

MODELO TERMOELÉCTRICO DE UNA BATERÍA RECARGABLE EN MATLAB-SIMULINK

THERMOELECTRIC MODEL OF A RECHARGEABLE BATTERY IN MATLAB-SIMULINK

Noel Hernández Silva

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
m2003071@itcelaya.edu.mx

Juan José Martínez Nolasco

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
juan.martinez@itcelaya.edu.mx

Alejandro Israel Barranco Gutiérrez

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
israel.barranco@itcelaya.edu.mx

Alonso Alejandro Jiménez Garibay

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
alonso.jimenez@itcelaya.edu.mx

Nadia Renata Osornio Rubio

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
nadia.osornio@itcelaya.edu.mx

Recepción: 28/septiembre/2021

Aceptación: 30/noviembre/2021

Resumen

Este artículo presenta la implementación computacional del modelo termoeléctrico de una batería de iones de litio (Li-ion), así como los resultados obtenidos de este modelo bajo distintas condiciones de transferencia de calor por convección. La implementación computacional del modelo desarrollado se realizó usando Matlab-Simulink. El modelo se empleó para investigar el desempeño de la batería, este modelo desarrollado se basó en los parámetros físicos de las baterías eléctricas del Nissan Leaf, i.e. voltaje nominal, capacidad eléctrica, área de convección y masa. La carga demandada de la batería fue 1.5 Amperes a una temperatura ambiente de 20°C durante 3600 segundos. Estas condiciones se mantuvieron para tres diferentes valores de coeficiente de transferencia de calor por convección: 2 y 25 W/m² K para convección libre, mientras que para convección

forzada se usan los valores 25 y 250 W/m² K. Los resultados correspondientes mostraron valores de entre 31 y 36°C para la temperatura interior de la celda.

Palabras Clave: Batería Recargable, Matlab-Simulink, Modelo Termoeléctrico.

Abstract

This article presents the computational implementation of the thermoelectric model of a lithium-ion (Li-ion) battery, as well as the results obtained from this model under different convective heat transfer conditions. The computational implementation of the developed model was carried out using Matlab-Simulink. The model was used to investigate the performance of the battery, this developed model was based on the physical parameters of the electric batteries of the Nissan Leaf, i.e. nominal voltage, electrical capacity, convection area and mass. The battery charge demanded was 1.5 Amperes at an ambient temperature of 20°C for 3600 seconds. These conditions were maintained for three different values of heat transfer coefficient by convection: 2 and 25 W/m²K for free convection, while for forced convection the values 25 and 250 W/m²K are used. The corresponding results showed values between 31°C and 36°C for the corresponding internal cell temperature.

Keywords: Matlab-Simulink, Rechargeable Battery, Thermoelectric Model.

1. Introducción

Las baterías recargables han encontrado amplia aplicación en el almacenamiento de energía para propulsar vehículos eléctricos. Las baterías de iones de litio (Li-ion) son consideradas como la mejor opción para aplicaciones en vehículos eléctricos. Este tipo de batería presenta una alta relación entre la potencia almacenada y la masa de la batería (350-3000 W/kg), así como una alta energía específica (100- 275 Wh/kg) [Sanguesa 2021]. Sin embargo, las baterías Li-ion requieren un adecuado manejo térmico para mantener su rango de operación entre 15°C a 35°C. [Pesaran 2013]. Este requerimiento de temperatura hace necesario estudiar el comportamiento de las baterías bajo distintas condiciones de temperatura ambiente y distintos coeficientes de transferencia de calor por convección.

baterías. De igual manera, se describe el tipo de batería que se empleó como base para la simulación y sus características. Posteriormente, en la sección de Métodos se presenta el modelo teórico desarrollado y su implementación computacional. A continuación, en la sección de Resultados, se presentan las simulaciones realizadas, así como los resultados propiamente dichos. Finalmente, en la sección de Conclusiones, se presenta un análisis de los resultados obtenidos.

Tabla 1 Especificaciones técnicas de la celda de la batería del Nissan Leaf.

Tamaño	Valor	Unidades
Voltaje Nominal	3.65	V
Capacidad	33	Ah
Dimensiones Externas	261 x 216 x 7.9	mm
Masa	914	g
Energía Específica	221	Wh/kg
Estructura	Laminada	--
Material Cátodo	$\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$	--
Material Ánodo	Grafito	--

2. Métodos

El desarrollo de un modelo computacional es en realidad la última etapa de un proceso que comienza con el desarrollo de modelos basados en la Física y la Química. Como se puede ver en la figura 2, al modelar un fenómeno, partimos de experimentos físicos y/o químicos, de los cuales obtenemos datos.

Los datos obtenidos a partir de los experimentos físicos y/o químicos son reformulados en ecuaciones, que representan el modelo matemático. Comúnmente las ecuaciones que obtenemos para el modelo matemático son Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP), que solo se pueden solucionar analíticamente para casos muy sencillos. Utilizando técnicas de discretización, las EDP del modelo matemático pueden ser transformadas en un sistema de ecuaciones lineales. Este sistema de ecuaciones lineales es lo que llamamos modelo numérico. La solución del modelo numérico requiere traducir dicho modelo, en un modelo computacional que una computadora puede fácilmente solucionar, mediante el uso de software adecuado. El lector interesado en una discusión elemental sobre la modelación de fenómenos físico-químicos usando el enfoque anterior, recurrir a [Quarteroni 2006].

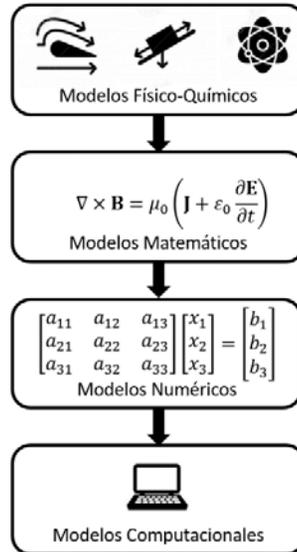


Figura 2 Construcción de un Modelo Computacional.

En el desarrollo de este estudio es necesario definir los valores para los distintos parámetros que intervienen en la transferencia de calor entre la batería recargable y el medio ambiente. El principal de los parámetros a considerar es el coeficiente de transferencia de calor por convección, definido por la ley de enfriamiento de Newton, mostrada en la ecuación 1.

$$q = \bar{h}(T_{bat} - T_{\infty}) \quad (1)$$

Donde:

q : Flujo de calor por unidad de área (W/m^2)

\bar{h} : Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m^2K)

T_{bat} : Temperatura superficial de la batería (K)

T_{∞} : Temperatura de corriente libre del aire (K)

La ley del enfriamiento de Newton es una sobre simplificación, pues supone que \bar{h} es proporcional a la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y el fluido. En realidad \bar{h} es independiente de la diferencia de temperaturas cuando el fluido es forzado a pasar sobre el cuerpo y la diferencia de temperaturas no es muy grande. Esta condición es llamada convección forzada. En el caso de que el fluido se mueva por diferencias de densidad (flotabilidad), \bar{h} depende débilmente de la diferencia de temperaturas, usualmente entre $\Delta T^{\frac{1}{4}}$ y $\Delta T^{\frac{1}{3}}$. Esta condición es llamada convección

natural. El lector interesado en una discusión más amplia sobre la transferencia de calor y sus mecanismos es referido a [Lienhard 2020].

Determinar de manera precisa los valores de \bar{h} requiere estudios experimentales que se encuentra fuera del alcance del presente trabajo. Debido a esta limitación, se propone realizar las simulaciones computacionales sobre un rango de valores que cubran adecuadamente los valores del coeficiente de transferencia de calor por convección forzada y por convección natural. Para dicho propósito se propone emplear valores comprendidos entre los límites para convección libre y forzada, como se muestra en la tabla 2 [Bergman 2011]. Los valores específicos a usar son: 2 y 25 W/m² K para convección libre, mientras que para convección forzada se usan los valores 25 y 250 W/m² K.

Tabla 2 Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Proceso	$\bar{h}(W/m^2K)$
Convección Libre:	
Gases	2-25
Líquidos	50-1,000
Convección Forzada:	
Gases	25-250
Líquidos	100-20,000
Convección con cambio de fase:	
Ebullición o condensación	2,500-100,000

La temperatura ambiental empleada en las simulaciones computacionales del modelo de batería recargable propuesto es 20 °C. Este valor es usado por Christenson et. al. [Christenson 2007a] y [Christenson 2007b] en estudios de consumo energético en vehículos. El modelo de la batería, en Matlab Simulink, se muestra en la figura 3.

El modelo emplea elementos estándar de la librería Simscape de Simulink. Como se puede apreciar, se acopla un modelo térmico que incorpora transferencia de calor por convección, con un modelo eléctrico de una batería recargable.

El modelo eléctrico permite calcular parámetros eléctricos como voltaje, corriente y estado de carga, así como parámetros térmicos como la temperatura de la celda. El modelo de Matlab/Simulink consiste de una parte eléctrica y una parte térmica acopladas.

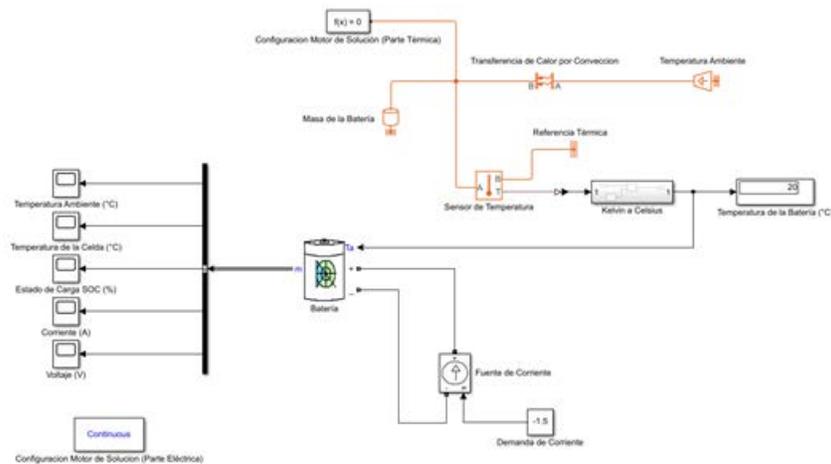


Figura 3 Modelo de la batería recargable en Matlab Simulink.

La parte eléctrica consiste de un elemento batería de la librería Simscape. Este elemento modela el comportamiento eléctrico de la batería usando como entrada sus parámetros básicos, i.e. voltaje nominal, capacidad eléctrica, área de convección y masa. Este elemento batería se descarga mediante una fuente de corriente fija de 1.5 amperes. El acoplamiento del modelo se realiza mediante el puerto térmico de la batería. La parte térmica del modelo consiste en un elemento de temperatura constante que representa el aire ambiente a 20°C, acoplado con un elemento convectivo, que toma los distintos valores del coeficiente de transferencia de calor de 2, 25 y 250 W/m²K. Estos elementos van acoplados a un elemento de inercia térmica que representa la masa de la batería y a un sensor de temperatura ideal que captura la lectura de la temperatura interna de la celda. Tanto la parte eléctrica, como la parte térmica del modelo cuentan con motores de solución (solvers) diferentes.

3. Resultados

Los resultados para la temperatura de la celda con una temperatura ambiente de 20 °C y coeficientes de transferencia de calor de 2, 25 y 250 W/m²K se muestran en la figura 4. Se puede apreciar como la temperatura de la celda aumenta significativamente más que la temperatura ambiente de 20 °C inicial, para todos los casos. Esto era previsible debido a que la celda está siendo sometida a una descarga de 1.5 amperes durante una hora (3600 s). La variación de los coeficientes

de transferencia de calor por convección también tiene un efecto significativo en las temperaturas alcanzadas por la celda. Mientras que para el coeficiente más bajo ($2 \text{ W/m}^2\text{K}$), correspondiente al límite inferior de convección libre, se alcanza una temperatura de $36 \text{ }^\circ\text{C}$, en el caso de un coeficiente ($250 \text{ W/m}^2\text{K}$), correspondiente al límite superior de convección forzada, se alcanzan poco menos de $31 \text{ }^\circ\text{C}$. Los resultados obtenidos muestran como al aumentar el coeficiente de transferencia de calor por convección la temperatura de la batería es menor.

El voltaje a circuito abierto de la batería se muestra en la figura 5 y el estado de carga (SoC por sus siglas en inglés) se muestra en la figura 6. Como se puede apreciar, el cambio del valor del coeficiente de transferencia de calor por convección no tiene un efecto apreciable en el estado de carga de la batería, pero si afecta levemente el voltaje en circuito abierto de la batería.

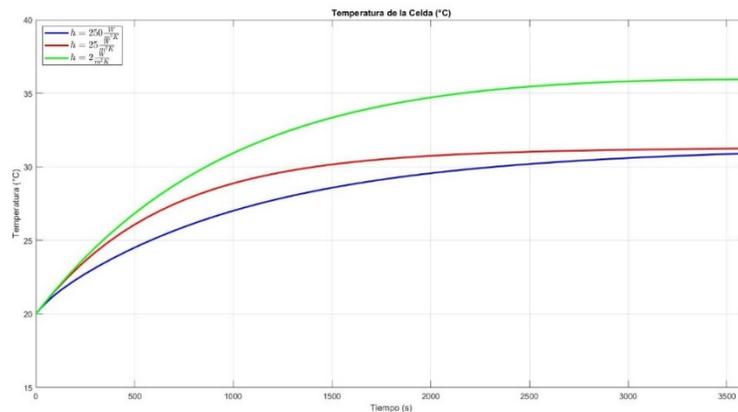


Figura 4 Temperatura de la Celda para diferentes valores del coeficiente.

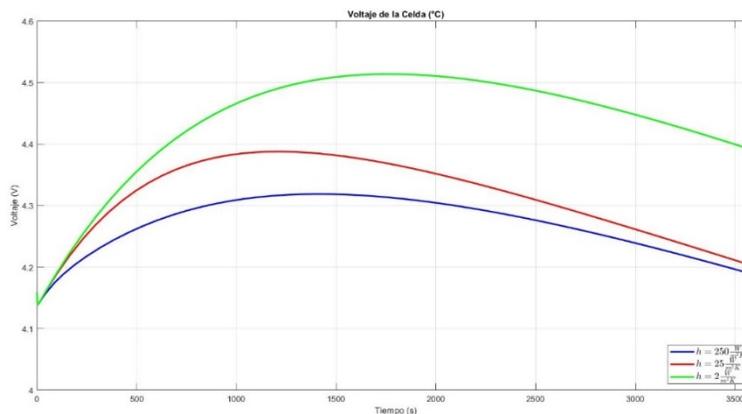


Figura 5 Voltaje de la Celda para diferentes valores del coeficiente.

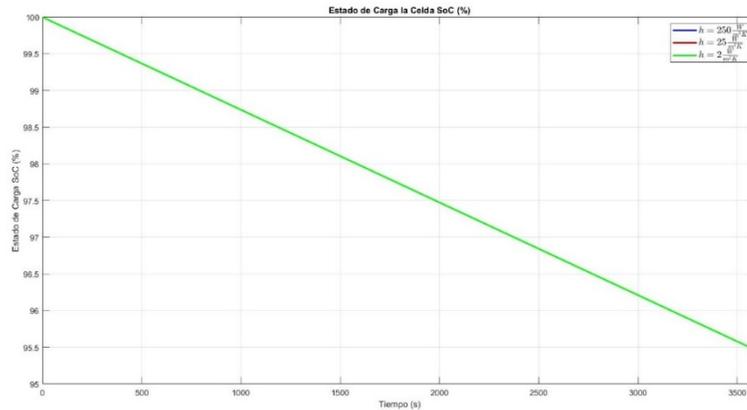


Figura 6 Estado de Carga de la Celda para diferentes valores del coeficiente.

4. Discusión

El diseño de un sistema de ingeniería involucra un proceso iterativo, en el que los modelos empleados inicialmente deben brindar respuestas cuantitativas que permitan explorar el espacio de diseño del problema [Budynas 2014]. El modelo termoeléctrico implementado permite obtener resultados que capturan cualitativamente el comportamiento de la batería recargable bajo distintas condiciones de transferencia de calor. Este modelo permite explorar el espacio de diseño a un costo computacional razonable. Conforme el proceso de diseño avanza de la Síntesis, al Análisis y la Optimización [Budynas 2014], este modelo inicial deberá ser sustituido por otros modelos que posean un grado de fidelidad mayor y que proporcionen mayor grado de detalle en el comportamiento termoeléctrico de la batería recargable.

5. Conclusiones

Se desarrolló un modelo termoeléctrico de una batería recargable empleando la librería Simscape de Matlab Simulink. El modelo captura cualitativamente el comportamiento de una batería recargable del Nissan Leaf. Resultados preliminares obtenidos de las simulaciones muestran que la temperatura interna de la batería aumenta cuando el coeficiente de transferencia de calor por convección disminuye. La diferencia en temperatura entre convección libre (2 a 25 W/m²K) y convección forzada (25 a 250 W/m²K) es de 5 °C para una temperatura ambiente de 20 °C.

Considerando un tiempo de uso de 3600 s (1 hora), los diferentes regímenes de convección libre o forzada no afectaron el voltaje a circuito abierto ni el estado de carga de la batería en las simulaciones realizadas.

Considerando la naturaleza preliminar de este estudio, las futuras acciones a realizar en línea con el desarrollo del modelo termoeléctrico son las siguientes:

- Obtención de datos adicionales sobre el comportamiento de la batería del Nissan Leaf. Es necesario contar con una caracterización experimental adecuada de la batería del Nissan Leaf. El modelo implementado cuenta solamente con información básica de la batería y no se cuenta con curvas de corriente como función del tiempo que permitan capturar adecuadamente el comportamiento de la batería.
- Obtención de un ciclo de carga para el batería basado en el uso del vehículo eléctrico. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) ha estandarizado las pruebas de consumo energético en dinamómetro para vehículos, tanto eléctricos como de combustión interna. La prueba más común a la que los vehículos son sometidos es EPA75 [EPA 75]. Es necesario obtener un ciclo de carga de la batería que refleje el ciclo de manejo definido por la EPA75 para poder comparar los resultados con resultados experimentales en vehículos.
- Refinar el modelo de transferencia de calor. En el presente trabajo solo se ha realizado una estimación preliminar de los valores del coeficiente de transferencia de calor por convección para la batería. Es necesario realizar cálculos más detallados usando correlaciones experimentales como la propuesta por Churchill y Chu para convección natural o la relación propuesta por Churchill y Ozoe para convección forzada [Lienhard 2020].

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Lienhard J.H. IV and Lienhard J.H.V; A Heat Transfer Textbook, Phlogiston Press (2020).
- [2] Bergman T.L., Lavine A. S., Incropera F.P., Dewitt D.P.; Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley and Sons (2011).

- [3] Andreev A.A., Vozmilov A.G. Kalmakov V.A.; Simulation of lithium battery operation under severe temperature conditions. *Procedia Engineering* 129, 201-206 (2015).
- [4] Finegan D.P., Darcy E., Keyser M., Tjaden B., Heenan T.M.M., Jarvis R., Bailey J.J., Vo N.T., Magdysyuk O.V., Drakopoulos M., Di Michiel M., Rack A., Hinds G., Brett D.J.L., Shearing P.R.; Identifying the Cause of Rupture of Li-Ion Batteries during Thermal Runaway. *Advanced Science*, Vol. 5, No. 1, (2018).
- [5] Christenson M., Loisel A., Karman D. y Graham L.A.; The Effect of Driving Conditions and Ambient Temperature on Light Duty Gasoline-Electric Hybrid Vehicles (1): Particulate Matter Emission Rates and Size Distributions. *SAE Technical Paper Series*, 01-2136 (2007).
- [6] Christenson M., Loisel A., Karman D. y Graham L.A.; The Effect of Driving Conditions and Ambient Temperature on Light Duty Gasoline-Electric Hybrid Vehicles (2): Fuel Consumption and Gaseous Pollutant Emission Rates. *SAE Technical Paper Series*, 01-2137 (2007).
- [7] Environmental Protection Agency. Dynamometer Drive Schedules: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>.
- [8] Sanguesa J.A., Torres-Sanz V., Garrido P., Martinez F.J., Marquez-Barja J.M.; A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities* 4, 372–404. (2021).
- [9] Pesaran A., Santhanagopalan S., Kim G.H.; Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle Applications. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58145.pdf> (2013).
- [10] Hartmann M., Kelly J.; Thermal Runaway Prevention of Li-ion Batteries by Novel Thermal Management System. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo* (2018).
- [11] Budynas R. y Nisbett K.; *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw Hill, 2014.