

Passivity-based controller for charging of Lithium-ion battery model 18650

Asunción Martínez López* Jesús Linares Flores**
Arturo Hernández Méndez*** Antonio Orantes Molina****
José Antonio Juárez Abad† Jorge Luis Barahona Avalos‡

* Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca, 69000 México

(e-mail: a_martl@hotmail.com)

** (e-mail: jlinares@mixteco.utm.mx)

*** (e-mail: arturo@mixteco.utm.mx)

**** (e-mail: tonito@mixteco.utm.mx)

† (e-mail: abad@mixteco.utm.mx)

‡ (e-mail: jbarahona@mixteco.utm.mx)

Abstract: This article deals with a lithium-ion battery charger using a passivity-based controller (called: the exact tracking error dynamics passive output feedback (ETEDPOFC)), which uses the constant-current constant-voltage (CC-CV) protocol. For this, the charger system consists of 4 phases. The first phase consists of obtaining the average model of the proposed charger, as well as showing the proposed battery model, composed of a resistor in series with a DC voltage source. The second phase consists of the design of the ETEDPOFC controller, taking into account the proposed model for the battery. Followed by obtaining the balance points as a function of the protocols CC-VC. The third phase resides in the simulation of the system in general (converter-battery) in the Matlab/Simulink software, which uses the Shepherd model to simulate the voltage-current dynamics of the battery. Finally, the third phase shows the implementation based on the system's TMS320F28335 card DSP, just like the experimental results.

Keywords: Buck power converter, CC-CV charger, ETEDPOF control, Internal battery resistance, Shepherd model.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, las baterías representan un papel importante en la transformación energética de combustibles fósiles a energías renovables (Obaya and Céspedes (2021)). Sin embargo, su uso presenta retos importantes, como el modelado de baterías y seguridad de operación. Este último reto, contempla la carga de las baterías de manera segura para el usuario y la batería.

En relación con la idea anterior, existen diferentes protocolos que permiten cargar una batería. Con base en lo expuesto en Tomaszewska et al. (2019), el protocolo de carga corriente constante-voltaje constante consiste en mantener una referencia de corriente hasta que la batería alcance el 80% de carga, para después mantener el voltaje constante hasta los 4.2 V (pila de Ion-Litio), en consecuencia la corriente disminuye.

En este contexto, el tiempo para cargar la batería depende del nivel de carga. Con base en lo expuesto en Logroño (2017) existen 3 niveles de carga: el nivel uno, corresponde a una carga lenta o de baja potencia y contempla una

recarga completa, de 0% a 100%, entre 11-36 horas; el nivel dos, contempla una recarga completa entre 2 a 6 horas; el nivel tres, es considerado como carga rápida y contempla un tiempo de recarga entre 0.5 a 2 horas. Es importante mencionar que no todas las baterías soportan un tercer nivel de carga.

Por lo que se refiere, al diseño de controladores basados en pasividad, Serra and De Angelo (2021) describe el diseño de un controlador para la carga de baterías de vehículos eléctricos. Su esquema consiste en un control no lineal basado en pasividad denominado: asignación de interconexión y amortiguamiento (IDA), para el protocolo corriente constante y voltaje constante.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera, la segunda sección aborda el modelo promedio del circuito de carga, la tercera sección presenta el diseño del control basado en pasividad, así como la estimación de la resistencia interna de la batería para el cálculo de las referencias deseadas. La cuarta sección se presentan los resultados a nivel simulación del circuito de carga, mientras la quinta sección se muestran los resultados

experimentales. Finalmente, en la sexta sección se dan las conclusiones de todo el trabajo.

1.1 Contribución

Se diseña e implementa un cargador de baterías de Ion-Litio para el modelo 18650 de la firma PKCELL, con un voltaje nominal de 3.7 V y una capacidad de 2600 mAh, que a través de un convertidor CD-CD tipo reductor y un control basado en pasividad operado bajo el protocolo corriente constante-voltaje constante en el segundo nivel de carga y considerando como modelo de batería la resistencia interna en serie con una fuente de voltaje, se consigue cargar la batería en un menor tiempo frente a un cargador comercial de la marca Steren modelo CRG-261.

2. MODELO PROMEDIO DEL CIRCUITO DE CARGA

El sistema de carga para la batería, se basa en un convertidor de potencia CD-CD tipo reductor (Buck) conectado en paralelo con la batería de ion litio, tal como se muestra en la Fig. 1. En este contexto, se agrega un diodo de protección (D_p) al circuito, con la finalidad de prevenir un flujo de corriente de retroceso de la batería hacia el convertidor.

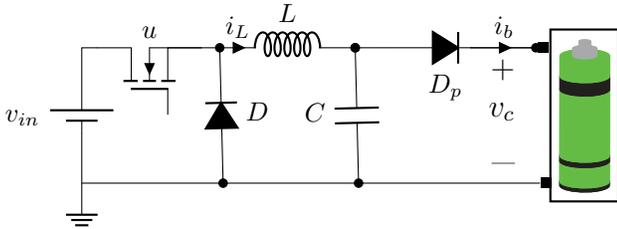


Fig. 1. Circuito de carga propuesto.

Donde v_{in} es la alimentación del convertidor, i_L la corriente del inductor L , i_b es la corriente de carga de la batería y v_c el voltaje de salida del capacitor C . La entrada de control se denota con la variable u , la cual representa la posición del interruptor que toma valores en el conjunto discreto $\{0, 1\}$ y esta se produce a través de la técnica PWM (Pulse Width Modulation).

Con respecto, a la Figura 2 se muestra el circuito equivalente para el modelo promedio del convertidor Buck y del modelo de la batería real, compuesto por una fuente de voltaje (v_{batt}) conectada en serie con una resistencia (R_{int}), que actúa como resistencia interna. Donde u_{av} es la entrada de control promedio que toma valores en el intervalo cerrado $[0, 1]$ y C el valor nominal del capacitor.

Aplicando las leyes de voltaje y corriente de Kirchoff al circuito equivalente de la Fig. 2, se obtiene el siguiente modelo promedio:

$$L \frac{di_L}{dt} = -v_c + v_{in} u_{av} \quad (1)$$

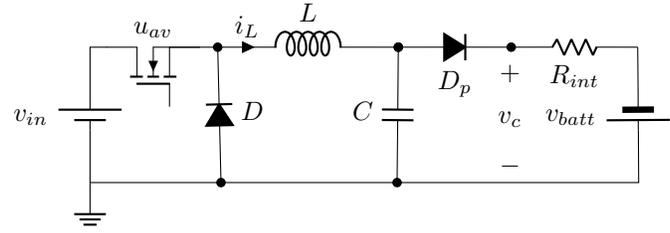


Fig. 2. Circuito equivalente del sistema de cargador de batería.

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_L - \left(\frac{1}{R_{int}} \right) v_c + \frac{v_{batt}}{R_{int}} \quad (2)$$

3. CONTROL BASADO EN PASIVIDAD PARA EL CIRCUITO DE CARGA

La siguiente propuesta de control se basa en la técnica conocida con el nombre de *retroalimentación de la salida pasiva del error exacto* dada a conocer por Sira-Ramirez and Silva-Ortigoza (2006). De tal manera que el modelo promedio dado en (1)-(2) se representa en su forma pasiva como sigue:

$$A\dot{x} = Jx - Rx + \epsilon u_{av} + \eta \quad (3)$$

siendo:

$$x = (v_c, i_L)^T \in \mathbf{R}^2 \quad (4)$$

$$J = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{int}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\epsilon = (v_{in} \ 0)^T \quad (7)$$

$$\eta = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v_{batt}}{R_{int}} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Donde la matriz J es una matriz antisimétrica $J = -J^T$ y corresponde a la matriz no disipativa o la matriz que acumula energía; La matriz R es simétrica, semi-definida positiva y corresponde a la matriz disipativa de energía, i.e., $R = R^T \geq 0$. Del mismo modo, el vector ϵ incluye las entradas de voltaje al sistema y el vector η representa la corriente de carga de la batería.

En función de lo planteado, se propone la siguiente dinámica de referencia deseada:

$$A\dot{x}^* = Jx^* - Rx^* + \epsilon u_{av}^* + \eta \quad (9)$$

donde u_{av}^* es la entrada de control de referencia deseada, x^* es el vector de estado de referencia deseado, ϵ es el vector que contiene el valor nominal de las entradas de voltaje y η es el vector de entrada que contiene el valor de la corriente de carga de la batería.

Restando miembro a miembro (3) con (9), se obtiene la dinámica del error, la cual está asociada a la función de almacenamiento de la energía del sistema. Por consiguiente, se define al vector de error de estado como:

$e = x - x^*$, siendo su derivada del error $\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}^*$, mientras que el error de la entrada de control se define como: $e_u = u_{av} - u_{av}^*$ (Linares-Flores et al. (2021)), de ahí se obtiene lo siguiente:

$$A\dot{e} = A\dot{x} - A\dot{x}^* \quad (10)$$

$$A\dot{e} = Jx - Rx + \epsilon u_{av} + \eta - Jx^* - (-Rx^*) - \epsilon u_{av}^* - \eta \quad (11)$$

$$A\dot{e} = Je - Re + \epsilon e_u \quad (12)$$

A partir de esta dinámica se propone una función candidata de Lyapunov para garantizar la estabilidad del sistema en lazo cerrado. Por lo tanto, se tiene la siguiente función candidata de Lyapunov definida positiva.

$$V = \frac{1}{2}e^T A e > 0 \quad (13)$$

Para garantizar, la estabilidad asintótica del sistema se calcula la derivada con respecto al tiempo de (13) obteniendo,

$$\dot{V}(e) = e^T A \dot{e} \quad (14)$$

Sustituyendo (12) en (14), se produce lo siguiente:

$$\dot{V}(e) = e^T J e - e^T R e + e^T \epsilon e_u \quad (15)$$

La matriz conservativa J satisface: $e^T J e = 0$, tal como se muestra en Sira-Ramirez and Silva-Ortigoza (2006) y Flores et al. (2011), por lo tanto el termino $e^T e$ se cancela y en consecuencia, la ecuación (15) se reduce a,

$$\dot{V}(e) = -e^T R e + e^T \epsilon e_u \quad (16)$$

Ahora, como se hace uso del segundo método de Lyapunov se dice que el sistema es asintóticamente estable si y solo si $\dot{V} < 0$. Por lo tanto, la ecuación (16) cumple la premisa anterior, si y solo si, la ecuación (17) es válida.

$$e^T \epsilon e_u \leq 0 \quad (17)$$

Por consiguiente, el término que hace válida la ecuación (17), es el error de la entrada de control promedio, ya que, $-e^T R e$ es negativo. Por lo tanto, se propone una ley de control por retroalimentación de la salida pasiva del error exacto, y está es:

$$e_u = -e_y = -\gamma \epsilon^T e \quad (18)$$

Sustituyendo (18) en (16)

$$\dot{V}(e) = -e^T R e - e^T \underbrace{\epsilon \gamma \epsilon^T}_{R_a} e \quad (19)$$

$$\dot{V}(e) = -e^T \underbrace{(R + R_a)}_{:=\tilde{R}} e \quad (20)$$

donde,

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} \gamma E^2 & 0 \\ 0 & R_{int} \end{bmatrix} \quad (21)$$

En este contexto, \tilde{R} es una matriz definida positiva por el criterio de Sylvester (Linares-Flores et al. (2021)). Por lo tanto, la ecuación (20) es definida negativa cuando el vector de estado del error, $e(t)$, no solamente está acotado sino que es convergente a cero asintóticamente (Marquez (2003)). En otras palabras, el sistema en lazo cerrado es

asintóticamente estable cuando la evolución del vector de error tiende a cero.

A partir de (18), y sustituyendo cada uno de los elementos que conforman a los vectores de entrada del sistema, y considerando i_L^* como la corriente deseada en el inductor, v_c^* el voltaje de salida deseado se tiene lo siguiente

$$e_u = -\gamma [v_{in} \ 0] \begin{bmatrix} i_L - i_L^* \\ v_c - v_c^* \end{bmatrix} \quad (22)$$

donde,

$$e_u = -\gamma v_{in} (i_L - i_L^*) \quad (23)$$

Siendo $e_u = u_{av} - u_{av}^*$. De ahí, la ley de control por retroalimentación de la salida pasiva, está dada por:

$$u_{av} = u_{av}^* - \gamma v_{in} (i_L - i_L^*) \quad (24)$$

donde, el valor de la ganancia del controlador γ debe ser positiva: $\gamma > 0$.

3.1 Cálculo de los puntos de equilibrio para el sistema de carga

A partir de la consulta realizada al trabajo publicado por Baceiredo (2016) para calcular los puntos de equilibrio del sistema dado en (1-2), en principio se iguala la ecuación (1) a cero y se despeja el valor de la entrada de control promedio u_{av} , dado como:

$$u_{av}^* = \frac{v_c^*}{v_{in}} \quad (25)$$

Sin embargo, cuando la señal de control promedio u_{av} es igual a la referencia deseada promedio u_{av}^* , la dinámica de la corriente se reduce a cero. Puesto que, llega al equilibrio y en consecuencia no existe variación de corriente en el inductor. De ahí, que se tiene lo siguiente

$$\frac{di_L}{dt} = 0 \quad (26)$$

El objetivo principal del controlador, es regular la corriente de carga a la batería, al integrar con respecto al tiempo ambos lados de la ecuación (26), se observa que la corriente es una constante, que puede ser definida por el usuario.

$$\int \frac{di_L}{dt} dt = \int 0 \Rightarrow i_L^* = K \quad (27)$$

Por otro lado, al igualar (2) a cero y despejar v_c , se obtiene el punto de equilibrio del voltaje de salida del convertidor.

$$v_c^* = i_L^* R_{int} + v_{batt} \quad (28)$$

Sustituyendo (27) en (28), se produce lo siguiente:

$$v_c^* = K R_{int} + v_{batt} \quad (29)$$

Este voltaje de referencia deseado está representado en función de la corriente deseada (K), la resistencia interna de la batería y el voltaje de la batería en circuito abierto.

3.2 Estimación de la resistencia interna

Con respecto, al parámetro en cuestión se propone el circuito de la Figura 3, que consta de un resistor R_L en paralelo con la batería. El objetivo, es descargar la batería

para encontrar la corriente de carga y al aplicar ley de voltajes de Kirchoff sobre el circuito, encontrar la R_{int} de la batería (ecuación 30). Sin embargo, la tensión v_L y v_{bat} son las mismas, haciendo cero el valor de R_{int} .

$$-v_{bat} + R_{int}i_L + v_L = 0 \quad (30)$$

En este contexto, cuando se conecta una carga a la

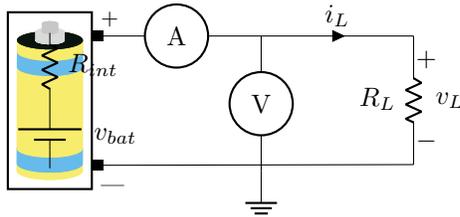


Fig. 3. Circuito para la estimación experimental de la resistencia interna de la batería.

batería, existe una caída de voltaje producto de la resistencia interna R_{int} . Es decir, el voltaje con carga R_L (voltaje a circuito cerrado $v_{cc}=v_L$) es diferente al voltaje sin ninguna carga (voltaje a circuito abierto $v_{ca}=v_{batc}$). Por lo tanto, se propone el circuito de la Figura 4, compuesto por un interruptor (w) que impide el flujo de corriente a la carga R_L ($w = 0$) en un tiempo establecido de 5 segundos, permitiendo medir v_{ca} . Posteriormente, se vuelve a conectar la carga ($w = 1$) por un periodo de 55 segundos permitiendo medir v_{cc} .

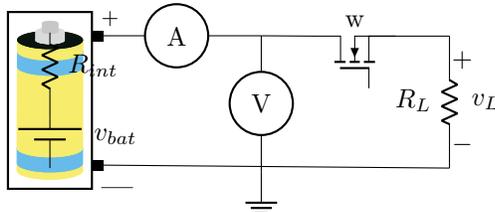


Fig. 4. Circuito para la estimación experimental de la resistencia interna de la batería.

En consecuencia, la ecuación 30 se transforma en:

$$-v_{ca} + R_{int}i_L + v_{cc} = 0 \quad (31)$$

Despejando, el valor de la resistencia interna, se obtiene:

$$R_{int} = \frac{v_{ca} - v_{cc}}{i_L} \quad (32)$$

Con el fin de observar el comportamiento de la resistencia interna durante todo el proceso de descarga, se repitió el procedimiento de encender y apagar el interruptor hasta alcanzar 2.7 V. Obtenido como resultado, la Figura 8(a), del cual se puede concluir que el valor de R_{int} permanece parcialmente constante, por lo tanto, se toma como promedio un valor de 0.25 Ω .

4. SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN EL PROGRAMA MATLAB/SIMULINK

El modelo usado para la representación de una batería de Ion-Litio, es el modelo Shepherd propuesto en el trabajo

publicado por Tremblay and Dessaint (2009) y empleado en Matlab/Simulink, para su esquemático de batería.

Los parámetros del modelo Shepherd usados en el bloque de Matlab/Simulink fueron obtenidos mediante la metodología propuesta en Tremblay and Dessaint (2009). El cual considera, la extracción de 3 puntos de las curvas de descarga voltaje-capacidad, obtenidas mediante pruebas de descarga de la batería.

De ahí, los resultados para el diagrama esquemático de batería en el software Matlab/Simulink son un voltaje nominal de 2.917 V con una capacidad de 2.4268 Ah, una máxima capacidad de 2.6 Ah, un voltaje de corte de 1.6422 V, un valor máximo voltaje de carga de 3.8661 V, una corriente nominal de descarga de 0.6 A, una resistencia interna de 0.25 Ω , con una Capacidad nominal en el punto de voltaje nominal de 2.3043 Ah, y finalmente una Zona exponencial de [3.6608 V 0.4658 A].

En relación con la idea anterior, el diagrama de conexión entre el convertidor CD-CD tipo reductor conectado en paralelo a la batería se muestra en la Fig. 5. Mientras que los valores de simulación son Fuente de alimentación de 12 V, un inductor de 700 μ H; un Capacitor de 220 μ F y una corriente de referencia de 0.65 A. La Figura 6 muestra

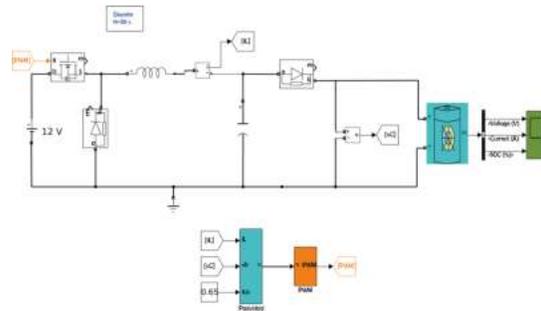


Fig. 5. Esquemático del circuito de carga en Matlab/Simulink.

las respuestas de corriente en el inductor y voltaje de la batería cuando es cargada. Se observa, que el sistema propuesto cumple con el requerimiento de voltaje para cargar la batería entre 2.7 V y 4.2 V, con ello se logra mantener una de corriente constante. Sin embargo, la corriente en el inductor (ver Figura (6(b))), es ligeramente menor a su referencia deseada por lo que es necesario considerar un nivel de offset en la referencia de corriente.

5. PLATAFORMA EXPERIMENTAL DEL CIRCUITO DE CARGA

El voltaje adecuado para la carga de baterías de Ion-Litio, se localiza en un rango de 4.2 V y 2.7 V, por lo que, se selecciono un voltaje de alimentación de 12 V. En este sentido, el ciclo de trabajo que corresponde al rango de voltaje de carga de las baterías, es el siguiente [Hart et al. (2001)]:

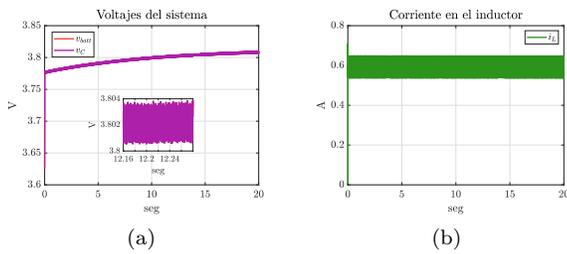


Fig. 6. Respuesta de a) voltaje y b) corriente de la batería del circuito de carga.

$$D_{max} = \frac{v_1}{v_{in}} = \frac{4.2}{12} = 0.35 \quad (33)$$

$$D_{min} = \frac{v_1}{v_{in}} = \frac{2.7}{12} = 0.225 \quad (34)$$

Referente al valor mínimo de inductancia (L_{min}) del convertidor para que el convertidor opere en MCC (Modo de Conducción Continua), se obtuvo al sustituir el resistor R de la ecuación 35 2 por $R = \frac{v_c}{i_b}$. Por lo tanto, L_{min} se calcula de la siguiente forma:

$$L_{min}(i_L) = \frac{(1-D)R}{2f} = \frac{(1-D_{max})\left(\frac{v_o}{i_L}\right)}{2f} \quad (35)$$

Se observa en (35) que la inductancia crítica (L_{min}) está en función de la corriente (i_L). Considerando una corriente máxima de operación de 0.65 A, se selecciona un inductor (L) con un valor nominal de 700 μ H con la finalidad de garantizar el MCC del convertidor CD-CD tipo reductor.

En seguida se calcula el valor nominal del capacitor mediante la ecuación (36), la cual fue obtenida en [Hart et al. (2001)]. Donde el valor nominal obtenido es de 182 μ F, sin embargo este valor no es del tipo comercial, por consiguiente se seleccionó un valor de $C = 220 \mu$ F.

$$C_{min} = \frac{1-D_{max}}{8L\left(\frac{\Delta v_o}{v_o}\right)f^2} \quad (36)$$

$$C_{min} = \frac{1-0.35}{8 * 700\mu H * 3e-4 * (45000)^2} = 191\mu F \quad (37)$$

Para verificar el desempeño del cargador propuesto, se implementa la plataforma experimental mostrada en la Figura 7. La Tabla 1 muestra la lista de los dispositivos utilizados con su respectivo valor nominal. La lógica del controlador se programó en la tarjeta DSP C2000 Delfino TMS320F28335 de la firma Texas Instruments.

Tabla 1. Componentes del circuito eléctrico.

Nombre	Valor
Diode del convertidor (D)	Modelo MUR1510G
Sensor de corriente	Modelo: ACS712
1 Capacitor (C)	220 μ F
Diode de protección (D_p)	Modelo: 1N4728
Inductor (L)	700 μ H
MOSFET	Modelo: IRF640
Driver: Optoacoplador	Modelo: FOD3182TV

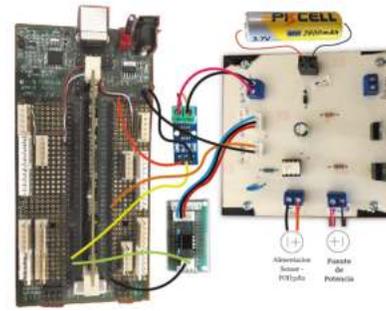


Fig. 7. Diagrama de conexión del cargador y DSP.

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En las pruebas realizadas, se utilizó una batería de Ion de Litio, modelo 18650 de la marca PKCELL, con un voltaje nominal de 3.7 V y una capacidad de 2600 mAh . A la que se obtuvo, su resistencia interna mediante la descarga con dos resistores en paralelo de valor nominal de 10 Ω , con la finalidad, de obtener una corriente de descarga promedio de 0.65 A y hasta alcanzar un voltaje de 3.1 V. La Figura 8(a) muestra el valor de la resistencia interna a medida que se descarga la batería. se observa que el valor decrece cuando ésta pierde capacidad. Para fines prácticos se escoge un valor nominal de 0.25 Ω .

El proceso de carga contempla 24 horas después de la descarga y dos etapas o protocolos: el primero es por seguimiento de corriente constante y el segundo por seguimiento de voltaje constante. Para la fase de corriente constante, a través del controlador pasivo se establece una trayectoria de corriente de referencia deseada que utiliza un polinomio Bézier, donde se considera como corriente inicial: 0.05 A y como corriente final: 0.65 A (Figura 9(b)). Posteriormente, cuando la batería alcanza un voltaje de 4.01 V, se activa el seguimiento de voltaje mediante una perfil de corriente que depende del voltaje de la batería. Es decir, el controlador pasivo sigue recibiendo una referencia de corriente deseada, pero la corriente está en función del voltaje de la batería.

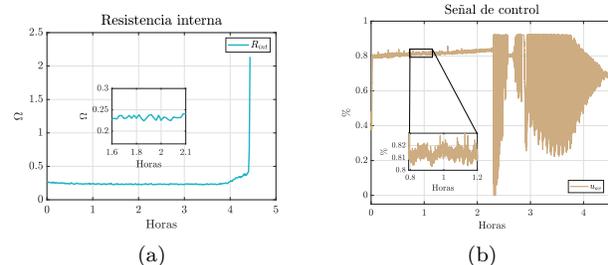


Fig. 8. a) Resistencia interna de la pila y b) señal de control.

El cargador comercial, que se utilizó fue el modelo CRG-261 de la marca Steren, cuyas especificaciones técnicas mencionan que permite cargar baterías de Ion-Litio modelo 18650 y otros modelos. Para obtener el valor de la corriente y voltaje de la batería durante el proceso

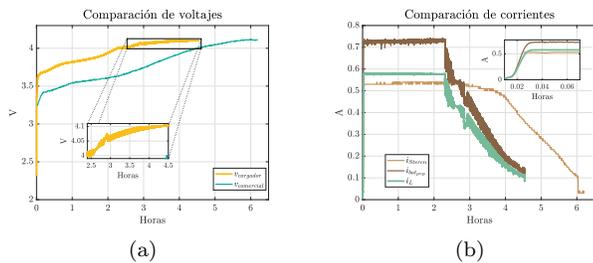


Fig. 9. Respuesta de a) voltaje en la pila y b) corriente en el inductor, en el cargador propuesto.

de carga, se conectaron en las terminales de salida del cargador el sensor de corriente y voltaje y se utilizó como tarjeta de adquisición de datos el circuito integrado Arduino Mega 2560, con una tasa de muestreo de 1 muestra/minuto.

En los resultados obtenidos, se observa en la señal de control (Figura 8(b)), oscilaciones cuando se activa el control por seguimiento de voltaje, mismas que se reducen cuando se aproxima al voltaje máximo de carga (4.15 V). Respecto a la Figura 9(a), se muestra la comparativa de las tensiones del cargador propuesto ($v_{cargador}$) frente a la del cargador comercial de la marca Steren ($v_{comercial}$). Se observa, que el voltaje del cargador propuesto es mayor que el del cargador comercial marca Steren en todo el proceso de carga. Lo anterior, se debe a una mayor corriente de carga (i_b) (Figura 9(b)) lo que provoca que la batería se cargue más rápido y en consecuencia tenga un mayor crecimiento de voltaje.

Con respecto, a los resultados de la Figura 9(b), se observan tres señales correspondientes a la corriente de carga del cargador comercial Steren (i_{Steren}), corriente del cargador propuesto en la batería (i_b) y corriente en el inductor (i_L). En primer lugar, en todos los casos se observa un perfil de corriente constante seguido de una disminución de corriente, producto de la etapa de seguimiento de voltaje constante, por lo que se concluye que el controlador pasivo permite cargar la batería en ambos protocolos (CC-VC). Simultáneamente, el cargador de la marca Steren cumple con las especificaciones técnicas de cargar la batería con una corriente de 0.5 A. Otro punto adicional, es el tiempo de carga, en el que la carga por corriente constante tarda alrededor de 2.3 horas para el cargador propuesto y 3 horas para el cargador de la marca Steren, mientras que en seguimiento de voltaje constante es de 2.25 horas para cargador propuesto y 3.05 horas para cargador de la marca Steren. Por lo tanto, el tiempo total para completar la carga de la batería o alcanzar un voltaje de 4.12 V (Figura 9(a)) fue de 4.55 horas para el cargador propuesto y 6.05 horas para el cargador comercial.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño e implementación de un cargador de baterías de Ion-Litio, mediante el esquema de control: por retroalimentación de la salida pasiva del

error exacto. La propuesta de control considera el uso de convertidor CD-CD tipo reductor, donde los puntos de equilibrio están función en función de la resistencia interna de la batería, el voltaje de la batería y la corriente deseada.

Con base a los resultados obtenidos, se concluye que el cargador propuesto, permite cargar una batería bajo el protocolo corriente-constante y voltaje-constante con una reducción en tiempo de 1.5 horas con respecto al cargador comercial de la marca Steren modelo CRG-261, considerando una referencia de corriente constante de aproximadamente 0.65 A.

Una de las ventajas de la propuesta, es la facilidad en la implementación de la ley de control y que ofrece un excelente desempeño durante el proceso de carga, en el protocolo corriente-constante voltaje-constante.

REFERENCES

- Baceiredo, A. (2016). *Diseño y realización de un cargador de baterías para la alimentación de una estación meteorológica autónoma*. Tesis de licenciatura, Universitat Rovira I Virgili.
- Flores, J.L., Avalos, J.L.B., and Espinosa, C.A.B. (2011). Passivity-based controller and online algebraic estimation of the load parameter of the dc-to-dc power converter cuk type. *IEEE Latin America Transactions*, 9(1), 784–791.
- Hart, D.W., Vuelapluma, and Bautista, A.B. (2001). *Electrónica de potencia*, volume 32. Prentice Hall Madrid, España.
- Linares-Flores, J., Hernández-Méndez, A., Juárez-Abad, J., Contreras-Ordaz, M., and García-Rodríguez, C. (2021). Mppt novel controller based on passivity for the pv solar panel-boost power converter combination. In *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 310–315. IEEE.
- Logroño, J. (2017). *Cargador de batería para vehículos*. B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Marquez, H.J. (2003). *Nonlinear control systems: analysis and design*. Hoboken John Wiley.
- Obaya, M. and Céspedes, M. (2021). Análisis de las redes globales de producción de baterías de ion de litio: implicaciones para los países del triángulo del litio.
- Serra, F.M. and De Angelo, C.H. (2021). Control de un cargador de baterías para vehículos eléctricos con factor de potencia unitario.
- Sira-Ramirez, H.J. and Silva-Ortigoza, R. (2006). *Control design techniques in power electronics devices*. Springer Science & Business Media.
- Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X., O’Kane, S., Liu, X., Chen, J., Ji, C., Endler, E., Li, R., Liu, L., et al. (2019). Lithium-ion battery fast charging: A review. *ETransportation*, 1, 100011.
- Tremblay, O. and Dessaint, L.A. (2009). Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications. *World electric vehicle journal*, 3(2), 289–298.