

PROPUESTA DE MODELO PARA ESTIMAR EL ESTADO DE CARGA DE BATERÍAS DE LIFEPO4 PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

Rodríguez-Romero S.*, Rabanal-Arabach J.*, Cortés-Carmona M.*, Ferrada P.**

* Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antofagasta, Angamos 601, Antofagasta, 1270300, Chile, sebastian.rodriguez@uantof.cl

**Centro de Desarrollo Energético Antofagasta, Universidad de Antofagasta, Angamos 601, Antofagasta, 1270300, Chile.

<https://doi.org/10.34637/cies2020.2.1123>

RESUMEN

El dimensionamiento de un sistema de almacenamiento juega un papel indispensable a la hora de proporcionar una fuente de energía constante. Sin embargo, estos sistemas luchan con la inestabilidad de los parámetros resistivos entre celda y celda, que finalmente logran variar la previsión de diseño. Este trabajo contribuye con una metodología de modelado y simulación para un sistema eléctrico de un vehículo eléctrico utilizando la plataforma Matlab-Simulink. El objetivo es estimar el estado de carga y, por tanto, la autonomía del sistema de tracción eléctrica. Se estudian las condiciones tanto internas como externas en las que funciona un EV y se construye un prototipo de EV para validar los resultados de las simulaciones. El modelo computacional propone el uso de polinomios característicos de las curvas de trabajo de un motor eléctrico y de los componentes RC del circuito equivalente de una batería. Se modelan las ecuaciones matemáticas que representan las fuerzas a las que está sometido el tren de tracción y se obtiene la corriente que se extrae del sistema de almacenamiento (I_m).

PALABRAS CLAVE: Modelo, Estado de carga, Baterías, Fuerza.

ABSTRACT

Sizing a storage system plays an indispensable role in providing a constant energy source. However, these systems struggle with the instability of resistive parameters between cell and cell, which finally manages to vary the design forecast. This work contributes with a modeling and simulation methodology for an EV power system using the Matlab-Simulink platform. The aim is to estimate the state of charge and, therefore, the autonomy of the electrical traction system. Both internal and external conditions in which an EV works are studied and an EV prototype is built to validate the results of the simulations. The computational model proposes the use of characteristic polynomials of the work curves of an electric motor and of the RC components of the equivalent circuit of battery. The mathematical equations that represent the forces to which the traction train is subjected are modeled and the current that is extracted from the storage system (I_m).

KEYWORDS: Model, State of charge, force

INTRODUCCIÓN

El litio destaca como uno de los metales con mayor crecimiento en su demanda debido a la extracción del carbonato de litio grado batería (sal inorgánica derivada del litio), para su uso en la fabricación de baterías recargables tipo ion litio, las cuales, a su vez, son un componente clave de los sistemas de almacenamiento en vehículos eléctricos (EV). En esta índole, existen aún necesidades de desarrollar sistemas de predicción y control del estado de carga (SoC, por sus siglas en inglés) del banco de baterías en los EV. Los modelos de baterías se han convertido en una herramienta indispensable para el diseño de sistemas alimentados por baterías. Entre sus usos se incluyen la caracterización de baterías, la estimación del SoC y del estado de salud (SoH, por sus siglas en inglés), el desarrollo de algoritmos, la optimización en el nivel del sistema y la simulación en tiempo real para el diseño de sistemas de gestión de baterías. Los modelos de baterías basados en circuitos equivalentes son los preferidos para el desarrollo en el nivel del sistema y las aplicaciones de controles, debido a su relativa sencillez. Los ingenieros utilizan los circuitos equivalentes para modelar el comportamiento termoeléctrico de las baterías, parametrizando sus elementos no lineales con técnicas de correlación que combinan modelos y mediciones experimentales a través de optimización. El objetivo de este trabajo es analizar un sistema de almacenamiento que represente el comportamiento de trabajo de un EV. Se modela el trabajo mecánico desarrollado por un vehículo con el fin de aportar las entradas requeridas para estimar el SoC de un banco de baterías representado por su circuito eléctrico y térmico equivalente. Respecto a otros trabajos, el presente permite visualizar la trazabilidad de cada variable mediante una interfaz de fácil entendimiento, representando el comportamiento empírico del motor eléctrico y de la batería utilizada mediante polinomios característicos.

EL MODELO

Un vehículo eléctrico, al igual que uno convencional a gasolina, se expone diariamente a condiciones de trabajo que restringen la eficiencia de estos (Muneer et al., 2017). Sólo entre el 14% y 30% de la energía del combustible que se le incorpora a un vehículo convencional es utilizada para moverlo. Este valor puede variar dependiendo del ciclo de manejo (Ministerio de Energía, 2014). El resto de la energía se pierde en ineficiencias del motor o en el uso de accesorios. Es bajo estas condiciones donde se hace realmente importante el diseño de todo el sistema de tracción para dimensionar de manera más efectiva el banco de baterías y estimar de manera más acertada el SoC.

Fuerza de Tracción

Para entender la dinámica de un vehículo, es necesario conocer las ecuaciones físicas que rigen su comportamiento. Considerando que el EV se encuentra siempre en una pendiente por más mínima que sea, este se regirá por la segunda Ley de Newton, que se encarga de cuantificar el concepto de fuerza (ver Fig. 31), es decir, que la aceleración experimentada del vehículo es proporcional a la suma de todas las fuerzas actúan sobre él, tal como se modela en ec (1) (Mohd et al., 2015).

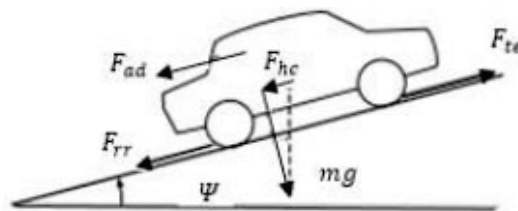


Fig. 1 Fuerzas actuantes sobre un EV en una pendiente.

$$F_{te} = m \cdot a + F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} \quad (1)$$

Al descomponer las fuerzas es posible representar las condiciones aerodinámicas relacionadas con la forma del vehículo (Fraija, 2006). La fuerza de rodadura modela el comportamiento frente a la interacción del cuerpo en movimiento contra el suelo, mientras que la fuerza de carga establece el peso al que es sometido el motor para desplazar la masa del sistema en función del perfil de elevación. Dado que actualmente el ambiente de operación de un vehículo tiene condiciones de discontinuidad controlada (ciclo de trabajo), se consideran dos fuerzas adicionales que tienen relación con la aceleración del vehículo (ver ec (2)). La primera, F_{al} , representa la aceleración lineal y la fuerza necesaria para sacar de la inercia a todo el cuerpo en reposo. La segunda, F_{aw} , muestra la fuerza de aceleración angular que modela la situación cuando el vehículo se encuentra en movimiento, aquí actúa el momento inercial y la relación de transmisión del sistema de tracción.

$$F_{te} = m \cdot a + F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{al} + F_{aw} \quad (2)$$

Al relacionar los parámetros fundamentales, de la ecuación (2) finalmente se tiene la ecuación (3)

$$F_{te} = m \cdot g \cdot \mu_{rr} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot v^2 \cdot C_d + m \cdot g \cdot \sin \phi + m \cdot a + I \cdot \frac{G^2}{\eta_g \cdot r^2} \cdot a \quad (3)$$

En donde m es la masa del vehículo en kg, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ es la aceleración debido a la gravedad, μ_{rr} es el coeficiente de fricción de los neumáticos, $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ es la densidad del aire, s es sección frontal del EV en m^2 , C_d es el coeficiente aerodinámico, ϕ es el Angulo de inclinación de la pendiente, I es el momento de inercia, G es la relación de transmisión entre el sistema y el motor; η_g es el rendimiento del sistema de transmisión, r es el radio de la rueda en m, v es la velocidad de desplazamiento en m/s, y a es la aceleración del vehículo en m/s^2 .

De esta forma, para calcular la potencia necesaria por el sistema de tracción se evalúa la ec. (3) en la ec. (4).

$$P_m = F_{te} \cdot v \quad (4)$$

Transmisión y Torque

El rendimiento de la transmisión se considera un parámetro constante, pues la relación de transmisión depende del torque máximo permitido del motor eléctrico (Alcalá, 2014). Para modelar la transmisión, se considera como entrada el par del motor y como salida la fuerza de tracción en los neumáticos (Mohd et al., 2015). Teniendo en cuenta una transmisión simple, las siguientes ecuaciones modelan dicha transmisión:

$$T_m = \frac{F_{te} \cdot r}{\eta_g \cdot G} \quad (5)$$

$$T_m = \eta_g \cdot \frac{F_{te} \cdot r}{G} \quad (6)$$

La ecuación (5) representa el torque cuando el sistema de tracción se comporta como motor, mientras que la ecuación (6) muestra el torque cuando la máquina eléctrica funciona como generador (uso del freno regenerativo) (Durána et al., 2009).

Sistema de Almacenamiento

Para estimar el SoC del sistema, es necesario conocer y modelar los parámetros internos de la batería utilizada por el EV. Existe un abanico de ecuaciones para definir las variables de voltaje y SoC, pero el modelo más aceptado por la comunidad ha sido el que se obtiene del circuito eléctrico equivalente de la batería, como el mostrado en Fig. 32 (Cortés-carmona et al., 2016). Luego, el SoC es calculado de la ecuación (7) (Lekshmi & Lal, 2019).

$$\text{SoC}(t) = 100 \cdot \left[1 - \frac{1}{Q} \cdot \int I(t) dt \right] \quad (7)$$

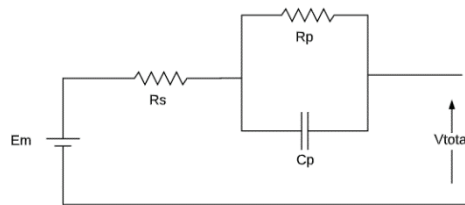


Fig. 2 Circuito eléctrico equivalente de una batería.

De la figura anterior se pueden deducir la tensión en circuito abierto (V_{total}) en función del SoC (ec (8)).

$$V_{total}(\text{SoC}) = E_m(\text{SoC}) - R_s(\text{SoC}) \cdot I - \sum_n V_n(\text{SoC}) [\text{V}] \quad (8)$$

Donde E_m es la tensión interna de la batería en V, R_s es la resistencia interna en Ω , y V_n es la tensión resultante de la acción de los componentes de polarización RC de la batería en V. El valor de estos varía según se esté en estado de carga o descarga, y representan las pérdidas internas del sistema (Cortés-carmona et al., 2016). La ec. (9) permite determinar V_n en función del tiempo, esto debido a que los parámetros de la batería son dinámicos y varían también en función del SoC.

$$V_n(t) = \int_0^t \left[\frac{I(t)}{C_p(t)} - \frac{V_n(o^-)}{R_n(t) \cdot C_p(t)} \right] dt \quad [V] \quad (9)$$

En este caso particular, para determinar el comportamiento de E_m , R_s , C_p y R_n se realiza una espectroscopia de impedancia, utilizando el equipo Metrohm Autolab (Pizarro, 2018), obteniendo las curvas de trabajo de cada variable. A estas curvas se les realiza un ajuste polinomial, resultando los siguientes polinomios característicos:

$$E_m(\text{SoC}) = 3.67 \cdot \text{SoC}^{-5} - 7.11 \cdot \text{SoC}^{-4} + 6.08 \cdot \text{SoC}^{-3} + 2.63 \cdot \text{SoC}^{-2} - 10.00 \cdot \text{SoC}^{-1} + 6.51 \cdot \text{SoC} + 2.00 \quad (10)$$

$$R_s(\text{SoC}) = 9.18 \cdot \text{SoC}^{-7} - 31.80 \cdot \text{SoC}^{-6} + 43.79 \cdot \text{SoC}^{-5} - 30.53 \cdot \text{SoC}^{-4} + 11.36 \cdot \text{SoC}^{-3} - 2.15 \cdot \text{SoC}^{-2} + 0.17 \cdot \text{SoC}^{-1} + 0.02 \quad (11)$$

$$R_n(\text{SoC}) = 0.09 \cdot \text{SoC}^{-6} - 0.37 \cdot \text{SoC}^{-5} + 0.60 \cdot \text{SoC}^{-4} - 0.50 \cdot \text{SoC}^{-3} + 0.23 \cdot \text{SoC}^{-2} - 0.06 \cdot \text{SoC}^{-1} + 0.01 \cdot \text{SoC} \quad (12)$$

$$C_p(\text{SoC}) = 1.64 \cdot 10^5 \cdot \text{SoC}^{-7} - 6.12 \cdot 10^5 \cdot \text{SoC}^{-6} + 9.40 \cdot 10^5 \cdot \text{SoC}^{-5} - 7.53 \cdot 10^5 \cdot \text{SoC}^{-4} + 3.35 \cdot 10^5 \cdot \text{SoC}^{-3} - 7.73 \cdot 10^4 \cdot \text{SoC}^{-2} + 6.25 \cdot 10^3 \cdot \text{SoC}^{-1} + 7.73 \cdot 10^2 \quad (13)$$

El modelo del sistema de almacenamiento también considera un espacio para el cálculo de la temperatura en la batería. Así, se presentan las tres ecuaciones que cuantifican la generación de calor, en ec. (14), la temperatura del núcleo en ec. (15) y superficial, en ec. (16) (Cortés-carmona et al., 2016).

$$Q_j = \frac{v_{1,j}^2(t)}{R_1} + \frac{v_{2,j}^2(t)}{R_2} + R_s \cdot I_j^2 \quad (14)$$

$$C_{cj} \frac{dT_{cj}}{dt} = Q_j - \frac{T_{cj} - T_{sj}}{R_{cj}} \quad (15)$$

$$C_{sj} \frac{dT_{sj}}{dt} = - \frac{T_{sj} - T_{cj}}{R_{cj}} - \frac{T_{sj} - T_{fj}}{R_{uj}} \quad (16)$$

PROGRAMACIÓN DEL MODELO

La operación del sistema se programa en bloques usando el software Simulink®. Para esto, se relaciona el trabajo que elabora el vehículo con la batería usando bloques programados en distintos subsistemas con el fin de representar todas las ecuaciones involucradas, como se muestra en la Fig. 33. Se definen dos ambientes de trabajo denominados: 1) ciclo de trabajo y 2) bloque de potencia.

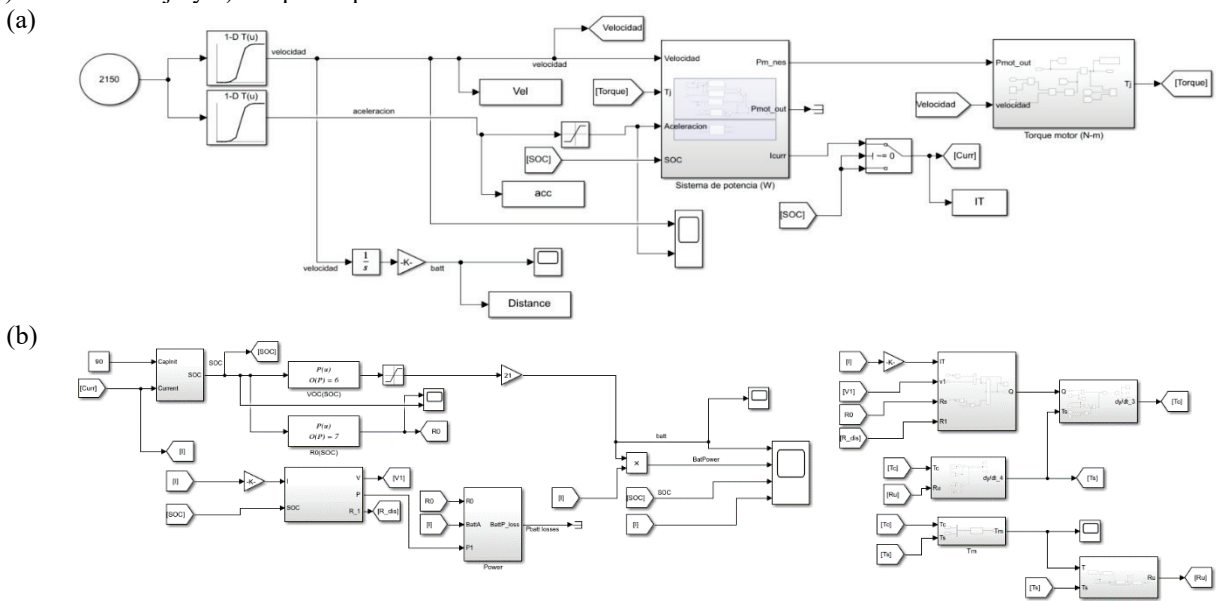


Fig. 3 Diagrama en bloques del simulador propuesto: (a) tren de tracción, (b) circuito equivalente del banco de baterías.

Vehículo Eléctrico

Se construye un EV con capacidad para dos pasajeros en formato side by side, mostrado en la Fig. 4. Sus principales características se presentan en la Tabla 1. Actualmente el vehículo posee una autonomía de 72 km a una velocidad promedio de 17 m/s considerando un perfil de elevación plano ($\pm 1^\circ$ de inclinación), logrando una eficiencia de 60 W/km. Posee un sistema de almacenamiento de 7.1 kWh que contempla la incorporación de 24 celdas en serie tipo LiFePo4 de 3.4 V/87 Ah. Si bien el sistema eléctrico incluye la carga de la batería a través de seis módulos fotovoltaicos (600 W en total), para efectos de validar la programación propuesta, estos son desconectados.

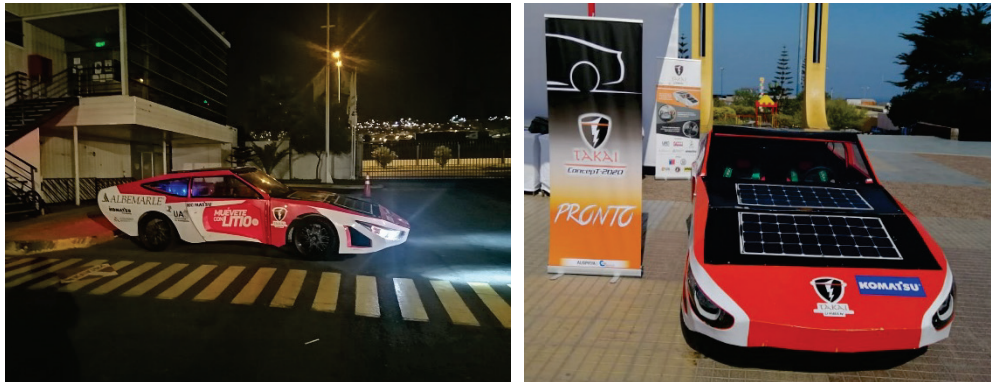


Fig. 4 Vehículo eléctrico solar Takai.

Tabla 1. Parámetros técnicos del vehículo eléctrico.

Características generales	
m : masa vehículo con pasajeros	850 kg
C_d : Coeficiente aerodinámico	0.32
r : Radio rueda trasera	0.23 m
μ_{rr} : Coef. Rodadura	0.017
G : Relación de transmisión	1
s : Área frontal	1.7 m ²
Características motor eléctrico	
P_{max} : Potencia máxima motor	4 kW
T_{max} : Torque máximo motor	280 N.m
ω : Velocidad angular	
V_m : Voltaje de trabajo	72 V
I_{max} : Corriente máxima.	160 A
η : Eficiencia del motor.	91%

Bloque de Potencia

El programa permite estimar el estado de carga del sistema de potencia del vehículo, para esto debe emplear las ecuaciones matemáticas mencionadas. Una vez incorporadas las condiciones de trabajo del EV (ciclo de trabajo y parámetros técnicos), se puede simular la fuerza y potencia requerida por el EV para desplazarse, acorde a ec. (3) y (4), respectivamente. Luego, se calcula el par ejercido en la rueda por medio de la ec (5) y (6) dependiendo si el motor está consumiendo ($a(t) > 0$) o generando energía ($a(t) < 0$), donde $a(t)$ es la aceleración del ciclo de trabajo en función del tiempo. El torque resultante se ingresa a través un polinomio obtenido del ajuste realizado a las curvas de torque vs corriente del motor eléctrico utilizado (ec. (17)). Esto permite realizar un análisis del sistema de potencia del vehículo utilizando medidas empíricas del sistema.

$$I_m(T_m) = -3.53 \cdot 10^{-11} \cdot T_m^{-7} + 1.35 \cdot 10^{-8} \cdot T_m^{-6} - 4.36 \cdot 10^{-7} \cdot T_m^{-5} - 7.53 \cdot 10^5 \cdot T_m^{-4} - 0.001 \cdot 10^5 \cdot T_m^{-3} + 0.04 \cdot T_m^{-2} - 0.28 \cdot T_m^{-1} \quad (17)$$

La corriente I_m es resultado del trabajo al que está sometido el EV. Cualquier parámetro modificado, ya sea su masa, rueda, perfil aerodinámico, etc., incurrirá en una variación de I_m . De esta manera, al utilizar la ec. (7), se calcula el

SoC del sistema de almacenamiento en función de la corriente (Mohd et al., 2015). Calcular el SoC permite resolver los polinomios de las ecuaciones (9)–(12). Debido a la dinámica de la batería, y dependiendo si esta se encuentra en estado de oxidación (descarga) o reducción (carga), la química de la batería varía y por ende también los valores RC de ésta (Fang et al., 2017). Así, es posible modelar el calor generado debido a las pérdidas relacionadas al efecto Joule y los procesos de difusión de cada celda de litio (Mallco, 2016). Con la ec. (14) se calcula la generación de calor a partir de la dependencia de los polinomios mencionados en función del SoC. Del cálculo anterior nace la variable $Q_j(V_n, R_n, R_s, I_m, t)$, donde t es el tiempo de simulación. Utilizando las ecuaciones (15) y (16) se obtiene la temperatura en el núcleo (C_{cj}) de la celda y en la superficie (C_{sj}) respectivamente. El valor medio de éstas permite estimar la temperatura del banco de baterías. Dado que, para tener una aproximación más fina de la temperatura superficial se debe considerar la convección entre celdas, se requiere resolver un set de matrices que Abdiel resuelve en su trabajo denominado “*Modelamiento electro-térmico de baterías de litio en diferentes condiciones de altura y temperatura*” (Mallco, 2016). Para el caso actual, se asume que no existe interacción por convección entre celdas, lo que reduce el trabajo computacional del modelo. El diagrama de flujo mostrado en la Fig. 35 permite dimensionar como interaccionan los modelos mencionados anteriormente.

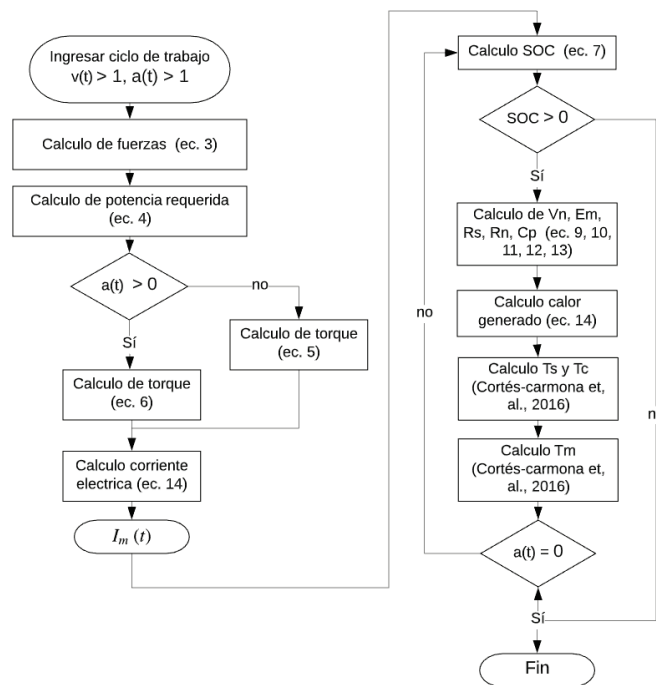


Fig. 5 Diagrama de flujo del programa para computar el SoC.

RESULTADOS

Ciclo de Trabajo y Carga

En la simulación del modelo se utilizan los parámetros comentados en la Tabla 1. Para el arreglo del sistema de almacenamiento se considera una capacidad de 6 kWh. Con el fin de comparar los resultados obtenidos se utiliza el software SUMO (Simulation of Urban Mobility), que es un paquete de simulación de tráfico vial de código abierto que permite configurar las entradas que requiere el vehículo para funcionar. El ciclo de trabajo utilizado para ambas simulaciones se puede observar en la Fig. 6a. Se utiliza un perfil de elevación de 0° , pues esta variable representa un factor importante en el consumo energético de la batería. Luego, en la Fig. 6b se presenta la capacidad actual del banco de baterías en kWh en función del tiempo.

Pese a que se utiliza el mismo ciclo de trabajo para ambas simulaciones, luego de 2150 s, el modelo en Matlab presenta una diferencia relativa en el SoC de -16.6% respecto de SUMO. Es importante comprender que el código en Matlab incorpora la caja de transmisión, mientras que SUMO, no. Estas diferencias están presentes en una gran parte de los modelos disponibles. Una validación con mediciones empíricas permite determinar la carga eléctrica que no es considerada. Idealmente se requiere realizar una serie de pruebas bajo diferentes condiciones de trabajo con el fin de determinar el error cuadrático medio, lo que permitiría obtener un modelo aún más realista.

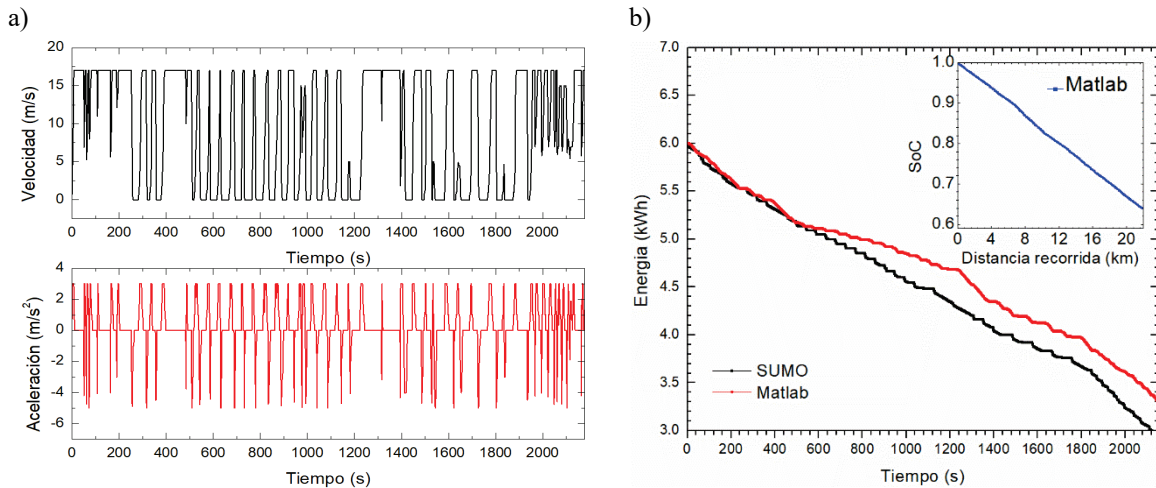


Fig. 6 a) Ciclo de trabajo, b) resultado simulación.

Trabajo Desarrollado por la Batería

La corriente exigida por el sistema de tracción puede observarse en la Fig. 7a. Las variaciones presentes están directamente relacionadas por el torque requerido. Entre los 0 y 70 Nm la corriente fluctúa drásticamente (de 0 a 90 A) producto que la velocidad angular es mínima cuando el sistema comienza a requerir más potencia. Una vez, que el motor del vehículo alcanza cierto nivel de revoluciones por minuto (RPM), las variaciones de torque no influyen significativamente la corriente. De esta manera, siempre se requiere un flujo constante de energía desde la batería.

Existe transporte mecánico de masa al interior de cada celda debido a los procesos de oxidación y reducción producto de la carga y descarga de la batería. La corriente es la base en la generación de calor en el núcleo. El banco de baterías experimenta fenómenos de convección entre cada celda de litio producto de la temperatura superficial en cada una. En la Fig. 7b se observa la temperatura en la superficie y en el núcleo de una celda. Para el presente trabajo se asume que el comportamiento individual de cada una es homogéneo, esto pues se utiliza refrigeración forzada para mantener lo más cercana la temperatura de cada celda al ambiente. Se alcanza el equilibrio térmico luego de 1600 s.

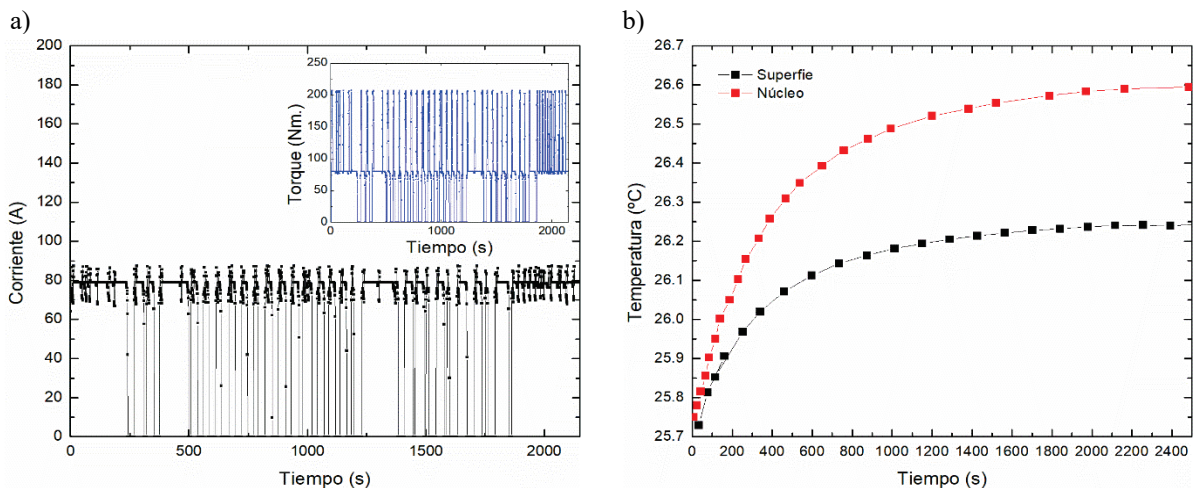


Fig. 7 a) Corriente exigida por sistema de tracción, b) Temperatura en la superficie y el nucle de la batería.

CONCLUSIONES

El modelo presenta una tendencia similar a la entregada por SUMO. Es de gran importancia la incorporación de las pendientes de la ruta recorrida en los modelos para lograr una mejor aproximación al estimar una determinada operación, especialmente cuando se quiere hacer la optimización de carga de una flota, por ejemplo.

A partir del modelo desarrollado, se espera que el EV fabricado logre una autonomía de 62 km. El modelo muestra como los ciclos de continua aceleración y desaceleración son evidentemente causales de una mayor descarga de la batería, mientras que a velocidad constante el rendimiento mejora. Lo anterior en fiel concordancia con lo esperado.

La simulación del sistema eléctrico del vehículo permite relacionar un set de modelos con polinomios empíricos. Esto permite un resultado teórico con base experimental que puede ser ajustado. No obstante, es de gran interés la validación del modelo a partir de resultados de operación del vehículo eléctrico fabricado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a sus colaboradores HEUMA, Komatsu Reman Center Chile, Metalcast Ltda., Centro de Desarrollo Energético Antofagasta (CDEA), SERC Chile, Albemarle Ltda. y a todo el equipo Takai por su contribución en el proceso de construcción del prototipo de vehículo eléctrico.

REFERENCIAS

- Alcalá, I. (2014). Emulación de un vehículo eléctrico basada volante de inercia y máquina de CD. *DYNA* (Colombia), 81(183), 86–96. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n183.31638>
- Cortés-carmona, M., C, A. M., Calderón-Muñoz, W. R., Reyes-Marambio, J., & Palma-Behnke, R. (2016). Estudio del Efecto Altura en un Sistema de Empaque de Baterías de Ion Litio. *Enersol*, October, 1–6.
- Durána, M., Guerrero-Ramírez, G., & Claudioa, A. (2009). Determinación de los requerimientos de par, velocidad angular y potencia para el motor de un vehículo eléctrico. *Sign*, 1.
- Fang, Y. J., Chen, Z. X., Ai, X. P., Yang, H. X., & Cao, Y. L. (2017). Recent developments in cathode materials for na ion batteries. In *Wuli Huaxue Xuebao/ Acta Physico - Chimica Sinica*. <https://doi.org/10.3866/PKU.WHXB201610111>
- Fraija, B. (2006). Estudio de la aerodinámica en los vehículos. *Prospectiva*, 4(2), 66–70.
- Lekshmi, S., & Lal, L. P. (2019). Mathematical modeling of Electric vehicles - A survey. *Control Engineering Practice*. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.104138>
- Mallco, A. (2016). Modelamiento electro-térmico de baterías de litio en diferentes condiciones de altura y temperatura. Universidad de Antofagasta.
- Ministerio de Energía. (2014). *Energía 2050*. In Ministerio de Energía Gobierno de Chile (pp. 1–154). http://eae.mma.gob.cl/uploads/D03_Politica_Energetica_de__Chile_2050_Anteproyecto2.pdf
- Mohd, T. A. T., Hassan, M. K., & Aziz, W. M. K. A. (2015). Mathematical modeling and simulation of an electric vehicle. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. <https://doi.org/10.15282/jmes.8.2015.6.0128>
- Muneer, T. (Tariq), Kolhe, M., & Doyle, A. (2017). *Electric vehicles: prospects and challenges*. Elsevier. [https://books.google.cl/books?id=IhATDgAAQBAJ&pg=PA275&lpg=PA275&dq=Fox+and+Davies+\(2013\)&source=bl&ots=UFNCBfIAkc&sig=ACfU3U12SwteuaCpHi5uihKF9if6Ir05Tw&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKewjI9biZ1_3gAhXhJLkGHVEqA_MQ6AEwBnoECAkQAQ#v=onepage&q=Fox and Davies \(2013\)&f=false](https://books.google.cl/books?id=IhATDgAAQBAJ&pg=PA275&lpg=PA275&dq=Fox+and+Davies+(2013)&source=bl&ots=UFNCBfIAkc&sig=ACfU3U12SwteuaCpHi5uihKF9if6Ir05Tw&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKewjI9biZ1_3gAhXhJLkGHVEqA_MQ6AEwBnoECAkQAQ#v=onepage&q=Fox and Davies (2013)&f=false)
- Pizarro, V. (2018). DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA PARA ESTIMAR EL ESTADO DE CARGA DE UNA CELDA DE ION-LITIO.