

CIRCUITO EQUIVALENTE DE THÉVENIN PARA EL MODELADO DE LA BATERÍA DE LITIO

THEVENIN'S EQUIVALENT CIRCUIT FOR LITHIUM BATTERY MODELING

Alma Delia Aguilar Hernández

Universidad Autónoma Metropolitana, México
al214200095@azc.uam.mx

Felipe de Jesús González Montañez

Universidad Autónoma Metropolitana, México
fjgm@azc.uam.mx

Víctor Manuel Jiménez Mondragón

Universidad Autónoma Metropolitana, México
vmjm@azc.uam.mx

Eduardo Campero Littlewood

Universidad Autónoma Metropolitana, México
ecl@azc.uam.mx

Recepción: 11/noviembre/2021

Aceptación: 24/febrero/2022

Resumen

En este trabajo se presenta el modelado del circuito equivalente de Thévenin. Además, se presenta una introducción a los tipos de baterías más comunes y sus características en términos de eficiencia.

Se describen los modelos que representan el comportamiento de las baterías de litio a través de modelos de estimación, modelos empíricos y modelos de circuitos equivalentes. El modelo del circuito equivalente de Thévenin se realiza con ayuda del paquete de simulación Matlab/Simulink® donde se modela el comportamiento de la batería de litio y la dinámica presente en los parámetros de temperatura, estado de carga y voltaje en terminales por medio de diferentes escenarios de carga y descarga de corriente.

Palabras Clave: Batería de litio, circuito equivalente de Thévenin, estado de carga, Matlab/Simulink®, modelado.

Abstract

This paper presents the modeling of Thevenin equivalent circuit. In addition, an introduction to the most common types of batteries and their characteristics in terms of efficiency is presented. Models representing the behavior of lithium batteries are described through estimation models, empirical models, and equivalent circuit models. The model of the Thevenin equivalent circuit is carried out with the help of the Matlab/Simulink® simulation package where the behavior of the lithium battery and the dynamics present in temperature parameters, state of charge and voltage in terminals are modeled by means of different scenarios of charge and discharge of current.

Keywords: *Equivalent circuit, lithium battery, Matlab/Simulink®, modelling, state of charge.*

1. Introducción

Hoy en día la tecnología se encuentra presente en todos los ámbitos de la vida, forma parte de nuestras actividades cotidianas y es fundamental en el desarrollo económico de cada país. Actualmente es difícil imaginar algún dispositivo tecnológico que no requiera de energía eléctrica. Algunos dispositivos como los celulares, computadoras, relojes, luminarias, vehículos, etc., requieren de un sistema de almacenamiento de energía que sea capaz de satisfacer las necesidades requeridas sin estar conectados a la red eléctrica.

Los sistemas capaces de almacenar energía eléctrica en forma de energía química se denominan celdas electroquímicas. Se componen principalmente de dos electrodos, en la mayoría de los casos son de compuestos metálicos introducidos en una disolución conductora o electrolito. La diferencia fundamental entre una batería y una pila radica en su proceso de descarga, el cual puede ser reversible o no reversible [Fonseca, 2011]. En el primer caso, la batería puede experimentar un proceso reversible que le permite ser recargada. Caso contrario, la pila experimenta un proceso no reversible lo que significa que puede no ser recargada. Es común el término de celda en los sistemas de almacenamiento, mientras que a un conjunto de celdas electroquímicas se les denomina baterías. Un ejemplo del uso de las

baterías como dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica es la aplicación en cualquier tipo de vehículo tal como lo son los convencionales, los eléctricos y los híbridos, donde resulta primordial su desempeño y funcionamiento. En el modelado de las baterías existen parámetros que son relevantes para su modelo, el estado de carga de la batería es uno de los aspectos más importantes que se tiene que cuidar, esto debido a que es una medida de la cantidad de energía eléctrica almacenada en la batería.

Existen diferentes tipos de composición química utilizadas en las baterías. Algunas de ellas son aplicadas a usos de iluminación de emergencia, aparatos portátiles, arranque de aviones o fuentes de alimentación de emergencia. Cada una de estas composiciones químicas presenta ventajas y desventajas respecto de las otras. Dentro de las baterías que destacan son las de [Manzetti, 2015] Plomo ácido (Pb-ácido), siendo estas las más antiguas y cuya principal desventaja es la presencia de plomo para su construcción. Además, tienen una baja relación entre la energía almacenada y su peso, así como la energía almacenada y su volumen, por lo que se utilizan en aplicaciones automotrices. Las baterías de Pb-ácido son una solución barata, pero aplicable como banco de almacenamiento en los sistemas fotovoltaicos [Glavin, 2008]. Las baterías Níquel- Cadmio (NiCd) presentan mayor vida útil expresado mediante el número de ciclos de carga y descarga. La desventaja de esta batería al igual que las de plomo ácido es el uso de un metal pesado como el Cadmio para su construcción (con consecuencias de efecto nocivo para el medio ambiente). Las baterías de Níquel-Metal-Hidruro (NiMH) son semejantes a las NiCd y tienen como ventaja, respecto a las anteriores, la ausencia del efecto memoria, que afecta en la capacidad de carga de la batería. Una de las desventajas presentes es que tienen una menor capacidad de almacenamiento de energía comparadas con las de Ion-litio. Las baterías de Ion-litio (Li-ion) se caracterizan por tener una gran capacidad de almacenamiento de energía, así como tener un ciclo limitado de vida. Existen además baterías de polímero de ion-litio, las cuales proporcionan un ciclo de vida mayor que el de las baterías normales de Li-ion, pero presentan una mayor inestabilidad en casos como sobrecarga. Las baterías de Cloruro de sodio y níquel (NaNiCl) presentan una alta densidad de energía almacenada pero poca

seguridad de funcionamiento. En la tabla 1 se muestran las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de baterías utilizadas, tomando como ejemplo de uso los vehículos eléctricos e híbridos [Habib, 2019]. En la tabla 2 se observan algunas de las características específicas de los diferentes tipos de baterías [Habib, 2019], de las cuales se ha hecho mención anteriormente.

Tabla 1 Características de los diferentes tipos de baterías [Habib, 2019].

Tipo de batería	Ventajas	Desventajas
Pb- ácido	Alto voltaje por celda, bajo costo, buen rendimiento.	Voluminosas, baja densidad energética.
NiCd	Larga vida útil, recarga rápida	Alto costo, problemas de recuperación, efecto nocivo al medio ambiente.
NiMH	Ausencia de memoria, largo ciclo de vida	Menor capacidad de almacenamiento.
Li-ion	Alta capacidad de almacenamiento, larga vida útil, bajo costo de mantenimiento, baja auto descarga, alta eficiencia	Baja tolerancia a los ciclos de descarga.

Tabla 2 Características específicas en los diferentes tipos de baterías [Habib, 2019].

Tipo de batería	Energía específica (Wh/kg)	Densidad energética (Wh/L)	Densidad de potencia (W/kg)	Eficiencia energética (%)	Ciclo de vida (80% a la profundidad de descarga)
VLRA	30-50	60-100	200-400	70-90	2000-4500
Ni-Cd	40-50	80-100	150-350	60-70	2000-3000
Ni-MH	50-70	100-140	150-300	50-80	500-3000
Li-Al-FeS2	130	220	240	80	1000<
Li-polímero	155	200-250	315	70	1200<

De acuerdo con [Huria, 2012], el método de modelado de las baterías debe ser preciso, ya que las baterías tienen una función principal en la electrificación del tren motriz, de los vehículos eléctricos, y en todos los casos del uso de las baterías en dispositivos de tracción. Así como considerar dentro del modelado de batería los efectos térmicos debido a que son muy importantes en la vida útil de las baterías. Otro aspecto por considerar es la gestión de energía en la cual se contemple información acerca de la batería como el estado de carga SOC (por sus siglas en inglés) que permita conocer el estado de carga y descarga de la batería. Así mismo el modelo de la batería debe considerar parámetros de voltaje, corriente y

temperatura. Existen diferentes métodos de modelado para las baterías que se distinguen por la naturaleza de su complejidad, así como aquellos que dependen del SOC, modelos empíricos y modelos matemáticos, entre otros [He, 2011].

En este trabajo se presenta un estudio sobre los diferentes tipos de métodos de modelado para las baterías de Ion-litio (Li-ion). Se realiza un análisis del modelo con circuitos equivalentes y el desempeño que presentan con parámetros de temperatura y SOC. Al final, se presenta una simulación práctica para conocer la dinámica de una batería bajo diferentes condiciones de carga y descarga.

2. Métodos

Modelo de la batería basado en la estimación del SOC

Este modelo se basa principalmente en el modelo de una batería y un algoritmo de estimación [Meng, 2018], [Zhang, 2018]. La figura 1 muestra la estructura del modelo de estimación de SOC considerando esencialmente el modelo de la batería y un algoritmo de estimación. El modelo de una batería predice la tensión en terminales y la corriente. La temperatura y el SOC son entradas habituales [Meng, 2018]. Se espera que el modelo de batería sea lo más aproximado a la realidad. Existen diferentes tipos de métodos y modelos de las baterías.

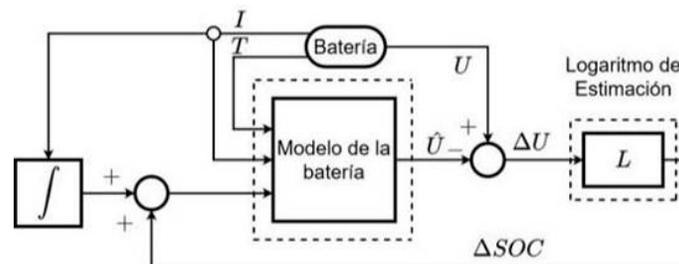


Figura 1 Método de estimación del SOC.

Modelos empíricos

En los modelos empíricos, la representación de la tensión de terminales de la batería se expresa mediante funciones matemáticas que dependen del SOC y la corriente [Meng, 2018]. De acuerdo con la literatura [Meng, 2018], [Hussein, 2011] citan que algunos de los diferentes tipos de modelos empíricos a tomar en cuenta

son: 1. Modelo de Sherpherd, 2. Modelo de Unnerwehr, y 3. Modelo Nerst. De acuerdo con [Meng, 2018] es posible mejorar la precisión de estos sistemas empíricos añadiendo parámetros a sus sistemas.

Modelo de circuito equivalente

Los modelos de circuito equivalente ECM (por sus siglas en inglés), son modelos que son capaces de describir la relación entre los elementos que lo conforman. Estos modelos de circuito equivalente consisten principalmente en una resistencia interna y una rama RC. Los componentes que integran estos modelos relacionan los parámetros de corriente, SOC y temperatura. Dentro de los modelos de circuito equivalente, de acuerdo con la literatura [Meng, 2018] [Shamsi, 2016] [Zhang, 2018], los más comunes son:

- Modelo R_{in} .
- Modelo RC.
- Modelo de Thevenin.
- Modelo PNGV.

En la figura 2 se muestra el diagrama esquemático del modelo R_{in} , este modelo permite observar que la batería es equivalente a una fuente de tensión ideal en serie con una resistencia.

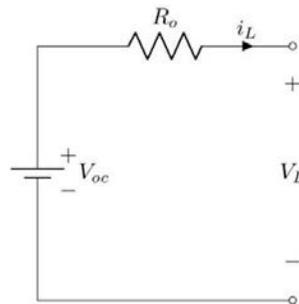


Figura 2 Circuito del modelo R_{in} .

El voltaje V_{oc} es la fuente que define el potencial de circuito abierto de la batería [Fotouhi, 2016]. La resistencia R_o y el voltaje V_{oc} son funciones que dependen del

estado de carga. La ecuación 1 modela el comportamiento del modelo R_{in} [Meng, 2018], [Zhang, 2018].

$$V_L = V_{oc} - I_L R_o \quad (1)$$

Dónde:

R_o : Resistencia interna [Ω].

V_{oc} : Voltaje ideal [Volts].

V_L : Voltaje de carga [Volts].

El modelo RC que se muestra en la figura 3 fue diseñado por SAFT Battery Company [He, 2011]. Este modelo consta de dos condensadores C_c y C_b respectivamente; así como de tres resistencias R_T , R_e , R_c .

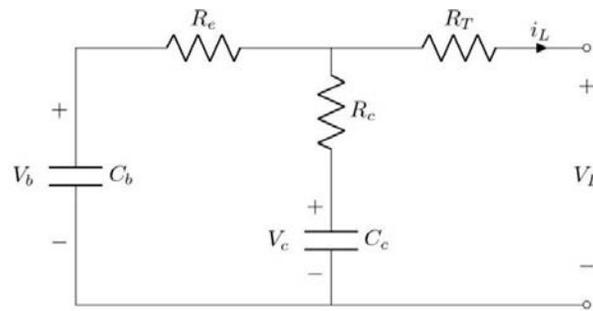


Figura 3 Circuito del modelo RC.

El capacitor C_c se denomina capacitor de superficie, mientras que el capacitor C_b se le denomina capacitor masivo. V_c y V_b corresponden a los voltajes en los capacitores C_c y C_b . Las resistencias R_T , R_e y R_c representan la resistencia en terminal, resistencia final y resistencia del condensador respectivamente. Las ecuaciones 2 y 3 describen el comportamiento eléctrico del circuito [Meng, 2018], [Zhang, 2018].

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b(R_e + R_c)} & \frac{1}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{1}{C_c(R_e + R_c)} & \frac{-1}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{-R_e}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} [I_L] \quad (2)$$

$$[V_L] = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{(R_e + R_c)} & \frac{R_e}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_c \end{bmatrix} + \left[-R_T - \frac{R_e R_c}{(R_e + R_c)} \right] [I_L] \quad (3)$$

Dónde:

- C_b : Capacitor de masivo [F].
- C_c : Capacitor de superficie [F].
- R_T : Resistencia terminal [Ω].
- R_e : Resistencia final [Ω].
- R_c : Resistencia del condensador [Ω].
- V_b : Voltaje en el capacitor C_b [Volts].
- V_c : Voltaje en el capacitor C_c [Volts].
- V_L : Voltaje de carga [Volts].

El modelo de Thévenin se basa en el modelo R_{in} adicionando una rama RC , tal como se observa en el diagrama esquemático de la figura 4. El diagrama se compone de una fuente de voltaje V_{oc} que describe el potencial de circuito abierto de la batería, resistencias y capacitancias equivalentes.

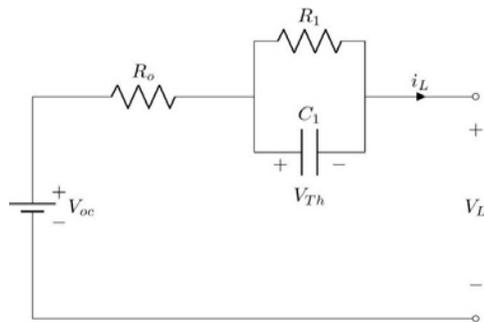


Figura 4 Circuito del modelo Thévenin.

Las resistencias internas incluyen la resistencia R_o y la resistencia que describe la polarización R_1 . La capacitancia equivalente C_1 es utilizada para describir la respuesta transitoria durante la carga y descarga de la batería [Feng, 2013]. Este modelo matemático se describe con las ecuaciones 4 y 5 [Meng, 2018], [Zhang, 2018].

$$\dot{V}_{Th} = -\frac{V_{Th}}{R_1 C_1} + \frac{I_L}{C_1} \quad (4)$$

$$V_L = V_{oc} - V_{Th} - I_L R_o \quad (5)$$

Dónde:

- C_1 : Capacitor de masivo [F].
- R_1 : Resistencia polarización [Ω].
- R_0 : Resistencia interna [Ω].
- V_{Th} : Voltaje en la rama RC [V].
- V_{oc} : Voltaje ideal [Volts].
- V_L : Voltaje de carga [Volts].

El modelo de circuito propuesto por los Estados Unidos en el Asociación para una nueva Generación de Vehículo PNGV (por sus siglas en inglés) [Feng, 2013], es similar al modelo equivalente de Thévenin con la excepción del capacitor en serie entre la resistencia interna y la rama RC [Li, 2017], [Lui, 2018], tal como se observa en la figura 5. Este capacitor en serie permite describir el comportamiento de cambio de voltaje a circuito abierto que se genera en el cambio de acumulación de corriente de descarga [He, 2011], [Meng, 2018]. Las ecuaciones 6 y 7 expresan el comportamiento para este modelo [Meng, 2018], [Zhang, 2018].

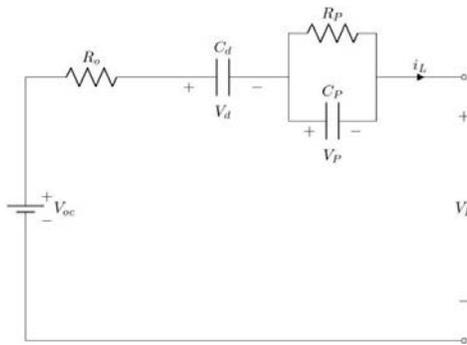


Figura 5 Circuito del modelo PNGV.

$$\dot{V}_{PN} = \frac{V_{PN}}{R_{PN} C_{PN}} + \frac{I_L}{C_{PN}} \quad (6)$$

$$V_L = V_{oc} - V_d - V_{PN} - I_L R_o \quad (7)$$

Dónde:

- C_d : Capacitor de masivo [F].
- C_p : Capacitor de masivo [F].

R_p : Resistencia polarización [Ω].

R_0 : Resistencia interna [Ω].

V_p : Voltaje en la rama RC [Volts].

V_{oc} : Voltaje ideal [Volts].

V_L : Voltaje de carga [Volts].

Como se observa se tienen diferentes circuitos de modelos equivalentes para caracterizar a las baterías de litio. Los modelos de circuitos equivalentes tratan de establecer la relación de los fenómenos electroquímicos dentro de las celdas y los elementos del circuito. Aunque los modelos de circuito equivalente presentados aquí no son los únicos. La literatura [He, 2011] [Meng, 2018] [Wan, 2019] establece que hay aún más modelos que se componen de la implementación de más componentes.

En este trabajo nos enfocamos en el modelo Thévenin de la figura 4. Aunque este modelo puede implementarse incluyendo más ramas RC al sistema, la inclusión de estos elementos al sistema resulta en un mayor esfuerzo computacional, y no garantizan una mayor precisión del modelo [Huria, 2012].

Los componentes de los modelos de circuito equivalentes al igual que los modelos de estimación de SOC y los modelos empíricos dependen del estado de carga y la temperatura interna. De acuerdo con esto la temperatura de la celda puede calcularse por medio de la ecuación de calor de la ecuación 8. Al aplicar la transformada de Laplace se obtiene la ecuación de calor como en la ecuación 9.

$$C_T \frac{dT}{dt} = -\frac{T - T_a}{R_T} + P_s \quad (8)$$

$$T(s) = \frac{P_s R_T + T_a}{1 + R_T C_T s} \quad (9)$$

Dónde:

C_T : Capacitancia de calor [$Jm^{-3}K^{-1}$].

P_s : Potencia disipada dentro de la celda [W].

R_T : Resistencia de convección [$W^1m^{-2}K^{-1}$].

T : Temperatura interna de la celada [$^{\circ}C$].

T_a : Temperatura ambiente [°C].

Para el estado de carga (SOC), se establece la siguiente relación, ecuación 10.

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C_Q} \quad (10)$$

Dónde:

C_Q : Capacidad de la celda [Ah].

Q_e : Carga extraída de la celda [Ah].

Se asume que la celda está completamente cargada en $t = 0$, la carga extraída, Q_e se define como, ecuación 11.

$$Q_e(t) = \int_0^t I_m(\tau) dt \quad (11)$$

Dónde:

I_m : Corriente en la rama principal [A].

Q_e : Carga extraída de la celda [Ah].

Para periodos cortos de tiempo la capacidad de celda en términos de la corriente y temperatura queda como en ecuación 12.

$$C_Q = C_Q(I, T) \quad (12)$$

Para el desarrollo de este trabajo se considera el circuito de modelo equivalente de la figura 4, que corresponde al modelo de Thévenin considerando únicamente una sola rama RC . Así como considerar que los elementos están en función del estado de carga y la temperatura. Debido a que estos parámetros no son valores fijos y cambian bajo las condiciones de funcionamiento. En [Fotohui, 2016], [Huria, 2012] consideran estos parámetros para los elementos que modelan al circuito de la figura 4, ecuaciones 13, 14, 15 y 16.

$$R_o = R_o(SOC, T) \quad (13)$$

$$R_1 = R_1(SOC, T) \quad (14)$$

$$C_1 = C_1(SOC, T) \quad (15)$$

$$V_{oc} = V_{oc}(SOC, T) \quad (16)$$

Claro ejemplo de que los parámetros antes mencionados resultan de importancia es la utilización de las baterías en la industria automotriz, los sistemas de respaldo de energía, dispositivos portátiles, etcétera, donde las características del estado de carga de las baterías se ven afectas por los parámetros de carga, temperatura, tiempo de carga, entre otros [Son, 2014].

3. Resultados

Se simuló el Circuito del modelo Thévenin de la figura 4. Se consideró una temperatura ambiente de 21.5 °C, y una corriente de descarga inicial de 28 A. Se propuso un perfil de carga y descarga en el cual a partir de los 300 s comienza la descarga de la batería hasta alcanzar los 28 A. Posteriormente hasta los 2100 segundos se carga y se mantiene fuera de servicio por 1500 segundos, donde comienza a sufrir una carga hasta 22 A por 360 segundos. A través de intervalos de 360 segundos la batería experimenta aproximadamente diez eventos de descarga que oscilan entre el 3.5% al 26% de la descarga total de 28 A. Tal como se observa en la quinta descarga la cual representa la mayor magnitud de descarga entre los 14000 -18000 segundos de la figura 6.

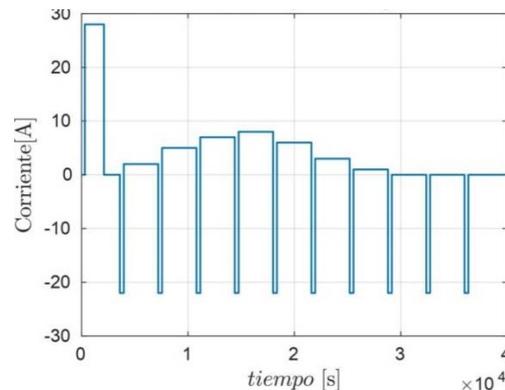


Figura 6 Corriente de carga y descarga de la batería de Litio.

La figura 7 muestra el voltaje en terminales, inicialmente el voltaje de la batería en terminales corresponde a 3.6 V. A partir de las descargas de la batería el voltaje de la batería aumenta y conforme la batería comienza a mantener su carga el voltaje comienza a disminuir.

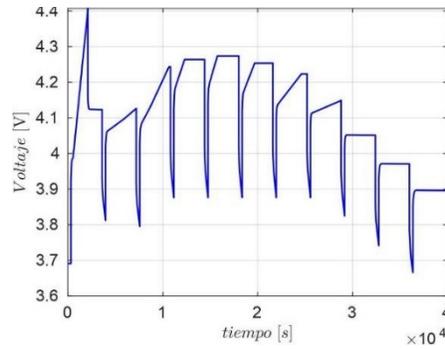


Figura 7 Voltaje en terminales de la batería de Litio.

Por otro lado, la figura 8 muestra el estado de carga de la batería, el cual presenta un estado de carga inicial de un 43% aproximadamente. Cuantos más procesos de descarga están presentes el estado de carga se encuentra cercano a valores de 1, posteriormente cuando no experimenta descarga la batería comienza a descender el valor de estado de carga de la batería casi de forma escalonada.

La figura 9 muestra la temperatura de la batería, la cual inicialmente está a 21.5 °C, posteriormente al primer evento de descarga la temperatura aumenta drásticamente. Para los demás periodos de descarga hay un incremento, pero ligeramente superior al valor de la temperatura inicial. Mientras que para los eventos sin descarga este valor de temperatura se mantiene.

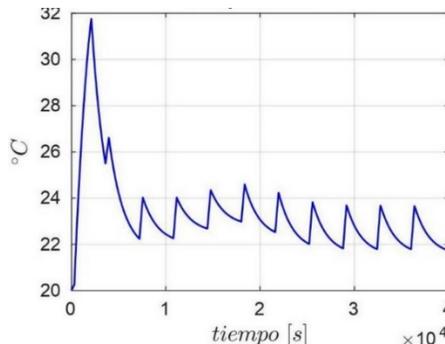
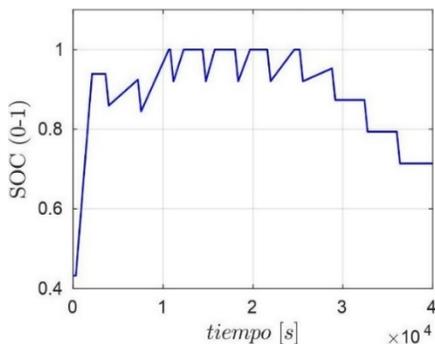


Figura 8 Estado de carga de la batería de Litio. Figura 9 Temperatura de la batería de Litio.

4. Discusión

Durante las simulaciones para diferentes escenarios de corriente de carga y descarga de la batería de ion de litio por medio del software Matlab/Simulink®, se

muestra que en la figura 7 se obtiene el voltaje en terminales que describe el comportamiento a circuito abierto. Se puede observar que para el primer escenario de descarga total hay un incremento de voltaje de 4.4 V. Posteriormente cuando el valor de corriente varía como se observa en la figura 6, se tiene que, para los valores de descarga inferiores al primer escenario de descarga, los valores de voltaje en terminales son inferiores a 4.4 V. Mientras que para los valores de carga constantes el valor de voltaje en terminales disminuye de forma gradual. Además, se observa en la figura 8 el estado de carga de la batería, el cual de manera inicial es superior a 0.4 que equivale al 40% del estado de carga, y para una descarga inicial el valor del estado de carga es cercano al 97%. Para los valores de corriente de descarga el estado de carga tuvo valores más cercanos al 100% caso contrario del primer escenario de descarga. Por otro lado, para los escenarios de corriente de carga el estado de descarga tiende a disminuir de manera escalonada. En la figura 9 se observa los valores de temperatura para los escenarios de carga y descarga, donde se muestra que la temperatura aumenta en un 46% del valor inicial que corresponde a la temperatura ambiente de 21.5 °C, mientras que para escenarios de descarga solo tiene un aumento superior al valor de la temperatura ambiente. Por otro lado, para los escenarios de carga la temperatura se mantiene constante.

5. Conclusiones

Este trabajo muestra los modelos para describir el comportamiento de las baterías de litio. Considerar los parámetros de temperatura y estado de carga en las baterías de litio permite al usuario considerar las capacidades que tiene la batería en cuanto al uso que desee emplear en ellas. A través de la evaluación de parámetros de carga y descarga se observó que la respuesta por parte de ellos son valores que cambian de acuerdo con su funcionamiento. La simulación por medio del software Matlab/Simulink® permitió observar dicho comportamiento, mediante el modelo de circuito equivalente de Thévenin con una rama RC , con la cual se captura la dinámica del sistema principalmente de la temperatura y el estado de carga. Para este trabajo solo se consideró como temperatura ambiente un valor constante, por lo que se considera plantear escenarios reales en un trabajo a futuro.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Feng, J., He, Y. L., & Wang, G. F., (2013). Comparison study of equivalent circuit model of Li-Ion battery for electrical vehicles. *Research Journal of Applied Sciences*, 6(20), pp. 3756-3759.
- [2] Fonseca, J., (2011). Celdas, pilas y baterías de Ion-Litio una alternativa para?. *Journal Boliviano de Ciencias*, 8(22), pp. 40-47.
- [3] Fotouhi, A., Auger, D. J., Propp, K., Longo, S., & Wild, M., (2016). A review on electric vehicle battery modelling: From Lithium-ion toward LithiumSulphur. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, pp. 1008-1021.
- [4] Glavin, M. E., Chan, P. K., Armstrong, S., & Hurley, W. G., (2008). A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system. In 2008 13th International power electronics and motion control conference (pp. 1688-1695). IEEE.
- [5] Habib, A. A., Motakabber, S. M. A., & Ibrahimy, M. I., (2019). A comparative study of electrochemical battery for electric vehicles applications. In 2019 IEEE International Conference on Power, Electrical, and Electronics and Industrial Applications (PEEIACON) (pp. 43-47). IEEE.
- [6] He, H., Xiong, R., & Fan, J., (2011). Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *energies*, 4(4), pp. 582-598.
- [7] Huria, T., Ceraolo, M., Gazzarri, J., & Jackey, R., (2012). High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells. In 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference (pp. 1-8). IEEE.
- [8] Hussein, A. A. H., & Batarseh, I., (2011). An overview of generic battery models. In 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting (pp. 1-6). IEEE.
- [9] Song, S. G., Li, X. P., & Sun, Z. C., (2014). Study on the Charging Characteristics of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Regenerative Braking. In *Advanced Materials Research* (Vol. 853, pp. 389-394). Trans Tech Publications Ltd.

- [10] Li, P., (2017). An improved PNGV modeling and SOC estimation for lithium iron phosphate batteries. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 94, No. 1, pp. 012012). IOP Publishing.
- [11] Liu, X., Li, W., & Zhou, A., (2018). PNGV equivalent circuit model and SOC estimation algorithm for lithium battery pack adopted in AGV vehicle. *IEEE Access*, 6, pp. 23639-23647.
- [12] Manzetti, S., & Mariasiu, F., (2015). Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, pp. 1004-1012.
- [13] Meng, J., Luo, G., Ricco, M., Swierczynski, M., Stroe, D. I., & Teodorescu, R., (2018). Overview of lithium-ion battery modeling methods for state-of-charge estimation in electrical vehicles. *Applied sciences*, 8(5), pp. 659.
- [14] Shamsi, M. H., (2016). Analysis of an electric Equivalent Circuit Model of a Li-Ion battery to develop algorithms for battery states estimation.
- [15] Wan, L., (2019). Improvement and simulation test of PNGV equivalent circuit model. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2066, No. 1, p. 020001). AIP Publishing LLC.
- [16] Zhang, R., Xia, B., Li, B., Cao, L., Lai, Y., Zheng, W., & Wang, W., (2018). State of the art of lithium-ion battery SOC estimation for electrical vehicles. *Energies*, 11 (7), pp.1820.