Lithium-ion battery performance modeling based on the energy discharge level, *Measurement Science and Technology* 29 (2018).
- [3] D. M. Caballero, R. L. López, J. V. Mateos, P. Z. Montaña, Modelización de las curvas características de dispositivos fotovoltaicos de uso espacial. modelo de circuito equivalente (2021).
- [4] C. A. Hill, Satellite battery technology - A tutorial and overview, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 26 (2011) 38–43.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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).
- [8] 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.
- [9] Technical datasheet of Li-ion battery, Samsung (2019).