

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO PARA EL CONTROL Y GESTIÓN DEL
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN UNA MICRORRED ELÉCTRICA****IMPLEMENTATION OF A MODULE FOR CONTROL AND MANAGEMENT
OF ENERGY STORAGE IN A IN AN ELECTRIC MICRORRED**

Ing. Nicolás Hernández Díaz*, **PhD. Aldo Pardo García***
PhD. Edgar Nelson Sánchez Camperos**, **MSc. Carlos J. Vega****,

* **Universidad de Pamplona**, Ingenierías y Arquitectura, Grupo de A&C.
Km 1 Vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Tel.: +(57) (7) 5685303, Ext. 164.

E-mail: {nicolas.hernandez, apardo13}@unipamplona.edu.co.

** **CINVESTAV Unidad Guadalajara**, Especialidad de Control Automático.
Av. del Bosque 1145, colonia el Bajío, Zapopan, 45019, Jalisco, México.
Tel: (33) 3777-3600 Fax: (33) 3777-3609.
E-mail: {sanchez, cjvega}@gdl.cinvestav.mx

Resumen: Los sistemas para la gestión del almacenamiento de energía constituyen una situación de alto auge a nivel mundial. Actualmente existen diversos tipos de baterías al igual que circuitos electrónicos para controlar la carga y descarga de baterías, esto varía conforme al tipo y requerimientos eléctricos de la aplicación; los convertidores CD-CD “Buck-Boost” de los que comercialmente se disponen, precisan dos controladores diferentes, esto se debe a que los parámetros del sistema cambian para cada modo de operación, refiérase a la inductancia y capacitancia. Se propone la implementación de un prototipo el cual consiste en un módulo de conversión de potencia con un único controlador para realizar el proceso de almacenamiento de energía eléctrica en un banco de baterías.

Palabras clave: Convertidor, control y gestión, carga y descarga de baterías.

Abstract: Systems for energy storage management are a world-wide boom. Currently there are various types of batteries as well as electronic circuits to control the charge and discharge of batteries, this varies according to the type and electrical requirements of the application; The “Buck-Boost” CD-CD converters that are commercially available, require two different controllers, this is because the system parameters change for each mode of operation, refer to the inductance and capacitance. The implementation of a prototype is proposed, which consists of a power conversion module with a single controller to carry out the process of storing electrical energy in a battery bank.

Keywords: Converter, control and management, charge and discharge of batteries

1. INTRODUCCIÓN

El uso de fuentes alternativas de energía es imperativo si se desea continuar con el estilo de vida actual. El crecimiento de la población ha causado daños muy importantes al medio ambiente y a razón del consumismo energético excesivo los combustibles fósiles se están agotando; como una alternativa factible para hacer frente a tal situación, el uso de fuentes alternativas de energía como: biocombustible, solar, eólica, entre otras, son cada vez más usadas; dichas energías pueden ser integradas de dos formas, como grandes parques conectados directamente al sistema de eléctrico o como microrredes eléctricas implementadas a nivel de sistema de distribución de energía. El último procedimiento ofrece un esquema más flexible de integración. (García López, Sánchez Camperos, & Ruiz Cruz, 2018)

Dentro de las microrredes eléctricas los dispositivos electrónicos para la gestión de almacenamiento de energía cumplen una función muy importante, ya que estos establecen la flexibilidad propia del sistema y su adecuada integración a microrredes eléctricas automatizadas (control y gestión).

A grandes rasgos, los convertidores CD-CD son dispositivos que consisten en semiconductores de potencia que se comportan como interruptores con conmutaciones de muy altas frecuencias. Es debido a esta forma de operación que se producen características no lineales en los convertidores CD-CD, lo cual no excluye al convertidor “Buck-Boost”. La implementación en tiempo real usando controladores convencionales como lo son el PID no es adecuada para este tipo de sistemas debido a la ausencia de la respuesta dinámica necesaria para alcanzar la regulación requerida del voltaje de salida. Con el objetivo de mejorar la respuesta dinámica, sistemas de control inteligente tales como el control por lógica difusa, control por redes neuronales y sus posibles combinaciones han sido reportados en (Cheng, Hsu, Lin, Lee, & Li, 2007; Ofoli & Rubaai, 2006) y estrategias de control en (Acevedo Meza, Mendoza García, & Sepúlveda Mora, 2018; T., O., E., & H., 2013).

Dada la no linealidad de los interruptores y el hecho de que el voltaje y corriente no puede repentinamente llegar a ser cero en tiempos de conmutación por posibles pérdidas de potencia (Modabbernia, 2013) y considerando que el convertidor “Buck-Boost” en este trabajo debe conducir corriente en ambos sentidos, desde y hacia el Bus de CD lo que implicaría dos controladores

diferentes, el uso de una red neuronal como identificador y un filtro de Kalman extendido para actualizar los pesos de esta red, permiten el uso de un único controlador para ambos modos.

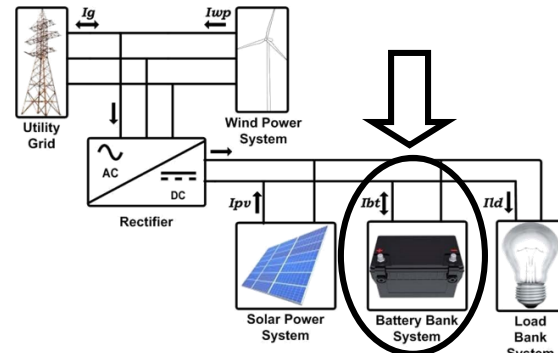


Fig. 1. Esquema de la microrred de la que se dispone, (Loza-Lopez, Loukianov, Sanchez, Ruiz-Cruz, & Sanchez-Torres, 2015).

La Fig. 1. muestra el problema que se desea tratar el cual consiste en el diseño y construcción de un dispositivo que se encargue de manejar el flujo de corriente I_{bt} , señalada con una circunferencia y una flecha, de la manera más adecuada posible.

El sumario de este trabajo es el siguiente. La sección 2 presenta los preliminares matemáticos y eléctricos de este trabajo, la sección 3 describe la instrumentación requerida y presenta los resultados obtenidos en tiempo real incluyendo el prototipo final y por último las conclusiones son presentadas en la sección 4.

2. PRELIMINARES

2.1 Matemática preliminar de control

En esta sección la matemática preliminar de control usada en el desarrollo de este trabajo será ostentada.

2.1.1. Redes Neuronales Recurrentes De Alto Orden (RHONN)

Un esquema de control basado en el modelo de la planta no puede desarrollarse debido a factores no previstos tales como las perturbaciones, parámetros inciertos y dinámica no modelada. Un modelo tipo RHONN es fácil de implementar, tiene una estructura relativamente simple y la posee la capacidad de ajustar parámetros en línea.

Considerando el problema de identificación de un sistema no lineal de tiempo discreto con perturbaciones tenemos que:

$$x_{k+1} = \bar{f}(x_k) + \bar{g}(x_k)u_k + \Gamma_k \quad (1)$$

Para identificar el sistema (1), una red neuronal recurrente de tiempo discreto según el *Modelo serie-paralelo* es definida en (Alanis, Sanchez, & Loukianov, 2007) es considerada:

$$\hat{x}_{i,k+1} = (w_{i,k})^T \rho_i(x_k) + (w_i^n)^T \Psi_i(x_k, u_k) \quad (2)$$

2.1.2. Filtro de Kalman

$$\begin{aligned} M_{i,k} &= [R_{i,k} + H_{i,k}^T P_{i,k} H_{i,k}]^{-1} \\ K_{i,k} &= P_{i,k} H_{i,k} M_{i,k} \\ w_{i,k+1} &= w_{i,k} + \eta_i K_{i,k} e_{i,k} \\ P_{i,k+1} &= P_{i,k} - K_{i,k} (H_{i,k})^T P_{i,k} + Q_{i,k} \end{aligned} \quad (3)$$

El filtro de Kalman (KF) estima los estados de un sistema lineal con estado aditivo y salida con ruidos blancos (Brown & Hwang, 1997). Para entrenamiento de redes neuronales basado en KF, los pesos de la red vienen a ser los estados a ser estimados. El error entre la salida de la red neuronal y la medición de la planta es considerado como ruido blanco aditivo. Como el mapeo de la red neuronal no es lineal, un filtro de Kalman extendido (EKF) es aplicado (E. N. Sanchez, Alanis, & Chen, 2004). El objetivo del entrenamiento es encontrar los valores óptimos de los pesos que minimicen los errores de identificación. La solución del EKF para el problema de entrenamiento esta dado por la (3).

2.1.3. Control Óptimo Inverso

El Control Optimo Inverso se presenta como la solución al principal inconveniente de resolver el problema de control óptimo, que es encontrar la solución para la ecuación HJB. La principal característica del control óptimo inverso es que el costo de operación se determina a posteriori, una vez establecida la ley de control de retroalimentación estabilizadora.

Lo que resulta en la siguiente ley de control de retroalimentación de estado:

$$\begin{aligned} \infty (\hat{x}_k) = u_k^* = & -\frac{1}{2} \left[R + \frac{1}{2} g^T(\hat{x}_k) P g(\hat{x}_k) \right]^{-1} \dots \\ & \dots g^T(\hat{x}_k) P [f(\hat{x}_k) - x_{\delta,k+1}] \end{aligned} \quad (4)$$

La profundización puede realizarse en (E. Sanchez, Ornelas-Tellez, & Safari, n.d.).

2.1 Preliminares de electrónica de potencia

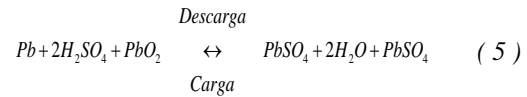
En esta sección la teoría principal acerca de los convertidores CD-CD es presentada incluyendo información relevante sobre el esquema de convertidor a usar.

2.2.1. Modulación Por Ancho De Pulso (PWM)

La Modulación por ancho de pulso (PWM) es la base para el control en la electrónica de potencia (Vasca & Iannelli, 2012). Los rápidos cambios de estados a nivel lógico aseguran que los dispositivos electrónicos que reciben la el cambio de estado se enciendan o apaguen lo suficientemente rápido minimizando el tiempo de transición de conmutación y las pérdidas de conmutación asociadas, existen tres tipos de señales portadoras, en este trabajo la señal portadora triangular es usada.

2.2.2. Baterías De Plomo-Acido

La ecuación de reacción electroquímica básica en una batería de plomo ácido se puede escribir como:



Durante la descarga, dióxido de plomo (PbO_2) es convertido en sulfato de plomo (PbSO_4) en el electrodo positivo. En el electrodo negativo plomo esponjoso (Pb) es convertido a sulfato ácido (PbSO_4). Esto provoca que el ácido sulfúrico ($2\text{H}_2\text{SO}_4$) en el electrolito sea consumido; durante la fase de recarga de la reacción, el ciclo es revertido. Para el proceso de carga y descarga de las baterías se eligió usar el método por *corriente constante* (Sillero, Nava, Gutiérrez, Nava, & López, 2018).

2.2.3. Convertidores CD-CD

Muchas aplicaciones requieren convertir a una fuente de voltaje fija en una variable (Rashid, 2011). Un convertidor CD-CD pues considerarse un transformador con relación de transformación variable. Como un transformador un convertidor CD-CD puede elevar o reducir el voltaje de entrada. Los dispositivos electrónicos que comúnmente componen a un convertidor CD-CD son: un inductor L , un capacitor C . y un diodo D_m , un componente de conmutación a altas frecuencias, en este caso el

(IGBT) transistor bipolar de puerta aislada, un voltaje de entrada V_S y una resistencia de carga R_{load} . Las diferentes interconexiones y control de estos componentes elevan o reducen el voltaje de salida en la R_{load} . Hay 4 topologías de reguladores conmutados (Severns, 2014), en este trabajo el convertidor “Buck-Boost” es usado.

Modelo del Convertidor “Buck-Boost” del Banco de Baterías

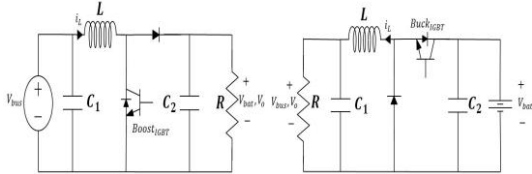


Fig. 2. Convertidor “Boost” bajo condiciones de carga y convertidor “Buck” bajo condiciones de descarga respectivamente..

La Fig. 2. Ilustra el comportamiento de convertidor “Buck-Boost” según las condiciones de carga y descarga, las ecuaciones que modelan cada estado son:

Tabla 1. Ecuaciones según modo de operación.

PARA EL MODO “BOOST”:	PARA EL MODO “BUCK”:
$\dot{x}_1 = -\frac{x_1}{R_{load}C_1} + \frac{x_2}{C_1}$	$\dot{x}_1 = -\frac{x_1}{R_{load}C_1} + \frac{x_2}{C_1}$
$\dot{x}_2 = -\frac{x_1}{L}$	$\dot{x}_2 = -\frac{x_1}{L} + \frac{V_{Bat}}{L}$

3. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO (TIEMPO REAL)

En esta sección es presentada la instrumentación y el prototipo del banco de baterías.

3.1 Controlador

El controlador aplicado debido a las no linealidades del sistema como se mencionó en el apartado *Matemática Preliminar* consta de tres herramientas, las RHONN que permiten obtener en línea un modelo aproximado de la planta, el EKF que minimiza la estimación del error de estado en ambos modos de operación del convertidor “Buck-Boost” y el control óptimo inverso que disminuye el funcional de costo del sistema.

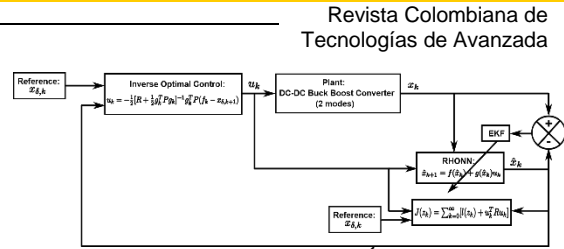


Fig. 3. Esquema de Control Óptimo Inverso (García López et al., 2018).

En la Fig. 3. cómo se puede observar aunque el convertidor “Buck-Boost” presenta dos modos de operación solo se requiere un único controlador para estabilizar la planta en cada estado, además el uso de un control óptimo inverso posibilita tanto disminuir el error de seguimiento como el gasto energético por funcionamiento, razones por las cuales se implementó este esquema de control diseñado en (García López et al., 2018).

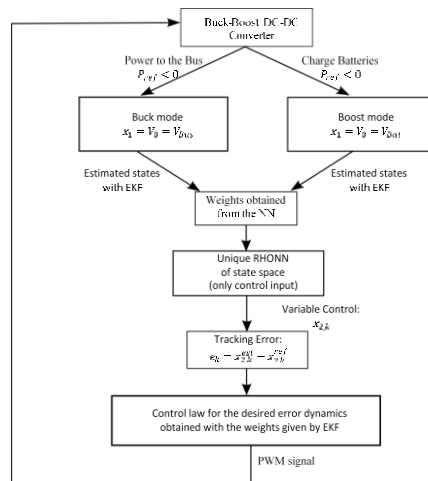


Fig. 4. Metodología de control (García López et al., 2018).

De forma descriptiva la Fig. 4. ilustra el diagrama de flujo programado para el controlador del convertidor “Buck-Boost”, en el cual, según la dirección de la corriente, que es a la vez la única entrada de control (Referencia), el control es capaz de inferir cual es el modo en el que el sistema debe operar y gracias a que los estados son estimados por medio del EKF y se obtienen los pesos de la red neuronal, un modelo aproximado de la planta puede ser estimado sin importar el modo en el que opere el sistema, de manera que el error de seguimiento sea lo más pequeño posible debido a la ley de control obtenida.

Las ecuaciones involucradas en la ley de control para la dinámica de error deseada obtenida con los pesos dados por EKF son (García López et al., 2018) refiérase a (4).

3.2 Instrumentación

El controlador desarrollado para el convertidor CD-CD “Buck-Boost” fue implementado con la tarjeta de desarrollo C2000 Piccolo LaunchPad LAUNCHXL-F28069M Fig. 3.

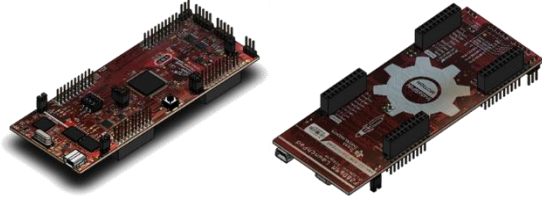


Fig. 5. Texas instruments™ F28069M launchpad modelo 3D, Diseño Propio.

Las principales características del F28069M Launchpad son (Instruments, n.d.) son: 16-canales mejorados de módulos moduladores por de ancho de pulso (ePWM), CPU a 90MHz, 16-canales de convertidores (ADC) de 12-bits análogo a digital.

La tarjeta de desarrollo F28069M launchpad se puede encontrar permite la comunicación con Matlab® y Simulink® (The MathWorks, 2017) de manera rápida y fácil ya que la metodología de programación hace uso de las librerías de Texas Instruments diseñadas especialmente para este tipo de entorno de programación.

Internamente en la placa, los datos de entrada de 12 bits obtenidos a través de los periféricos ADC son transformados a un valor de voltaje, se pasar a través de un filtro y se usa para obtener los valores de voltaje y corriente reales, necesarios para los controladores, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$V_f = 3.3 / (2^{12} - 1) \quad (6)$$

$$V_{Bus Real} = \left(\frac{30.04}{3.3} \right) * V_{f, Bus} \quad (7)$$

$$V_{Bat Real} = \left(\frac{29.76}{3.3} * V_{f, Bat} - 0.081 \right) \quad (8)$$

$$I_{real} = (2.4655 * V_{f,i} - 3.0644) \quad (9)$$

3.2.1. Convertidor CD-CD “Buck-Boost”

La Fig. 6. muestra el diagrama de la configuración experimental; el dimensionamiento de los componentes y el diseño puede encontrarse en (García López et al., 2018). Los pines etiquetados "COBu" y "COBo" representan las salidas físicas de ePWM desde la tarjeta F28069M, conectadas a las

entradas de dos optoacopladores de alta velocidad 6N137.

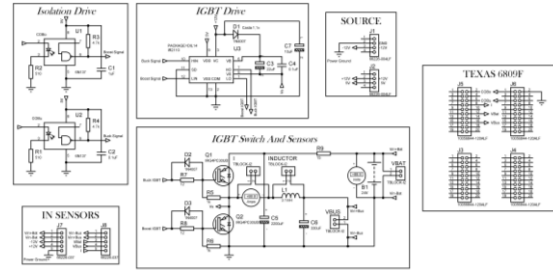


Fig. 6. Esquemático Convertidor “Buck-Boost”, Diseño Propio.

Una característica principal del driver utilizado (IR2110), es que tiene un canal flotante diseñado para la operación de Bootstrap, con un offset de hasta 500 V, sin embargo, en este caso solo un offset de 12V es requerido. Los IGBT soportan un voltaje colector-emisor de hasta 600V y una corriente continua de colector de 12A; el V_{GE} requerido para que se active el IGBT (Se recomienda sea 15V). La resistencia de carga conectada al bus también es importante porque si no se garantiza sea suficientemente pequeña, es imposible que el modo “Buck” funcione correctamente, por ende, para este trabajo $R_{10} = 100 \Omega$.

3.2.1. Banco de baterías

El banco de baterías consta de seis baterías de plomo-ácido con capacidad de 12V, 2.3Ah, conectadas como es mostrado en la Fig. 7. Con estas baterías, se implementó el controlador neuronal óptimo inverso para la carga y descarga del prototipo del banco de baterías descrito en la sección anterior.

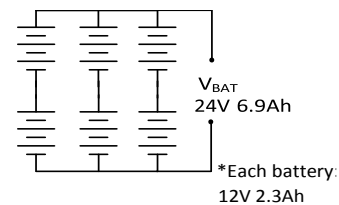


Fig. 7. Conexión del banco de baterías. Diseño Propio.

3.2.3. Sensores

Se usaron dos sensores, el transductor de corriente es el LEM HX05, dado que la entrada de los convertidores ADC de la F28069M solo acepta voltajes de 0-3.3V y este transductor se comporta como un Bus sobre su voltaje de alimentación (12v),

se optó por diseñar un circuito con amplificadores operacionales para obtener una salida de 0 a 3.3V para corrientes de entrada de -2.5A a 2.5A con un offset de 1.8V; la Fig. 8. (Revisar “Filtro”) muestra el circuito de salida adaptado para este fin.

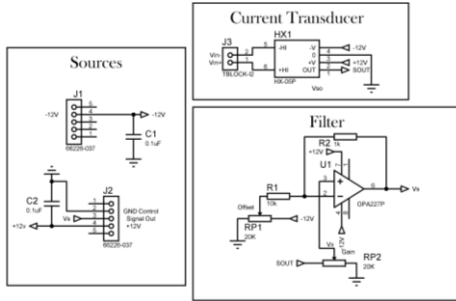


Fig. 8. Sensor de corriente implementado, Diseño Propio.

El transductor de voltaje es el LEM LV25-P, es capaz de medir de 10 a 500V. Cuando el voltaje de entrada es de 24 V, que es el más alto voltaje que se considera en esta aplicación, el voltaje de salida es 9.6V, por esta razón una se aplica un circuito de adaptación similar al utilizado para el transductor de corriente.

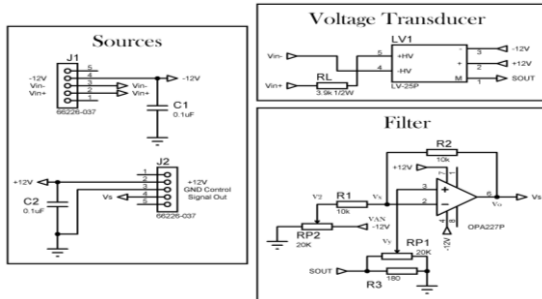


Fig. 9. Sensor de voltaje implementado, Diseño Propio.

Los sensores de las Fig. 8. y Fig. 9. debido a que están dispuestos para un diseño modular se propone el circuito mostrado en la Fig. 10. el cual es una placa que permite la interacción entre los sensores y la placa del convertidor “Buck-Boost”.

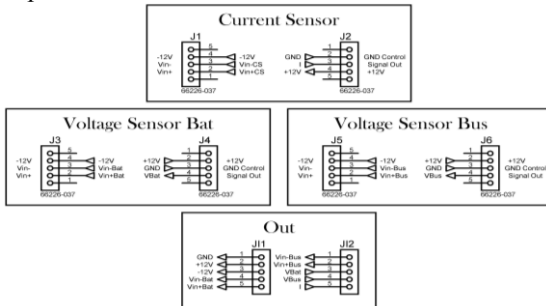


Fig. 10. Placa de comunicación implementada, Diseño Propio.

3.2.4. Fuentes de alimentación

Los esquemáticos de la fuente de energía para la instrumentación del banco de baterías y los sensores, y el bus de CC se muestran en la Fig. 11. y Fig. 12. respectivamente.

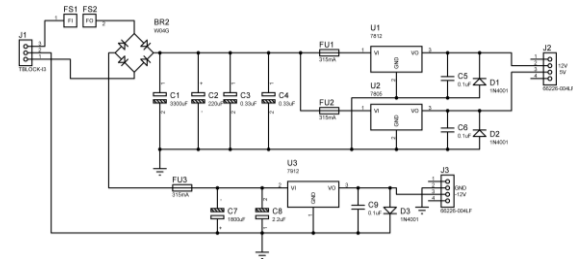


Fig. 11. Fuente de voltaje simétrica 12V, -12V y 5V 1A, Diseño Propio.

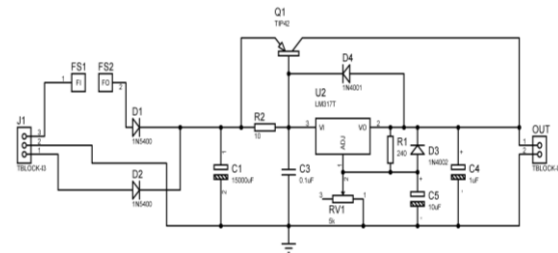


Fig. 12. Fuente de voltaje 1.25-17V 3A, Diseño Propio.

3.3 Resultados Del Controlador Aplicado

El esquema de control aplicado corresponde al mencionado en la sección 4, los parámetros en el controlador son ilustrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del Controlador, Diseño Propio.

PARA EL MODO “BOOST”:	PARA EL MODO “BUCK”:
$P = \begin{bmatrix} 220 & 0 & 0 \\ 0 & 310 & 0 \\ 0 & 0 & 33 \end{bmatrix}$	$P = \begin{bmatrix} 33 & 0 & 0 \\ 0 & 310 & 0 \\ 0 & 0 & 220 \end{bmatrix}$
$R = 8$	$R = 10$

En la Fig. 13. se muestra el error de seguimiento (modo “Buck”). La referencia de paso corresponde a una señal cuadrada de 0.1A con un período de 10 segundos.

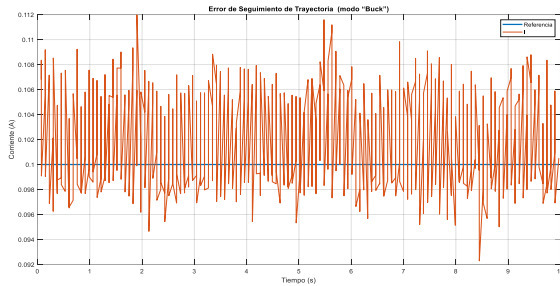


Fig. 13. Error de seguimiento (modo "Buck"),
Diseño Propio.

En la Fig. 14. se muestra el error de seguimiento (modo "Boost"). La referencia de paso corresponde con una señal cuadrada de $-0.1A$ con un período de 10 segundos. La referencia se encuentra en el rango de la tasa de carga máxima la cual no debe superar $0.3C$.

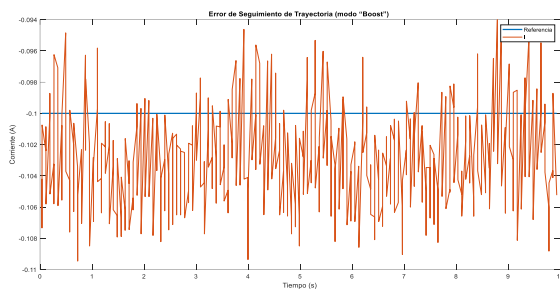


Fig. 14. Error de seguimiento (modo "Boost")
Diseño Propio.

Dado que el objetivo final del control es regular la potencia entregada o tomada por el Bus de CD (La referencia de potencia se obtiene multiplicando la referencia de corriente por el voltaje de bus ideal, es decir, $12V$), en la Fig. 13 y la Fig. 14 se muestra para cada modo el seguimiento de la referencia de corriente. Durante los primeros 10 segundos mostrados, en los cuales el modo "Buck" está operando, la batería está dando energía al Bus de CD; cuanto más energía da la batería, menor es el voltaje del terminal del banco de baterías y mayor el voltaje en el terminal del Bus; cuando el convertidor entra en modo "Boost", es decir carga las baterías, a medida que el voltaje del banco de baterías aumenta el voltaje de la terminal de bus también incrementa, esto se debe a que el voltaje del Bus debe ser lo suficientemente alto para conducir corriente al banco de baterías, en efecto solo es un estado transitorio, tan pronto se transfiere más corriente a la batería el voltaje disminuye. Cuando el modo "Buck" es activado, la tensión del Bus cae inmediatamente y aumenta entre más corriente se le es transferida de manera que, y de forma inversa, el voltaje en el banco de baterías disminuye.

Tabla 3. Error medio y desviación estándar de las diferentes señales de referencia con control optimo inverso.

REFERENCIA	ERROR MEDIO (mA)	ERROR DS (mA)
Paso de carga (Modo "Boost")	2.6515	3.2484
Paso de descarga (Modo "Buck")	2.1263	4.2867

3.4 Prototipo final.

La Fig. 15. presenta el prototipo real, toda la electrónica fue diseñada en (Labcenter, 2018) y su diseño en 3D en (Système, 2018), para diseñar en 3D el prototipo en su totalidad se dispuso de librerías libres de diseños CAD ofrecidos por terceros en (Système, 2019).



Fig. 15. Prototipo final desarrollado, Diseño Propio.

4. CONCLUSIONES

La culminación exitosa de este prototipo abre una puerta al desarrollo de dispositivos de potencia que, aunque operen en diferentes modos, solo requieran un controlador gracias a herramientas de identificación en línea como lo es la combinación de RHONN con EKF.

Los sistemas embebidos evolucionan con gran rapidez y consigo el prototipado rápido; la compatibilidad entre entornos de programación como lo son Simulink® de Matlab® y CCS minimizan la complejidad que supone la programación al implementar controladores o esquemas de control con características similares al controlador presentado en este trabajo.

El hecho de que el controlador propuesto sea robusto a los cambios paramétricos permite que sea usado el mismo controlador para diferentes convertidores "Buck-Boost", incluso cuando el sistema envejece o las condiciones ambientales pueden cambiar los parámetros del convertidor.

El prototipo se implementó con éxito, el diseño del convertidor CD-CD “Buck-Boost” y su respectiva elaboración, aunque presento dificultades antes y durante su ejecución se alcanzaron los objetivos con éxito.

REFERENCIAS

- Acevedo Meza, H., Mendoza García, J. L., & Sepúlveda Mora, S. (2018). ESTRATEGIAS DE CONTROL MPPT APLICADAS EN UN CONVERTIDOR DC/DC TIPO BOOST PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, 2(30).
<https://doi.org/10.24054/16927257.v30.n30.2017.2751>
- Alanis, A. Y., Sanchez, E. N., & Loukianov, A. G. (2007). Discrete-time backstepping induction motor control using a sensorless recurrent neural observer. *2007 46th IEEE Conference on Decision and Control*, 6112–6117.
<https://doi.org/10.1109/CDC.2007.4434164>
- Brown, R. G., & Hwang, P. Y. C. (1997). *Introduction to random signals and applied Kalman filtering: with MATLAB exercises and solutions*. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=De9SAAAAMAAJ&q=Introduction+to+Random+Signals+and+Applied+Kalman+Filtering&dq=Introduction+to+Random+Signals+and+Applied+Kalman+Filtering&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi3s_S17urjAhUqvFkKHQkPAkQ6AEIKDAA
- Cheng, K.-H., Hsu, C.-F., Lin, C.-M., Lee, T.-T., & Li, C. (2007). Fuzzy-Neural Sliding-Mode Control for DC-DC Converters Using Asymmetric Gaussian Membership Functions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(3), 1528–1536.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2007.894717>
- García López, T. B., Sánchez Camperos, E. N., & Ruiz Cruz, R. (2018). *Neural Control Applied to the Charge and Discharge of Battery Bank*. CINVESTAV Guadalajara.
- Instruments, T. (n.d.). *LAUNCHXL-F28069M Overview*.
- Labcenter. (2018). *Proteus 8 Professional v8.8 SPO*.
- Loza-Lopez, M. J., Loukianov, A. G., Sanchez, E. N., Ruiz-Cruz, R., & Sanchez-Torres, J. D. (2015). On-line optimization of the power supplied in a microgrid prototype. *2015 IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/ISC2.2015.7366227>
- Modabbernia, M. R. (2013). An Improved State Space Average Model of Buck DC-DC Converter with all of the System Uncertainties. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 5(1), 81–94.
<https://doi.org/10.15676/ijeei.2013.5.1.8>
- Ofoli, A. R., & Rubaai, A. (2006). Real-time implementation of a fuzzy logic controller for switch-mode power-stage DC-DC converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(6), 1367–1374.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2006.882669>
- Rashid, M. H. (Muhammad H. (2011). *Power electronics handbook: devices, circuits, and applications*. Butterworth-Heinemann.
- Sanchez, E. N., Alanis, A. Y., & Chen, G. (2004). Recurrent neural networks trained with Kalman filtering for discrete chaos reconstruction. *Proceedings of Asian-Pacific Workshop on Chaos Control and Synchronization '04*.
- Sanchez, E., Ornelas-Tellez, F., & Safari, an O. M. C. (n.d.). *Discrete-Time Inverse Optimal Control for Nonlinear Systems*.
- Sillero, A. A. C., Nava, N. V., Gutiérrez, C. V. H., Nava, J. V., & López, J. V. (2018). REVISIÓN DE MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS ESTADOS DE CARGA Y SALUD DE UNA BATERÍA. *Pistas Educativas*, 39(128). Retrieved from <http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/1195>
- Systèmes, D. (2018). *SOLIDWORKS*.
- Systèmes, D. (2019). *3D CONTENTCENTRAL*.
- T., C. S., O., M. M., E., J. C., & H., W. J. P. (2013). MODELO DE SIMULACIÓN CON PÉRDIDAS Y ESTRATEGIA DE CONTROL PID PARA EL CONVERTIDOR BUCK. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, 2(22).
<https://doi.org/10.24054/16927257.V22.N22.2013.403>
- The MathWorks, I. (2017). *MATLAB R2017b*.
- Vasca, F., & Iannelli, L. (2012). *Dynamics and control of switched electronic systems: advanced perspectives for modeling, simulation and control of power converters*. Springer.