

Battery Charger Control Based on IDA-PBC Approach

D. Reyes Cruz* P. R. Martínez Rodríguez*
D. U. Campos Delgado* G. Vázquez** J. M. Sosa**
D. Langarica Córdoba*

* Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
San Luis Potosí, México
(email: david.reyes@ieee.org)

** Tecnológico Nacional de México / ITS de Irapuato, 36821 Irapuato,
México

Abstract: In this paper, an *interconnection and damping assignment passivity-based control* (IDA-PBC) is designed to operate the charging process of an electric vehicle (EV) battery bank using constant current and constant voltage charging modes. The battery charger is based on two power converters: a grid-tied AC-DC boost rectifier converter for power factor correction and bus voltage regulation and a battery-side DC-DC buck converter to control the charging process. The proposed IDA-PBC strategy is based on two loops: the inner (current) loop which generates the control signals used to generate the PWM signals for both converters, and the outer (voltage) loop which produces the current references to be tracked by the inner loop. Numerical simulations are performed in order to evaluate the proposed control scheme.

Keywords: IDA-PBC controller, battery charger, electric vehicles, power factor correction, battery management system.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha incrementado el desarrollo de alternativas ecológicas para disminuir el uso de combustibles fósiles en la industria automotriz. Con respecto a los vehículos eléctricos (VE), se han realizado importantes avances en el tren de potencia, la autonomía y el tiempo de carga de las baterías. En este sentido, existe un gran interés en el estudio, diseño y operación de cargadores de baterías diseñados usando convertidores electrónicos de potencia [1, 2]. En [3] se presenta el control de un cargador de baterías para vehículos eléctricos compuesto por dos etapas de conversión: un rectificador-elevador monofásico conectado a la red eléctrica con la capacidad de corrección de factor de potencia (CFP), y que además es el encargado de regular el voltaje en el bus de CD. Adicionalmente, se utiliza un convertidor reductor estándar conectado directamente al banco de baterías con el objetivo de suministrar la corriente y voltaje deseados. El controlador propuesto se basa en la estrategia IDA-PBC. El control basado en pasividad con interconexión y asignación de amortiguamiento (IDA-PBC) introducido en [4], es una técnica que utiliza la formulación de sistemas Hamiltonianos controlados por puerto (PCHS, por su siglas en inglés) para regular el comportamiento de sistemas tanto lineales como no lineales. Para el sistema bajo estudio, el esquema IDA-PBC, se conforma de dos lazos de control: el

lazo interno de corriente que genera las señales de control (que se utilizan en la modulación por ancho de pulso) para operar los convertidores y por otro lado se introduce un lazo externo de regulación de voltaje, el cual se subdivide en dos partes funcionales. Por un lado se implementa un control PI para la generación de la corriente de referencia de la red eléctrica y en consecuencia la regulación del bus de CD, y por el otro lado, se considera un sistema de gestión de baterías (SGB) que indica los niveles de corriente y voltaje relacionados con la carga del banco de baterías. El modelo dinámico que se utiliza para representar al banco de baterías es el modelo de Thévenin, el cual relaciona la corriente y el voltaje del banco con el estado de carga de forma simple [5]. La principal contribución de este trabajo de investigación es el diseño de un esquema de tipo IDA-PBC para un cargador de baterías monofásico-unidireccional y no aislado con aplicaciones a vehículos eléctricos, que incorpora el modo de carga de corriente constante (CC)- voltaje constante (VC), el cual es el más utilizado para la carga de baterías de ácido-plomo y ion-litio, debido a su simplicidad y protección contra sobrecargas y calentamiento en el banco de baterías.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la Fig 1. se muestra el cargador de baterías bajo estudio, el cual está conectado a una fuente monofásica y procesa la energía de forma unidireccional de la fuente

al vehículo (G2V). Además, no cuenta con aislamiento galvánico, por lo que es compacto, liviano y de bajo costo [3, 6]. El cargador está compuesto de dos convertidores electrónicos de potencia. Del lado de la red, se cuenta con un rectificador-elevador con un filtro inductivo L_1 a la entrada y un capacitor C_1 a la salida para generar un bus de CD regulado v_{C1} . Los objetivos del convertidor rectificador se centran en asegurar un factor de potencia unitario y proveer un voltaje regulado al convertidor reductor. Por otro lado, se considera el uso de un convertidor reductor CD-CD estándar conectado directamente al banco de baterías, el cual tiene el objetivo de transferir energía al banco de baterías usando el enfoque de CC-VC. Al aplicar las leyes de voltaje y de corriente de Kirchhoff y considerar las conmutaciones de los interruptores S_1 , S_2 y S_3 , se obtiene el siguiente modelo dinámico:

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = V_{in} - u_1 v_{C1}, \quad (1)$$

$$C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} = u_1 i_{L1} - u_2 i_{L2}, \quad (2)$$

$$L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = u_2 v_{C1} - v_{C2}, \quad (3)$$

$$C_2 \frac{dv_{C2}}{dt} = i_{L2} - i_B, \quad (4)$$

donde $i_{L1} \in \mathbb{I}_1 := (-i_p, i_p) \subset \mathbb{R}$ representa la corriente de la red eléctrica, con un valor pico i_p y v_{in} dado que $v_{in} = v_{in} \sin(\omega t)$ representa el voltaje de red. El voltaje en el bus de CD se representa por $v_{C1} \in \mathbb{V}_1 := (v_{1min}, v_{1max}) \subset \mathbb{R}_{>0}$ y su valor de capacitancia por C_1 . La corriente en el inductor L_2 del convertidor reductor es $i_{L2} \in \mathbb{I}_2 := (i_{2min}, i_{2max}) \subset \mathbb{R}_{>0}$ y el voltaje del banco de baterías es $v_{C2} \in \mathbb{V}_2 := (v_{2min}, v_{2max}) \subset \mathbb{R}_{>0}$, el cual se acopla al convertidor mediante el capacitor C_2 . Nótese que las señales de control $u_1 \in \mathbb{U}_1 := (-1, 1) \subset \mathbb{R}$ y $u_2 \in \mathbb{U}_2 := (0, 1) \subset \mathbb{R}_{>0}$ representan los ciclos de trabajo de los convertidores. Se considera el voltaje de entrada v_{in} como una señal de entrada sinusoidal de amplitud y frecuencia conocida.

Observación 2.1: El modelo del sistema en (1)-(4), captura el comportamiento promediado del sistema. El análisis de rizados de corriente en los inductores y rizados de voltaje en los capacitores, así como las guías de diseño y dimensionamiento de los convertidores está fuera del enfoque de este trabajo.

Por otro lado, con base en el modelo de baterías de Thévenin, mostrado en la Fig. 2 (a) [5], se obtiene el

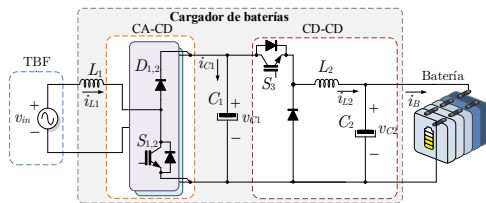
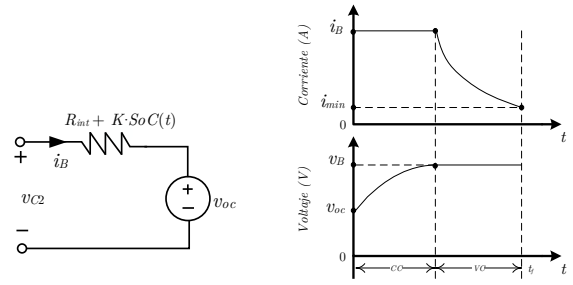


Fig. 1. Cargador de baterías unidireccional monofásico bajo estudio.

siguiente modelo dinámico de la batería:



(a) Circuito eléctrico equivalente. (b) Perfil de carga CC-VC.

Fig. 2. Modelo de batería y perfil de carga de un banco de baterías.

$$i_B(t) = \frac{v_{C2} - v_{oc}}{R_{int} + K \cdot SoC(t)}, \quad (5)$$

$$SoC(t) = SoC(t_0) - \frac{1}{Q_0} \int_{t_0}^t i_B(\tau) d\tau,$$

donde i_B representa la corriente de entrada al banco de baterías y SoC representa el estado de la carga del mismo. Los parámetros de las baterías como resistencia interna, constante de polarización, voltaje en circuito abierto y capacidad del banco en ampere/hora están definidos por R_{int} , K , v_{oc} y Q_0 respectivamente. El sistema descrito anteriormente tiene como objetivo proporcionar las condiciones adecuadas para la carga del banco de baterías y a la vez asegurar un factor de potencia unitario entre el voltaje y la corriente de la red eléctrica. En particular, el proceso de carga de las baterías se basa en la técnica de CC-CV, el cual es el más popular para las baterías de ácido-plomo y ion-litio. Como se indica en la Fig. 2 (b), el proceso comienza con una etapa inicial de carga en modo CC y finaliza con un voltaje regulado en el modo de VC, lo cual limita la sobrecarga y elevación de temperatura del banco de baterías. A continuación se derivan algunas suposiciones, las cuales están derivadas del comportamiento físico del sistema para facilitar el proceso de diseño del controlador:

- A1. El sistema se considera ideal, i.e., las resistencias parásitas en los interruptores y elementos pasivos no están consideradas.
- A2. Los parámetros del sistema L_1 , L_2 , C_1 y C_2 , al igual que los del banco de baterías R_{int} , K y Q_0 se consideran constantes conocidas que presentan una dinámica lenta.
- A3. El voltaje de la red v_{in} se considera libre de armónicos (puramente sinusoidal) y conocido con una frecuencia $f = 60$ Hz.
- A4. Un sistema de gestión de batería (SGB) proporciona los valores de referencia de corriente y voltaje durante los procesos de carga CC y VC respectivamente.

Con el fin de diseñar la estrategia de control, se establecen los siguientes objetivos de control.

- (i) *Seguimiento de la corriente de la red*: consiste en forzar a la corriente de la red i_{L1} a seguir una referencia deseada que se diseña como una señal proporcional a la componente armónica fundamental del voltaje de red. Este objetivo se expresa como,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t) = x_1^*(t) = I_d \sin(\omega t),$$

donde la variable I_d es la magnitud deseada de la corriente de referencia. Notar que la señal $\sin(\omega t)$ se asume conocida y representa la parte oscilatoria del voltaje de entrada, es decir, $v_{in} = v_{in} \sin(\omega t)$. Nótese que en la práctica, esta señal puede ser generada por un circuito de amarre de fase (PLL, por sus siglas en inglés).

- (ii) *Regulación del voltaje en el bus de CD*: se refiere a mantener controlado el comportamiento promedio del voltaje v_{C1} del bus de CD en un valor fijo $V_{CD,ref}$, es decir:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{v}_{C1}(t) = V_{CD,ref}.$$

Nótese que debido al proceso de rectificación se presentan oscilaciones armónicas a 120 Hz. en el voltaje del bus de CD v_{C1} , por lo que se hace uso de un filtro pasa bajas con una frecuencia de corte menor a 120 Hz para generar $\bar{v}_{C1}(t)$.

- (iii) *Carga de las baterías*: se desea regular la corriente del banco de baterías i_B a un valor constante deseado $I_{B,ref}$. Debido a que en estado estacionario $i_B = i_{L2}$, se propone el siguiente objetivo de control:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i_{L2}(t) = I_{B,ref}.$$

La referencia de corriente $I_{B,ref}$ para el modo CC se genera a partir de el SGB. Al inyectar una corriente constante en la batería, su valor de voltaje aumenta. Posteriormente, cuando el voltaje de la batería alcanza un valor de umbral, el cargador de baterías cambia de modo CC a modo VC. Así, la referencia de voltaje del capacitor de salida se establece en un valor constante $V_{B,ref}$. Por lo tanto, las baterías se cargan en modo VC, esto se define como,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v_{C2}(t) = V_{B,ref}.$$

Es importante aclarar que el SGB proporciona también la referencia de voltaje constante $V_{B,ref}$ durante el modo VC. De igual forma, a partir del SGB, se genera el perfil de carga CC-VC descrito en la Fig. 2 b).

3. DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL

La idea general de la estrategia IDA-PBC con base a la formulación de sistemas PCH se presenta en [7] y se fundamenta en asignar mediante la retroalimentación una función de energía deseada con un punto de equilibrio fijo x_d . Consecuentemente, la función de energía debe contar con un mínimo único en el punto de equilibrio deseado para asegurar la estabilidad del sistema. De igual forma, se considera una asignación de amortiguamiento al introducir mediante la retroalimentación, resistencias

virtuales que disipan la energía y por lo tanto controlan la razón de convergencia al punto deseado. A continuación, se detalla el diseño de la estrategia de control IDA-PBC para el sistema bajo estudio. En primer lugar, el modelo del cargador de baterías en (1)-(4) se puede representar como un sistema PCH con la siguiente estructura:

$$\dot{x} = [\mathcal{J} - \mathcal{R}] \frac{\partial \mathcal{H}(x)}{\partial x} + \mathcal{G}(x)u + \mathcal{E}, \quad (6)$$

donde $x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [i_{L1}, v_{C1}, i_{L2}, v_{C2}]^T \in \mathbb{I}_1 \times \mathbb{V}_1 \times \mathbb{I}_2 \times \mathbb{V}_1$ es el vector de estados, $u = [u_1, u_2]^T \in \mathbb{U}_1 \times \mathbb{U}_2$ es el vector de entradas de control, \mathcal{J} es la matriz de interconexión del sistema que cumple con la propiedad de antisimetría ($\mathcal{J} = -\mathcal{J}^T$), $\mathcal{R} = \mathcal{R}^T \geq 0$ es la matriz de disipación del sistema. Nótese que en este caso $\mathcal{R} = 0_{4 \times 4}$, ya que no se consideran resistencias parásitas en el sistema (suposición **A1**). Por otro lado, $\mathcal{G}(x)$ es la matriz relacionada con las variables de control y \mathcal{E} representa la entrada al sistema. Estas matrices y vectores se definen como:

$$\mathcal{J} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/L_2 C_2 \\ 0 & 0 & 1/L_2 C_2 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathcal{E} = \begin{bmatrix} v_{in}/L_1 \\ 0 \\ 0 \\ -i_B/C_2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathcal{G}(x) = \begin{bmatrix} -x_2/L_1 & 0 \\ x_1/C_1 & -x_3/C_1 \\ 0 & x_2/L_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}.$$

Por otro lado, la función de almacenamiento de energía (función Hamiltoniana) $\mathcal{H}(x) : \mathbb{I}_1 \times \mathbb{V}_1 \times \mathbb{I}_2 \times \mathbb{V}_1 \rightarrow \mathbb{R}$ queda definida como:

$$\mathcal{H}(x) = \frac{1}{2} L_1 x_1^2 + \frac{1}{2} C_1 x_2^2 + \frac{1}{2} L_2 x_3^2 + \frac{1}{2} C_2 x_4^2 \quad (8)$$

también conocida como función de Lyapunov y su gradiente resultante es $\frac{\partial \mathcal{H}(x)}{\partial x} = [L_1 x_1, C_1 x_2, L_2 x_3, C_2 x_4]^T$. Con la intención de sintetizar una ley de control u , se propone la dinámica del comportamiento deseado en lazo cerrado como [8, 9, 10]:

$$\dot{x} = [\mathcal{J}_d - \mathcal{R}_d] \frac{\partial \mathcal{H}_d(x)}{\partial x}, \quad (9)$$

donde $\mathcal{J}_d = \mathcal{J} + \mathcal{J}_n = -\mathcal{J}_d^T$ es la matriz deseada de interconexión y $\mathcal{R}_d = \mathcal{R} + \mathcal{R}_n > 0$ es la matriz deseada de disipación. La función de almacenamiento de energía deseada se define en función de los errores de control, esto es

$$\mathcal{H}_d(\tilde{x}) = \frac{1}{2} L_1 \tilde{x}_1^2 + \frac{1}{2} C_1 \tilde{x}_2^2 + \frac{1}{2} L_2 \tilde{x}_3^2 + \frac{1}{2} C_2 \tilde{x}_4^2 \quad (10)$$

donde

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= (x_1 - x_1^*), & \tilde{x}_2 &= (x_2 - x_2^*) \\ \tilde{x}_3 &= (x_3 - I_{B,ref}), & \tilde{x}_4 &= (x_4 - V_{B,ref}). \end{aligned} \quad (11)$$

Como se mencionó anteriormente, $I_{B,ref}$ y $V_{B,ref}$ representan las referencias de corriente y voltaje presentes en los modos de CC y VC. En este contexto, se definen las matrices de interconexión y amortiguamiento deseada como se indica a continuación:

$$\mathcal{J}_d = \mathcal{J} + \mathcal{J}_n = \begin{bmatrix} 0 & -j_1 & 0 & 0 \\ j_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{1}{L_2 C_2} + j_2\right) \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_2 C_2} + j_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathcal{R}_d = \mathcal{R} + \mathcal{R}_n = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_4 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

donde j_1 y $j_2 \in \mathbb{R}$ son constantes de interconexión que se definen mas adelante. Al igualar (6) y (9) se obtiene:

$$[\mathcal{J}_d - \mathcal{R}_d] \frac{\partial \mathcal{H}_d(x)}{\partial x} = [\mathcal{J} - \mathcal{R}] \frac{\partial \mathcal{H}(x)}{\partial x} + \mathcal{G}(x)u + \mathcal{E}, \quad (14)$$

se deduce:

$$\mathcal{G}(x)u = [\mathcal{J}_d - \mathcal{R}_d] \frac{\partial \mathcal{H}_d(x)}{\partial x} - [\mathcal{J} - \mathcal{R}] \frac{\partial \mathcal{H}(x)}{\partial x} - \mathcal{E}. \quad (15)$$

Al expandir (15), se obtienen las siguientes ecuaciones,

$$\begin{aligned} -x_2 u_1 &= -r_1 L_1^2 \tilde{x}_1 - j_1 L_1 C_1 \tilde{x}_2 - V_{in}, \\ x_1 u_1 - x_3 u_2 &= j_1 L_1 C_1 \tilde{x}_1 - r_2 C_1^2 \tilde{x}_2, \\ x_2 u_2 &= -r_3 L_2^2 \tilde{x}_3 - \left(\frac{1}{L_2 C_2} + j_2\right) L_2 C_2 \tilde{x}_4 - x_4, \\ 0 &= \left(\frac{1}{L_2 C_2} + j_2\right) L_2 C_2 \tilde{x}_3 - r_4 C_2^2 \tilde{x}_4 + x_3 + i_B, \end{aligned} \quad (16)$$

las cuales se deben cumplir para todo el intervalo de operación para que el sistema en lazo cerrado tenga el comportamiento deseado en (9). Esto último se logra con la correcta selección de las señales de control y las referencias. Obsérvese que r_1, r_2, r_3 y r_4 son parámetros de control que inyectan amortiguamiento para mejorar el desempeño del controlador. Al considerar que $j_1 = \alpha_1/L_1 C_1$ y $j_2 = \alpha_2/L_2 C_2$ a partir de (16) se derivan las siguientes leyes de control para el lazo interno como:

$$u_1 = \frac{1}{x_2} \left(r_1 L_1^2 \tilde{x}_1 + \alpha_1 \tilde{x}_2 + V_{in} \right), \quad (17)$$

$$u_2 = \frac{1}{x_2} \left(-r_3 L_2^2 \tilde{x}_3 - \alpha_2 \tilde{x}_4 + x_4 \right). \quad (18)$$

Además de las señales de control (17) y (18), es necesario obtener el voltaje de regulación deseado x_2^* y las referencias de corriente y voltaje para los modos CC y VC de la carga de baterías. Note que x_2 pertenece al subconjunto de los números positivos mayores a cero ($\mathbb{R}_{>0}$), por lo tanto, (17) y (18) no presentan singularidad. Estas se definen con base en (16) como se explica a continuación.

A. Carga de baterías.

La carga de baterías se realiza con base al algoritmo de carga CC-VC. En este sentido, durante el modo CC el SGB proporciona una referencia de corriente constante, mientras que el voltaje del banco de baterías x_4 comienza a ascender hasta alcanzar un valor de umbral. Posteriormente cambia de modo CC a modo VC. De (16) se determina el voltaje

de referencia $V_{B,ref}$ cuando la carga de baterías se encuentra en modo CC, como sigue:

$$V_{B,ref} = x_4 + \frac{1}{r_4 C_2^2} \left(I_{B,ref} - i_B \right). \quad (19)$$

Por otro lado, durante el modo VC, el voltaje se mantiene fijo en el valor de $V_{B,ref}$ y la referencia de corriente $I_{B,ref}$ se obtiene a través de (16), como sigue,

$$I_{B,ref} = -r_4 C_2^2 \tilde{x}_4 + i_B. \quad (20)$$

Es importante aclarar que las referencias constantes de corriente y voltaje durante el modo CC y VC las genera el SBG, como se muestra en el diagrama de control de la Fig 3.

B. Voltaje de regulación en bus de CD.

El voltaje de regulación x_2^* se obtiene a través de (16), y se define como:

$$\begin{aligned} x_2^* &= \frac{1}{\alpha_1 x_1 + r_2 C_1^2 x_2} \left(x_1 (r_1 L_1^2 \tilde{x}_1 + \alpha_1 x_2 + V_{in}) \right. \\ &\quad \left. + x_2 (-x_3 u_2 - \alpha_1 \tilde{x}_1 - r_2 C_1^2 x_2) \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Nótese que la referencia de voltaje del bus de CD no presenta singularidad por parte de la corriente x_1 y el voltaje x_2 , ya que ambas pertenecen a los reales positivos, de igual manera si se seleccionan las ganancias de tal forma que $r_2/\alpha_1 > i_p/(v_{1,min} C_1^2)$.

C. Seguimiento de corriente de la red

El objetivo es asegurar que la corriente de la red eléctrica siga a una referencia deseada diseñada a partir de una señal proporcional a la componente fundamental del voltaje de la red. La amplitud I_d de corriente de referencia deseada x_1^* se genera con base en una acción proporcional-integral sobre el voltaje $\bar{v}_{C1} = \bar{x}_2$ y el voltaje de referencia $V_{CD,ref}$, esto es

$$I_d = K_p e + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (22)$$

donde $e = V_{CD,ref} - \bar{x}_2$ es el error de regulación de voltaje y K_p y K_i son ganancias positivas de control. Es importante mencionar que debido al proceso de rectificación el voltaje en x_2 , este contiene ondulaciones armónicas de 120 Hz, por lo tanto, el voltaje x_2 pasa por un filtro pasa-bajas para mitigar la perturbación armónica y en consecuencia se genera \bar{x}_2 . El esquema general del cargador de baterías propuesto se muestra en Fig. 3. La estabilidad del sistema cerrado se analiza al definir la función de energía \mathcal{H}_d en (10) como una función candidata de Lyapunov, i.e. $V(x) = \mathcal{H}_d(x)$. Nótese que $V(0) = 0$ cuando $x = x_d$ y $V(x) > 0 \forall x \neq x_d$, [9, 11]. En este contexto, al obtener la derivada $V(x)$ a lo largo de las trayectorias del sistema en lazo cerrado se obtiene,

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \frac{d\mathcal{H}_d(x)}{dt} = \frac{\partial \mathcal{H}_d(x)}{\partial x}^\top \frac{dx}{dt} \\ &= \frac{\partial \mathcal{H}_d(x)}{\partial x}^\top [\mathcal{J}_d - \mathcal{R}_d] \frac{\partial \mathcal{H}_d(x)}{\partial x}. \end{aligned} \quad (23)$$

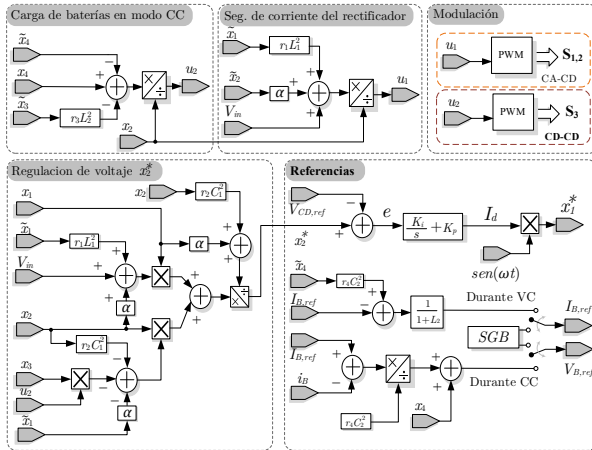


Fig. 3. Diagrama de control propuesto para el cargador de baterías

Por lo tanto, al definir $\mathcal{R}_d > 0$ y considerar la propiedad de antisimetría de \mathcal{J}_d , se obtiene: $\dot{V}(x) = -\frac{\partial \mathcal{H}_d(x)}{\partial x} \mathcal{R}_d \frac{\partial \mathcal{H}_d(x)}{\partial x} < 0, \forall t \geq 0$. Lo anterior indica que el error de control \tilde{x} converge al origen asintóticamente, por lo que $x = x_d$ cuando $t \rightarrow \infty$ [11].

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

A partir del análisis del sistema descrito en la Fig. 1, además de las leyes de control propuestas para alcanzar los objetivos deseados, se realizan simulaciones numéricas para validar la estrategia de control para el perfil de carga del banco de baterías. Los parámetros de las baterías se muestran en la Tabla 1, mientras que las ganancias de control se muestran en la Tabla 3.

Tabla 1. Parámetros del sistema.

Parámetros	Valores
L_1	600 μH
L_2	512.8 μH
C_1	1400 μF
C_2	50 μF
v_{in}	120 V_{RMS} - 60 Hz
$V_{CD,ref}$	300 V
$I_{B,ref}$	12.65 A
$V_{B,ref}$	148 V
R_{int}	1.1 Ω
K	4
Q_0	99 Ah
V_{ov}	105 V

En la Fig. 4 se muestra el seguimiento de corriente. Se puede observar que la corriente x_1 sigue a la referencia x_1^* , además de estar en fase con el voltaje de entrada v_{in} ,

Tabla 2. Parámetros de control.

Ganancia proporcional	K_{p1}	0.56
Ganancia integral	K_{i1}	5.7
Iny. de amort. 1	r_1	9×10^6
Iny. de amort. 2	r_2	1×10^5
Iny. de amort. 3	r_3	9×10^3
Iny. de amort. 4	r_4	1×10^3

lo que indica un factor de potencia cercano a la unidad. Además se tiene, que el voltaje de la red v_{in} está escalado en un factor 1/20 con el objetivo de apreciar mejor el cruce por cero de las variables. En la Fig. 5 se observa

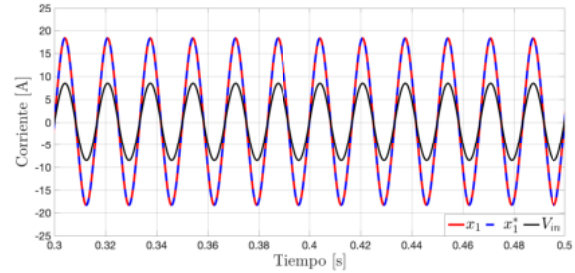


Fig. 4. Corriente de entrada x_1 , corriente de referencia x_1^* y voltaje de entrada v_{in} .

la regulación del voltaje del bus de CD. El voltaje de referencia $V_{CD,ref}$ se fija en 300 V. Obsérvese que están presentes las ondulaciones armónicas producidas por el proceso de rectificación. Sin embargo, estas ondulaciones no afectan al proceso de carga de la batería debido a las acciones de control aplicadas a la corriente y al voltaje en el banco de baterías. Sin embargo, es posible reducir la amplitud de estas ondulaciones mediante la selección de un capacitor C_1 con mayor capacidad, sin embargo esto elevaría el costo y el peso del sistema, lo cual no es deseable. Para la carga de baterías, se utiliza el perfil

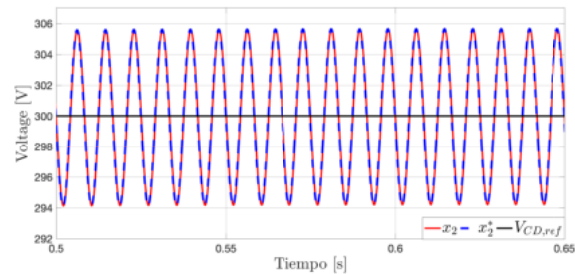


Fig. 5. Voltaje del bus de CD x_2 , voltaje de referencia x_2^* y voltaje de referencia $V_{CD,ref}$.

CC-VC. En este sentido, la etapa de CC se muestra en la Fig 6, la cual consiste en alimentar el banco de baterías con una corriente de referencia constante $I_{B,ref}$; cuando la etapa de CC termina, en la misma figura se observa la disminución de la corriente x_3 hasta llegar a un punto mínimo. En este punto, se considera que el banco de batería está completamente cargado. En la Fig. 7 se

observa que durante la etapa de CC el voltaje de la batería aumenta hasta un punto de referencia $V_{B,ref}$. En este punto, la etapa de CC termina y se inicia la etapa de VC, donde, el voltaje de la batería x_4 permanece constante. Nótese que el tiempo de carga se encuentra escalado 1/128, esto para reducir el tiempo de procesamiento de cómputo.

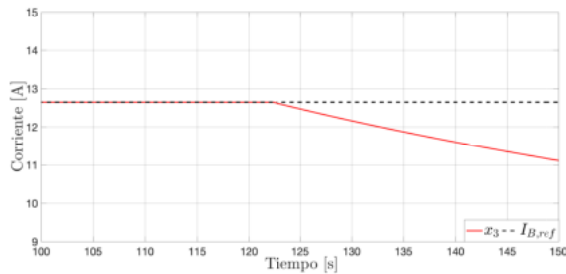


Fig. 6. Corriente de referencia $I_{B,ref}$ y corriente de la batería x_3 .

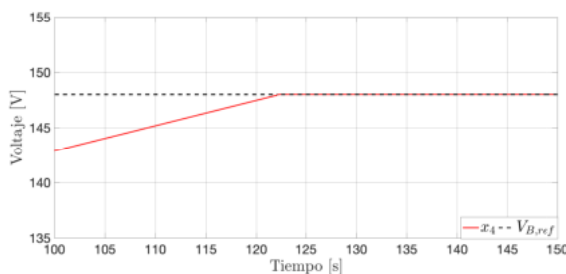


Fig. 7. Voltaje $V_{B,ref}$ y x_4 .

5. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se presenta una solución al problema de control de la operación de un cargador de baterías para vehículos eléctricos. Esta solución se basa en la aplicación de una estrategia de control de tipo IDA-PBC, la cual asegura una correcta operación del sistema y sólo impone una condición no conservativa entre las ganancias de control. El controlador propuesto implementa dos lazos de control. El lazo interno de corriente que generan las señales de conmutación para operar los convertidores y por otro lado se diseña un lazo externo de regulación de voltaje, el cual se puede dividir a su vez en dos partes. Del lado de la red eléctrica, se implementa un control de tipo PI para generar una corriente de referencia en fase con el voltaje de entrada y asegurar un factor de potencia unitario, y de lado de las baterías, se cuenta el SGB que indica los niveles de corriente y voltaje en relación a la carga del banco de baterías. Los resultados numéricos muestran un seguimiento preciso de las corrientes y una regulación apropiada de los voltajes del sistema en función del algoritmo de carga CC-VC. En el futuro se considera implementar para este esquema de control, estrategias de estimación para hacer frente a

incertidumbres paramétricas y así validar experimentalmente el controlador propuesto.

REFERENCIAS

- [1] Sebastian Rivera, Samir Kouro, Sergio Vazquez, Stefan M Goetz, Ricardo Lizana, and Enrique Romero-Cadaval. Electric vehicle charging infrastructure from grid to battery. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2021.
- [2] Christian Jung. Power up with 800-v systems: The benefits of upgrading voltage power for battery-electric passenger vehicles. *IEEE Electrification Magazine*, 5(1):53–58, 2017.
- [3] João Paulo M Figueiredo, Fernando L Tofoli, and Bruno Leonardo A Silva. A review of single-phase pfc topologies based on the boost converter. In *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications-INDUSCON 2010*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [4] Romeo Ortega, Mark W Spong, Fabio Gómez-Estern, and Guido Blankenstein. Stabilization of a class of underactuated mechanical systems via interconnection and damping assignment. *IEEE transactions on automatic control*, 47(8):1218–1233, 2002.
- [5] M Nikdel et al. Various battery models for various simulation studies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32:477–485, 2014.
- [6] Francisco Iván González Espejo. Diseño de un control no lineal para el proceso de carga de baterías con aplicación en vehículos eléctricos. Master's thesis, 2019.
- [7] Romeo Ortega, Arjan van der Schaft, Bernhard Maschke, and Gerardo Escobar. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled hamiltonian systems. *Automatica*, 38(4):585–596, 2002.
- [8] Dunstano del Puerto-Flores, Jacquelin MA Scherpen, Marco Liserre, Martijn MJ de Vries, Marco J Krasse, and Vito Giuseppe Monopoli. Passivity-based control by series/parallel damping of single-phase pwm voltage source converter. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(4):1310–1322, 2013.
- [9] Subramanya P Nagesh Rao, Gabriel AD Lopes, Dimitri Jeltsema, and Robert Babuška. Port-hamiltonian systems in adaptive and learning control: A survey. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 61(5):1223–1238, 2015.
- [10] Alejandro Donaire, Romeo Ortega, and Jose Guadalupe Romero. Simultaneous interconnection and damping assignment passivity-based control of mechanical systems using dissipative forces. *Systems & Control Letters*, 94:118–126, 2016.
- [11] I Martinez-Perez, G Espinosa-Perez, G Sandoval-Rodriguez, and A Doria-Cerezo. Ida passivity-based control of single phase back-to-back converters. In *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 74–79. IEEE, 2008.