



UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID

---

# MODELO ESTÁTICO DE UNA BATERÍA

TRABAJO 5

GENERACIÓN Y GESTIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA

---

*Autores:* David Estébanez Mérida  
Andrés Pedraza Rodríguez  
María Elena Piqueras Carreño  
Daniel del Río Velilla  
Ana Isabel Soria Carro

*Profesor:* Santiago Pindado Carrión

MADRID, 18 DE ABRIL, 2021



## **Resumen**

El objetivo del presente trabajo es analizar la arquitectura de una batería espacial. Para ello se dispone de datos experimentales de distintas cargas y descargas y contrasta éstos con la información proporcionada por el fabricante. Además, en función de estos datos se modelizará el comportamiento estático de la batería de acuerdo a varios modelos cada vez más complejos.



# Índice

Índice de figuras	I
Índice de tablas	II
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Metodología</b>	<b>1</b>
<b>3. Resultados</b>	<b>2</b>
3.1. Caracterización de la batería . . . . .	2
3.2. Comportamiento estático de la batería . . . . .	2
3.2.1. Estimación de resistencias . . . . .	4
3.2.2. Modelo lineal . . . . .	5
3.2.3. Modelo exponencial . . . . .	5
3.2.4. Modelo lineal-exponencial . . . . .	6
3.2.5. Modelo con resistencias dependientes de la intensidad de corriente . . . . .	6
<b>4. Conclusiones</b>	<b>8</b>
<b>Referencias</b>	<b>9</b>

## Índice de figuras

1.	Modelos de circuito equivalente para descarga (izquierda) y para carga (derecha). . . .	3
2.	Modelo de circuito equivalente tanto para carga como para descarga. . . . .	3

## Índice de tablas

1. Gradientes de temperatura de la célula solar AzurSpace 3G28C [1]. Las siglas BOL (Beginning of Life) hacen referencia a los valores al inicio de la vida útil. . . . . 2

## 1. Introducción

Cuando un vehículo espacial está en órbita suele ser muy común que haya periodos de tiempo durante los cuales la potencia generada por los paneles sea insuficiente para realizar las operaciones necesarias o sea nula porque se encuentre el artefacto eclipsado por otro cuerpo. Es por ello que se incluyen baterías para poder almacenar la energía sobrante de los paneles en los periodos en los que hay más irradiancia o menos demanda de potencia y para poder liberar paulatinamente esta energía en los periodos en los que no hay irradiancia o se precisa más potencia.

En este trabajo se distinguen dos partes en las que se propone lo siguiente:

- Aplicando la ley de Peukert obtener el número de celdas (serie y paralelo) que conforman la batería.
- Modelizar el comportamiento estático de la batería.

## 2. Metodología

Este trabajo se ha desarrollado empleando fundamentalmente la herramienta de software MATLAB. Con ella se han realizado los cálculos y las representaciones gráficas pertinentes.

Los métodos para la caracterización de la batería se han obtenido de la documentación proporcionada por el profesor D. Santiago Pindado a través de la plataforma Moodle de la asignatura.

Se dispone de datos experimentales que contienen los valores de tiempo, intensidad de corriente y voltaje para una batería formada por celdas Samsung INR18650-29E [2] a lo largo de distintas cargas y descargas y también se dispone del *datasheet* de las propias celdas facilitado por el fabricante. Gracias a esta información se puede determinar el número de celdas en serie y en paralelo haciendo uso de la ley de Peukert.

A la hora de caracterizar el comportamiento estático de la batería se proponen una serie de modelos cada vez más complejos basados en un circuito equivalente cuyos elementos generadores de tensión ideales tienen un comportamiento dependiente de la energía remanente en la batería y cuyos elementos resistivos tienen (en el modelo más complejo) un comportamiento dependiente de la intensidad de corriente. Las expresiones de dichos comportamientos se aproximarán cada vez más con funciones más complejas (*id est* con un mayor número de parámetros a determinar)



### 3. Resultados

#### 3.1. Caracterización de la batería

El primer objetivo es determinar el número de células, tanto en serie como en paralelo, que conforman la batería de la cual se tienen valores experimentales de tiempo, voltaje e intensidad. En la Tabla 1 se dispone de los parámetros que caracterizan la batería según la información proporcionada por el fabricante — cite datasheet —.

Tabla 1: Gradientes de temperatura de la célula solar AzurSpace 3G28C [1]. Las siglas BOL (Begining of Life) hacen referencia a los valores al inicio de la vida útil.

Gradientes de temperatura	BOL	Unidades
$\alpha_{V_{oc}} = \Delta V_{oc} / \Delta T$	−6,00	mV/°C
$\alpha_{I_{sc}} = \Delta I_{sc} / \Delta T$	0,32	mA/°C
$\alpha_{V_{mp}} = \Delta V_{mp} / \Delta T$	−6,10	mV/°C
$\alpha_{I_{mp}} = \Delta I_{mp} / \Delta T$	0,28	mA/°C

De los datos experimentales se han extraído los valores que aparecen en la Tabla —ref— y en las Figuras —ref— y —ref— se representan conjuntamente las curvas de carga y descarga respectivamente

— Tabla con cosas para la Ley de Peukert —

— Figuras de carga y descarga —

Haciendo uso de la Ley de Peukert

#### 3.2. Comportamiento estático de la batería

A la hora de caracterizar el comportamiento de un elemento electrónico reviste de utilidad la caracterización mediante un circuito equivalente, es decir, una disposición tal de elementos electrónicos básicos que se comporte de forma suficientemente similar al componente real. En la Figura 1 se muestran dos esquemas eléctricos independientes, uno para carga y otro para descarga en los cuales se ha representado la diferencia de potencial ideal de la pila mediante el generador  $E$  y se ha añadido una resistencia  $R$  en serie para caracterizar las pérdidas por efecto Joule y fruto del paso de la corriente eléctrica por el dispositivo; los superíndices o subíndices  $c$  y  $d$  hacen referencia al proceso de carga y de descarga respectivamente; y por último, la intensidad  $I$  y el voltaje  $V$  son los que experimentaría una carga conectada a la batería.

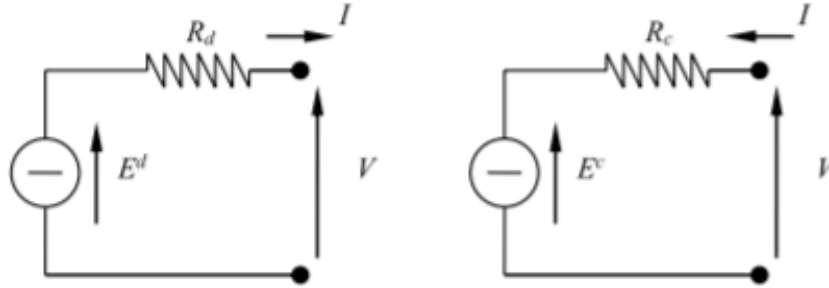


Figura 1: Modelos de circuito equivalente para descarga (izquierda) y para carga (derecha).

Además se pueden combinar ambos esquemas en uno solo que valga tanto para carga como para descarga. Para independizar ambos caminos se recurre a dos diodos (en principio ideales) que al solo permitir el paso de corriente en una dirección distinguen los dos comportamientos de la batería pues esta no se comporta igual en carga que en descarga. En la Figura 2 se representa el esquema eléctrico correspondiente.

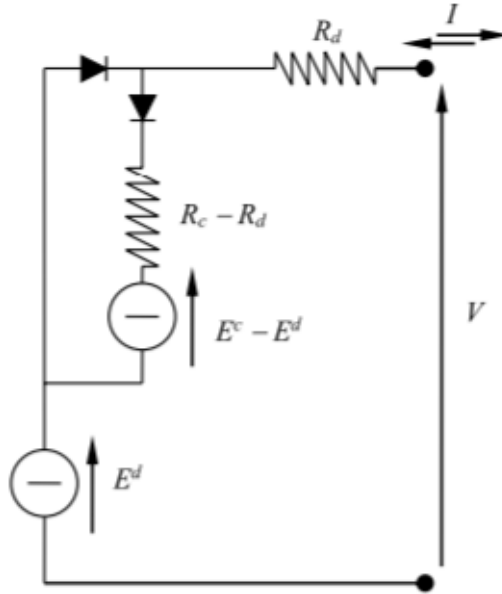


Figura 2: Modelo de circuito equivalente tanto para carga como para descarga.

De esta forma, en el proceso de carga o descarga se tiene:

$$V(\phi, I) = E^d - R_d I, \quad (1)$$

$$V(\phi, I) = E^c + R_c I, \quad (2)$$

donde

$$E^d = f(\phi; E_0^d, E_1^d, E_2^d \dots) , \quad (3)$$

$$E^c = g(\phi; E_0^c, E_1^c, E_2^c \dots) , \quad (4)$$

con  $E_i$  como coeficientes de las expresiones matemáticas y donde  $\phi$  hace referencia a la energía descargada de la batería.

$$\phi = \phi_0 + \int_{t_0}^t E^d I \, dt = \phi_0 + \int_{t_0}^t (VI + R_d I^2) \, dt , \quad (5)$$

$$\phi = \phi_0 - \int_{t_0}^t E^c I \, dt = \phi_0 - \int_{t_0}^t (VI - R_c I^2) \, dt , \quad (6)$$

Para un tratamiento matemático más sencillo se emplea la expresión:

$$V(\phi, I) = E + RI , \quad (7)$$

de forma que la intensidad se define positiva cuando entra en la batería (carga) lo cual permite expresar el modelo de carga y de descarga mediante la misma expresión.

### 3.2.1. Estimación de resistencias

Para obtener un valor inicial de resistencia que poder emplear como iterante inicial se recurre a las curvas de carga y descarga y se hacen la siguientes aproximaciones:

- Que para un mismo valor de  $It$  la energía descargada es la misma.
- Que para un mismo valor de energía descargada  $\phi$  la diferencia de potencial ideal de la batería  $E$  es igual lo cual es posible ya que las curvas de carga y descarga coalescen en su parte lineal cuando se expresan en términos de  $\phi$ .

— Esto de las aproximaciones no sé si está bien —

Por lo que las resistencias pueden determinarse seleccionando una serie de valores de  $It$  y comparando el valor del voltaje  $V_i$  en función de la curva de descarga a intensidad constante  $I_i$ , esta aproximación se hace con las tres curvas disponibles de forma que:

$$R = \frac{V_3 - V_2}{I_2 - I_3} - \frac{V_2 - V_1}{I_1 - I_2}, \quad (8)$$

y luego se hace la media de los distintos valores de  $R$  estimados para los distintos puntos de  $It$ .

### 3.2.2. Modelo lineal

Para una primera aproximación se propone un modelo de la forma:

$$V = (E_0 + E_1\phi) + RI, \quad (9)$$

donde  $E_0$ ,  $E_1$  y  $R$  son los parámetros del modelo que se han de ajustar con los datos experimentales  $V$ ,  $I$  y  $t$ . El que la resistencia sea un parámetro a determinar imposibilita el cálculo directo de  $\phi$  a partir del voltaje, el tiempo y la intensidad de corriente por lo que se recurre dividirlo en dos partes:

$$\phi_1 = \phi_0 \int_0^t VI dt, \quad (10)$$

$$\phi_2 = \int_0^t I^2 dt, \quad (11)$$

$$(12)$$

de forma que  $\phi_1$  y  $\phi_2$  pueden determinarse a partir de los datos experimentales (nótese que  $\phi_2$  no hace referencia a una energía). El modelo por tanto queda escrito en términos de estos valores calculados:

$$V = (E_0 + E_1(\phi_1 + \phi_2 R)) + RI, \quad (13)$$

Los resultados obtenidos con este modelo se recogen en la Figura —ref— para las curvas de descarga y en la Figura —ref— para las curvas de carga en las cuales se ha estimado que la energía remanente en la carga al inicio del proceso es la máxima descargada (???)

Los parámetros del ajuste para esta batería son los que se recogen en la Tabla —ref—

— Tabla con parámetros —

### 3.2.3. Modelo exponencial

Para una segunda aproximación se propone un modelo de la forma:

$$V = (E_0 + E_1(\phi_1 + R\phi_2) + E_2 \exp(E_3(\phi_1 + R\phi_2))) + RI, \quad (14)$$

donde los coeficientes  $E_i$  y  $R$  son los parámetros del modelo que se han de ajustar con los datos experimentales  $V$ ,  $I$  y con  $\phi_1$  y  $\phi_2$  anteriormente calculados. En este caso se usan como iterantes iniciales los parámetros obtenidos del modelo anterior (véase Tabla —ref—).

Los resultados obtenidos con este modelo se recogen en la Figura —ref— para las curvas de descarga y en la Figura —ref— para las curvas de carga en las cuales se ha estimado que la energía remanente en la carga al inicio del proceso es la máxima descargada (???)

Los parámetros del ajuste para esta batería son los que se recogen en la Tabla —ref—

— Tabla con parámetros —

### 3.2.4. Modelo lineal-exponencial

Para una tercera aproximación se propone un modelo de la forma:

$$V = (E_0 + E_1(\phi_1 + R\phi_2) + (E_{2,0} + E_{2,1}I + E_{2,2}I^2) \exp[(E_{3,0} + E_{3,1}I)(\phi_1 + R\phi_2)]) + RI, \quad (15)$$

donde los coeficientes  $E_i$  y  $R$  son los parámetros del modelo que se han de ajustar con los datos experimentales  $V$ ,  $I$  y con  $\phi_1$  y  $\phi_2$  anteriormente calculados. En este caso se usan como iterantes iniciales los parámetros obtenidos del modelo anterior (véase Tabla —ref—).

Los resultados obtenidos con este modelo se recogen en la Figura —ref— para las curvas de descarga y en la Figura —ref— para las curvas de carga en las cuales se ha estimado que la energía remanente en la carga al inicio del proceso es la máxima descargada (???)

Los parámetros del ajuste para esta batería son los que se recogen en la Tabla —ref—

— Tabla con parámetros —

### 3.2.5. Modelo con resistencias dependientes de la intensidad de corriente

Para una cuarta y última aproximación se propone un modelo en el cual las resistencias dependen de la corriente, es decir que las pérdidas de potencia ahora tienen un comportamiento dependiente de la intensidad. En este caso se ha propuesto un modelo lineal para las resistencias que si se combina

con el anterior —ref— conduce a una expresión de la forma:

$$V = (E_0 + E_1(\phi_1 + (R_0 + R_1 I)\phi_2) + (E_{2,0} + E_{2,1}I + E_{2,2}I^2) \exp[(E_{3,0} + E_{3,1}I)(\phi_1 + (R_0 + R_1 I)\phi_2)]) + (R_0 + R_1 I)I \quad , \quad (16)$$

donde los coeficientes  $E_i$  y  $R_i$  son los parámetros del modelo que se han de ajustar con los datos experimentales  $V$ ,  $I$  y con  $\phi_1$  y  $\phi_2$  anteriormente calculados. En este caso se usan como iterantes iniciales los parámetros obtenidos del modelo anterior (véase Tabla —ref—).

Los resultados obtenidos con este modelo se recogen en la Figura —ref— para las curvas de descarga y en la Figura —ref— para las curvas de carga en las cuales se ha estimado que la energía remanente en la carga al inicio del proceso es la máxima descargada (???)

Los parámetros del ajuste para esta batería son los que se recogen en la Tabla —ref—

— Tabla con parámetros —

## 4. Conclusiones

Del trabajo realizado se extraen las siguientes conclusiones:

- 

En posteriores trabajos habrá de incluirse

## Referencias

- [1] AzurSpace, 28 % Triple Junction GaAs Solar Cell.
- [2] H. Kang, M. Rim, Samsung INR18650-29E Lithium-ion rechargeable cell. Specifications of product (Version 1.1) (2012) 1–18.