

CONTROLADORES PARA EL CONVERTIDOR CD-CD ELEVADOR EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EN MICRO-REDES DE CD

Juan José Martínez Nolasco

Tecnológico Nacional de México en Celaya

juan.martinez@itcelaya.edu.mx

José Alfredo Padilla Medina

Tecnológico Nacional de México en Celaya

alfredo.padilla@itcelaya.edu.mx

Elías José Juan Rodríguez Segura

Tecnológico Nacional de México en Celaya

elias.rodriguez@itcelaya.edu.mx

Resumen

El deterioro del medio ambiente generado por la quema de combustibles fósiles utilizados para la generación de energía eléctrica ha provocado un aumento en el uso de fuentes generadoras de energía renovables como son los Paneles Fotovoltaicos (PFs), generadores eólicos, generadores de biogás, etc. Este tipo de fuentes generadoras de energía son las más utilizadas en las micro-redes de CD (μ R-CDs). Uno de los principales retos en las μ R-CDs es el Sistema de Administración y Control (SAC) encargado de definir el estado de operación de cada uno de los elementos que conforman la micro-red. En este trabajo se presenta una descripción del comportamiento de los controladores empleados en sistemas fotovoltaicos dentro de una μ R-CD. Estos controladores se implementaron sobre la plataforma NI myRIO-1900 de la compañía National Instruments, y se diseñó a través del software de instrumentación virtual LabVIEW. La μ R-CD fue diseñada para manejar una potencia máxima de 1 kW, alimentada

por dos PFs como fuente de energía renovable. La μ R-CD propuesta tiene como propósito mantener el voltaje de CD del bus dentro de un rango de $190\text{ V} \pm 5\%$ ante la conexión y desconexión de cargas y fuentes. Se presentan resultados experimentales bajo diferentes puntos de operación.

Palabra(s) Clave: Algoritmos de Control, Convertidor CD-CD, NI LabVIEW, Paneles Fotovoltaicos.

Abstract

The deterioration of the environment generated by the burning of fossil fuels used for the generation of electric energy has led to an increase in the use of renewable energy sources such as Photovoltaic Panels (PFs), wind generators, biogas generators, etc. These types of energy sources are the most used in micro-CD networks (μ R-CDs). One of the main challenges in the μ R-CDs is the System of Administration and Control (SAC) in charge of defining the state of operation of each of the elements that make up the micro-network. In this work, a description of the behavior of the controllers used in photovoltaic systems within a μ R-CD is presented. These controllers were implemented on NI's myRIO-1900 platform from National Instruments and were designed through LabVIEW virtual instrumentation software. The μ R-CD was designed to handle a maximum power of 1 kW, powered by two PFs as a renewable energy source. The proposed μ R-CD is intended to maintain the DC voltage of the bus within a range of $190\text{ V} \pm 5\%$ for connecting and disconnecting loads and sources. Experimental results are presented under different operating points.

Keywords: Control Algorithms, DC-DC Converters, NI LabVIEW, Photovoltaic Panels.

1. Introducción

Las micro-redes de CD (μ R-CDs) han recibido mayor atención como una solución eficaz y eficiente para integrar sistemas de almacenamiento, generadores de energía renovable y cargas que operan en CD [9]. Debido al incremento del uso de las cargas en CD, como la iluminación LED y las computadoras, las μ R-

CDs juegan un papel innegable en los sistemas de energía en un futuro [6]. Estos sistemas incluyen convertidores electrónicos de potencia que necesitan un sistema de control que depende del modo de operación de la μ R-CD. Para controlar la energía de los componentes que integran una μ R-CD, es necesario un Sistema de Administración y Control (SAC) de la energía, estos sistemas son los encargados de definir el modo de operación de cada uno de los convertidores electrónicos de potencia que posee la μ R-CD.

La tarea de un SAC es gestionar la energía entre las fuentes y las cargas que componen una μ R-CD, cada μ R-CD cuenta con diferente estructura y características, y el objetivo final en cada SAC es mantener estable el bus de la μ R-CD. Existen investigaciones que han propuesto SAC para μ R-CD que cuentan con Paneles Fotovoltaicos (PFs), generadores eólicos, banco de baterías, y cargas resistivas; manejando un bus de 48 V, presentando resultados satisfactorios en simulación [2]; o rangos de operación en el bus de 45 V a 55 V [8].

También, se ha analizado en simulación el comportamiento del bus al generar perturbaciones como cambios en la corriente en las cargas y cambios en la potencia generada por los PFs, demostrando estabilidad en el bus [6]. Otras investigaciones se han enfocado al dimensionamiento de los componentes básicos de la μ R-CD [5]. El software más empleado para realizar las pruebas en simulación es MATLAB [7].

Dentro de los trabajos que presentan pruebas experimentales, la mayoría utiliza cargas resistivas conectadas al bus para perturbar el comportamiento de la micro-red, [4] maneja una micro-red con un bus de 34 V, mientras que [9] y [10] proponen una micro-red con un bus de 380 V. En la búsqueda de mejorar los SAC, en [3] se propuso el uso de un controlador difuso para mejorar el ciclo de vida de un banco de baterías, estabilizando el bus de CD en un rango de 380 V \pm 20 V; este sistema utiliza el software LabVIEW para implementar el SAC. Una de las ventajas de emplear LabVIEW es que cuenta con tarjetas para el monitoreo y control, [1] utiliza la tarjeta PCI-MIO16-E-4 para el control de un convertidor trifásico, el cual se emplea para controlar un motor de inducción conectado en una

micro-red con un bus de 600 V. Otra opción para la implementación de SACs es el software MATLAB y la tarjeta dsPACE [11]. Los trabajos antes mencionados emplean cargas resistivas y a potencia constante.

En este trabajo se presentan los algoritmos de control empleados en sistemas fotovoltaicos dentro de una micro-red de CD. Además, se presentan pruebas experimentales del comportamiento del bus de la micro-red con ambos algoritmos de control utilizando cargas electrónicas como luminarias LED y luminarias fluorescentes; obtenido estabilidad en el bus de CD ante las perturbaciones generadas y ante los cambios de modos de operación de los componentes de la micro-red.

2. Métodos

La μ R-CD donde se utilizan los sistemas fotovoltaicos fue diseñada para manejar una potencia máxima de 1 kW, con un bus de CD de 190 V. En la figura 1 se presenta el diagrama a bloques de la μ R-CD, en la cual se representa el flujo de energía entre los diferentes elementos que conforman el sistema.

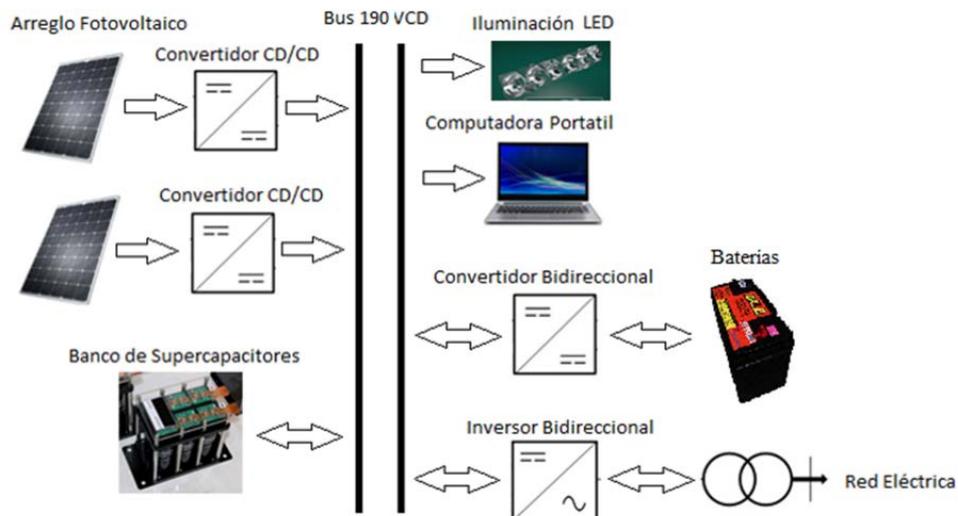


Figura 1 Estructura de una Micro-red de CD.

La fuente principal de energía de la μ R-CD son los PFs, los cuales alimentan cada uno a un convertidor CD-CD elevador con una capacidad de 0.6 kW. Para emular

el comportamiento de los PFs se emplearon dos Simuladores de Paneles Fotovoltaicos (SPFs) de la marca Agilent modelo E4360. El segundo elemento que forma parte de la μ R-CD es el convertidor CD-CA bidireccional, el cual permite interconectar la μ R-CD con la REP, encargándose de transferir a la REP la energía generada por los SPFs que no es utilizada por las cargas locales o por el sistema de almacenamiento de energía. La μ R-CD cuenta con un Banco de Baterías (BB) con una capacidad de 115 Ah a 120 V, este BB se conecta al bus de CD por medio de un convertidor CD-CD bidireccional.

Convertidor CD-CD Elevador

Cada SPF alimenta a un convertidor CD-CD en topología elevadora. En la figura 2 se presenta el diagrama esquemático de este CEP, el cual fue diseñado para establecer una ganancia de 1.5. Esta ganancia permite asegurar un voltaje de salida del convertidor de 190 V cuando el SPF se encuentra en el punto de potencia máxima.

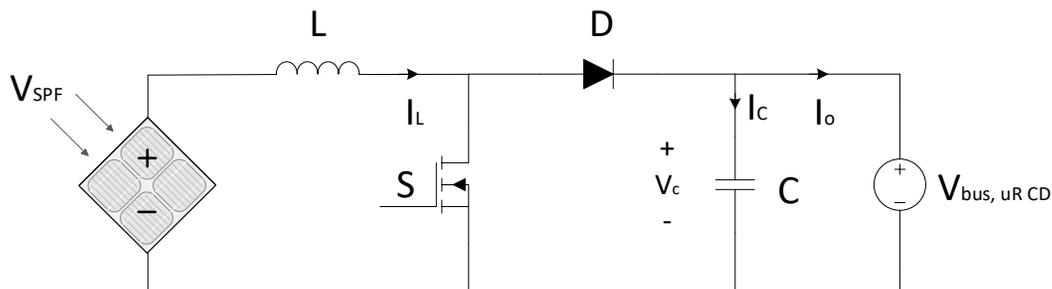


Figura 2 Diagrama esquemático del convertidor CD-CD elevador.

Para el diseño del convertidor se propone que opere en modo conducción continua, para esto se supone que la corriente (I_L) en el inductor (L) aumenta y disminuye linealmente durante el tiempo de encendido y de apagado del interruptor, respectivamente. Entonces la duración de los intervalos de tiempo de encendido (t_{on}) y de apagado (t_{off}) del interruptor se pueden definir como:

$$t_{on} = L \frac{\Delta I_L}{V_{SPF}} \quad (1)$$

$$t_{off} = L \frac{\Delta I_L}{V_{bus} - V_{SPF}} \quad (2)$$

Donde ΔI_L representa el rizo de corriente pico a pico a través de L . Debido a que la amplitud del rizo de corriente en L es el mismo en ambos intervalos de tiempo y, que ambos intervalos pueden expresarse en términos del periodo de conmutación (T) y del ciclo de trabajo (D) como $t_{on} = DT$ y $t_{off} = (1 - D)T$, entonces es posible definir el ΔI_L a partir de ecuaciones 1 y 2 como:

$$\Delta I_L = \frac{1}{L} (V_{SPF}) DT = \frac{1}{L} (V_{bus} - V_{SPF}) (1 - D)T \quad (3)$$

A partir de (3) es posible definir la función de ganancia del convertidor CD-CD elevador, tal y como:

$$\frac{V_{bus}}{V_{SPF}} = \frac{1}{(1 - D)} \quad (4)$$

Por otro lado, el periodo de conmutación se puede calcular de:

$$T = \frac{1}{f} = t_{on} + t_{off} = \frac{L \Delta I_L V_{bus}}{V_{SPF} (V_{bus} - V_{SPF})} \quad (5)$$

De donde se puede obtener la ecuación que define el rizo de corriente pico a pico como:

$$\Delta I_L = \frac{V_{SPF} (V_{bus} - V_{SPF})}{fL V_{bus}} \quad (6)$$

Para diseñar el valor del capacitor de salida del convertidor es necesario considerar que durante el intervalo de encendido el capacitor suministra la corriente a la carga. Tomando esto en consideración, entonces la corriente promedio en el capacitor durante este intervalo de tiempo es $I_c = I_o$, por lo que el rizo de voltaje pico a pico en el capacitor se puede definir como:

$$\Delta V_c = \frac{1}{C} \int_0^{t_{on}} I_o dt = \frac{I_o t_{on}}{C} \quad (7)$$

Debido que $T = 1/f$, entonces $t_{on} = D/f$. Por lo que si se sustituye el ciclo de trabajo en términos de la frecuencia en (4) se obtiene $t_{on} = \frac{(V_{bus} - V_{SPF})}{V_{bus} f C}$, por lo que el rizo de voltaje en el capacitor se puede definir como:

$$\Delta V_c = \frac{I_o (V_{bus} - V_{SPF})}{V_{bus} C f} \quad (8)$$

Considerando las ecuaciones antes descritas, los valores de L y C para una frecuencia de 40 kHz son: L de 107 μ H y C de 440 μ F.

Para utilizar los SPFs es necesario configurar su curva de operación, los parámetros necesarios para dicha configuración son: el voltaje en el punto de potencia máxima (V_{ppm}), el voltaje de circuito abierto (V_{ca}), la corriente en el punto de potencia máxima (I_{ppm}) y la corriente de corto circuito (I_{cc}). Los valores definidos para estos parámetros dependen de las pruebas experimentales que se estén realizando a la μ R-CD.

Sistemas de Control

La μ R-CD necesita de un sistema de administración y control encargado de estabilizar el bus de CD definiendo el modo de operación de cada elemento que compone la μ R-CD.

Los convertidores CD-CD elevadores conectados con los SPFs pueden operar en modo Control de Voltaje (CV), en este modo de operación el control se realiza con un controlador clásico PI encargado de mantener el voltaje de salida del convertidor CD-CD (voltaje del bus de CD) en un nivel de 190 V. En la figura 3 se ilustra el diagrama del convertidor con el controlador PI, este controlador monitorea el nivel de voltaje de salida del convertidor y en base a los cambios realiza acciones correctivas para eliminar los efectos generados por las perturbaciones del sistema.

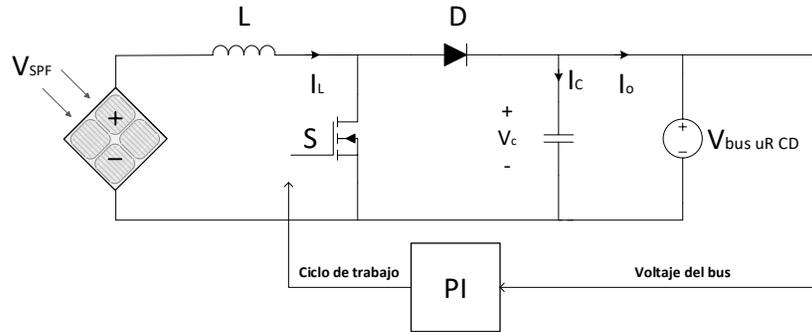


Figura 3 Control en modo voltaje para el convertidor elevador.

El segundo modo de operación de los convertidores conectados a los SPF's se encarga de extraer la potencia máxima de los SPF's utilizando el algoritmo clásico para el Seguimiento del Punto de Potencia Máxima (SPPM) Perturbar y Observar (P&O) que se ilustra en la figura 4. Además, en la figura 5 se presenta el diagrama del convertidor con el controlador SPPM. El controlador modifica el ciclo de trabajo del interruptor de potencia y monitorea los cambios en la potencia de los SPF's.

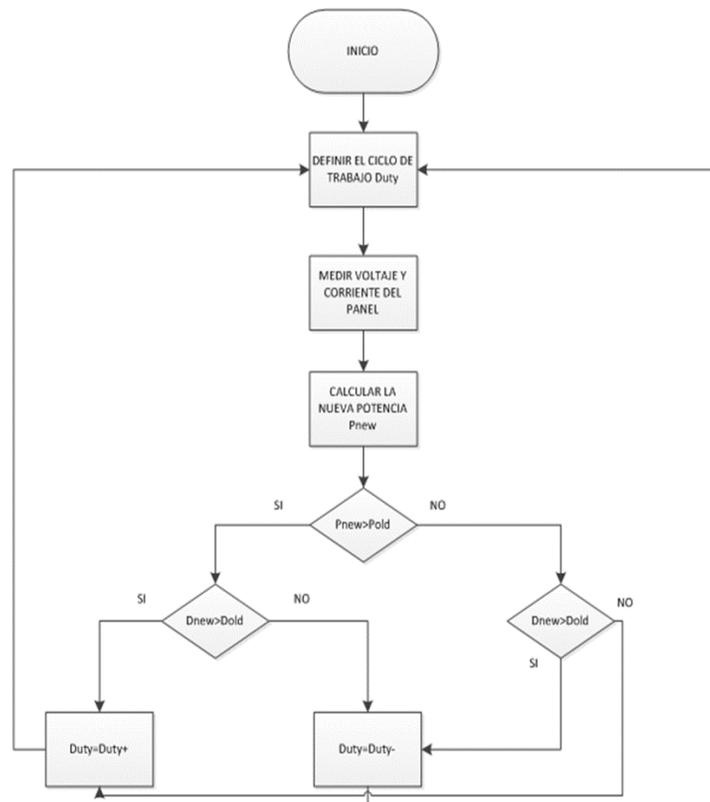


Figura 4 Algoritmo del control Perturbar y Observar.

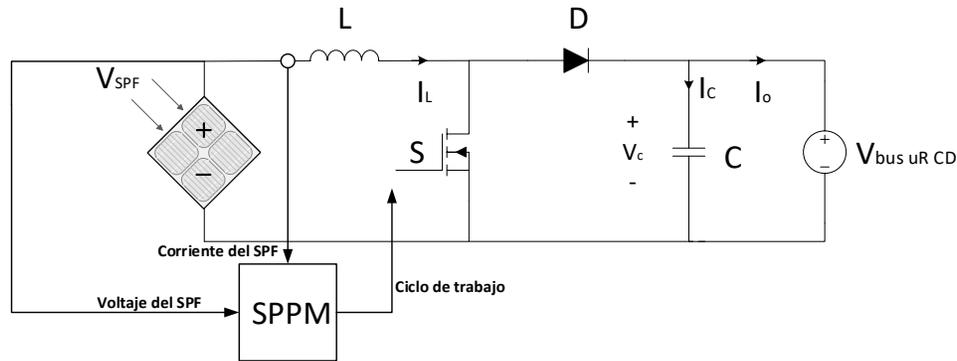


Figura 5 Diagrama del sistema de control SPPM.

3. Resultados

La configuración inicial de cada uno de los SPF es: $V_{ppm}=120\text{ V}$, $V_{ca}=130\text{ V}$, $I_{ppm}=2\text{ A}$ y $I_{cc}=3\text{ A}$; al encender los SPF el bus de CD presenta una carga resistiva de 116 W . En la figura 6 se presenta el comportamiento del encendido del sistema. El bus de CD tarda 6.4 segundos en alcanzar un voltaje de 128 V . Una vez que el bus de CD se estabiliza, se enciende el sistema de administración y control, inicializando el control para los sistemas fotovoltaicos en modo control de voltaje (apagando el banco de baterías y el sistema de interconexión con la REP). El tiempo que tarda el bus en alcanzar el nivel deseado de 190 V es de 20 segundos , este comportamiento se muestra en la figura 7.

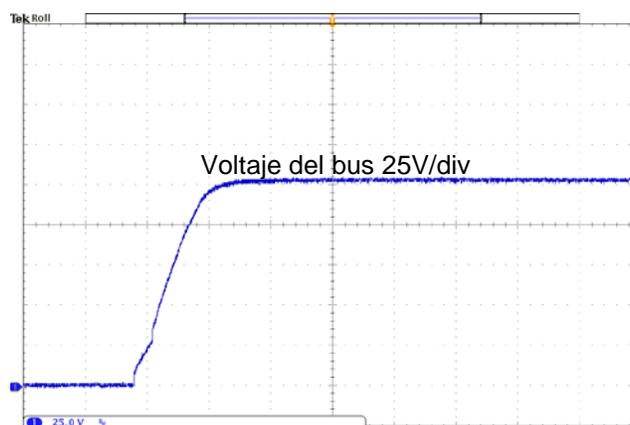


Figura 6 Comportamiento del bus en el encendido de los SPF.

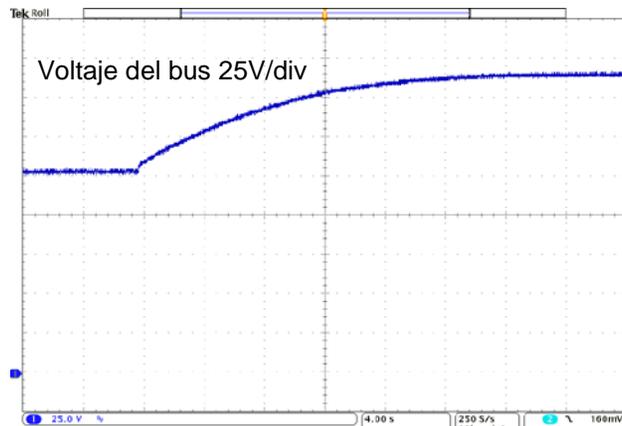


Figura 7 Comportamiento del bus en el encendido del SAC.

Cuando los sistemas fotovoltaicos operan en modo control de voltaje el sistema responde ante cambios de carga operando en el mismo estado, manteniendo el control del bus de CD con el control de voltaje sobre los convertidores de los SPFs.

En la figura 8 se muestra el comportamiento al conectar una carga electrónica de iluminación tipo LED de 115 W. En la figura 9 se presenta el comportamiento al desconectar la carga.

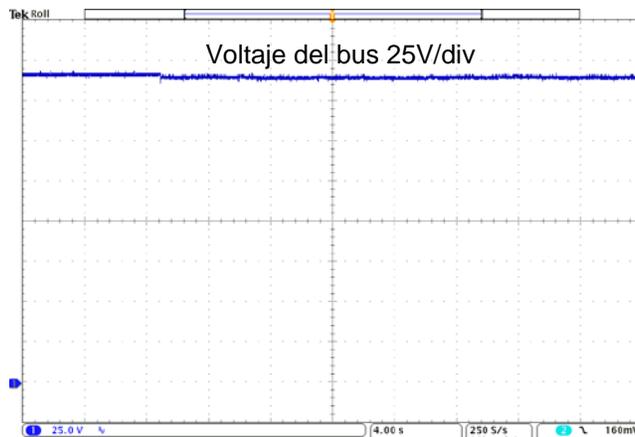


Figura 8 Conexión de luminaria tipo LED.

Con la configuración de los SPFs cada uno puede entregar una potencia máxima de 240 W. Para probar el comportamiento del sistema en los límites se realizan pruebas conectando y desconectando cargas electrónicas de luminarias tipo

fluorescentes. El comportamiento del bus de CD al conectar una luminaria fluorescente de 300 W se presenta en la figura 10, mientras que en la figura 11 se aprecia el comportamiento al desconectar la misma carga. Los picos al conectar y desconectar las cargas son menores al 2.6 % y el tiempo de la transición es de 4 segundos.



Figura 9 Desconexión de luminaria tipo LED.

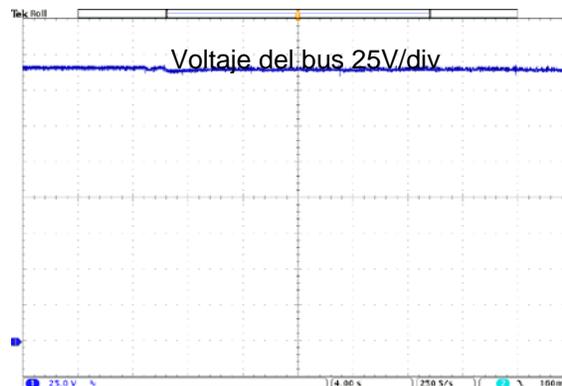


Figura 10 Conexión de lámparas fluorescentes de 300 W.

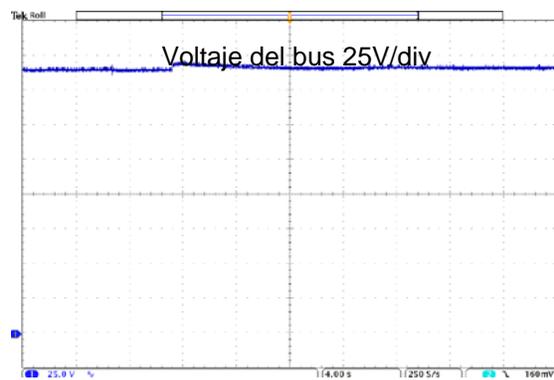


Figura 11 Desconexión de lámparas fluorescentes de 300 W.

En las figuras 12 y 13 se presentan el comportamiento del bus de CD al conectar y desconectar una lámpara tipo fluorescente de 400 W, colocando cerca del límite la potencia que generan los SPFs. Al realizar la conexión de la carga la caída de voltaje en el bus es del 2.6 % con un tiempo transitorio de 4 segundos, mientras que al realizar la desconexión el pico del bus es de 4.2 % y la transición tiene una duración de 10 segundos.

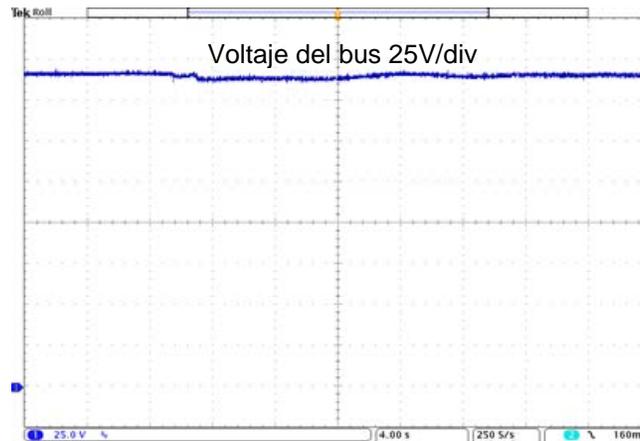


Figura 12 Conexión de lámparas fluorescentes de 400 W.

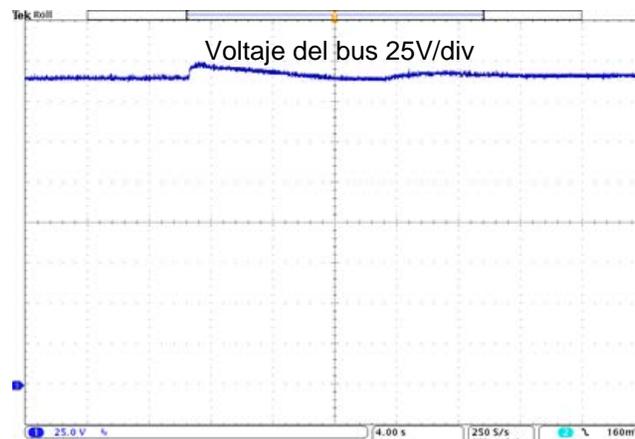


Figura 13 Desconexión de lámparas fluorescentes de 400 W.

Cuando el algoritmo de control de los sistemas fotovoltaicos opera en el modo de seguimiento del punto de potencia máxima, el control del voltaje del bus no depende del sistema fotovoltaico, sino del algoritmo de control de otro elemento que conforma la micro-red como el sistema de almacenamiento de energía o el

convertidor bidireccional para interconectarse a la REP. Con esto se aprovecha al máximo la energía fotovoltaica generada.

A continuación, se presenta un ejemplo donde se extrae la potencia máxima de los paneles fotovoltaicos, transfiriendo la energía que no se emplea por las cargas al banco de baterías. El banco de baterías se interconecta a la micro-red por medio de un convertidor CD-CD bidireccional, el cual opera como reductor para suministrar energía al banco de baterías.

En la figura 14 se ilustra el comportamiento del bus de CD de la micro-red y la corriente que se suministra al banco de baterías, mientras que en la figura 15 se presenta el comportamiento de las mismas señales cuando se deja de suministrar energía el banco de baterías.

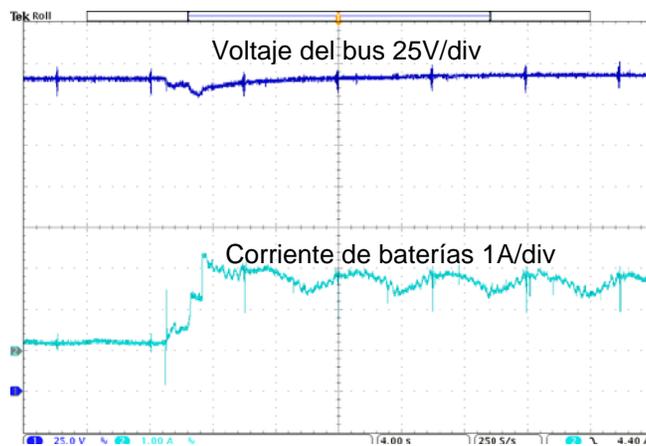


Figura 14 Inicio del suministro de energía al banco de baterías.

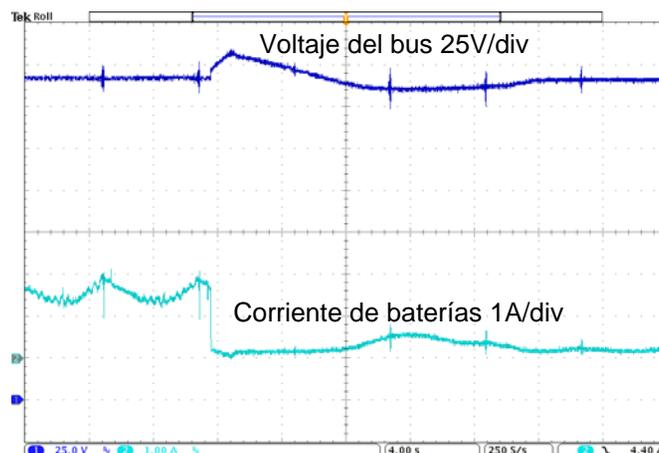


Figura 15 Fin del suministro de energía al banco de baterías.

4. Discusión

En el presente trabajo se describe el comportamiento de los algoritmos de control aplicados en sistemas fotovoltaicos utilizados como fuente generadora de energía renovable en una micro-red de CD. La μ R-CD donde se emplean los sistemas fotovoltaicos se diseñó para manejar una potencia máxima de 1kW con un bus de CD de 190 V, la cual puede operar aislada o interconectada con la REP. Para la administración y control de la energía en la micro-red se implementó un SAC sobre la plataforma NI myRIO-1900 utilizando para el diseño del SAC el software de programación virtual LabVIEW.

En los resultados experimentales se presenta el funcionamiento del bus de CD de la μ R-CD bajo diferentes condiciones de operación, todas ellas con el objetivo de evaluar la respuesta del bus de CD ante perturbaciones provocadas por la conexión y desconexión de fuentes de energía y de cargas electrónicas reales.

A lo largo de las diferentes pruebas realizadas se observó que el bus de voltaje de la μ R-CD propuesta se mantiene dentro del rango de operación establecido en el diseño, y en cada caso el tiempo de respuesta transitorio oscilo entre los 4 y 20 segundos, estos tiempos son adecuados para el diseño de la micro-red debido a que los picos y caídas de voltaje en el bus de CD no sobrepasan el 5 % del valor nominal del bus. Esto se puede traducir en que el bus de voltaje de la μ R-CD propuesta es capaz de alcanzar la estabilidad en corto plazo después de ser expuesto a diferentes perturbaciones.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Behera R. K., Parida, S. K., 2014, December. DC microgrid management using power electronics converters. In Power Systems Conference (NPSC), 2014 Eighteenth National, 1-6. IEEE. DOI: 10.1109/NPSC.2014.7103857
- [2] Bhavsar Y. S., Joshi P. V., Akolkar S. M., 2015, October. Energy management in DC microgrid. In Energy Systems and Applications, 2015 International Conference on, 209-213. IEEE. DOI: 10.1109/ICESA.2015.7503341

- [3] Chen Y. K., Wu Y. C., Song C. C., Chen Y. S., 2013. Design and implementation of energy management system with fuzzy control for DC microgrid systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(4), 1563-1570. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2210446
- [4] Iwanski G., Staniak P., Koczara W., 2011, June. Power management in a DC microgrid supported by energy storage. In *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on*, 347-352. IEEE. DOI: 10.1109/ISIE.2011.5984183
- [5] Mendis N., Mahmud M. A., Roy T. K., Haque M. E., Muttaqi K. M., 2016, October. Power management and control strategies for efficient operation of a solar power dominated hybrid DC microgrid for remote power applications. In *Industry Applications Society Annual Meeting, 2016 IEEE*, 1-8. IEEE. DOI: 10.1109/IAS.2016.7731816
- [6] Soori S., Hasari S. S., Salemnia A., Khosrogorji S., 2016, February. An improved method for power management and voltage control of PV unit in DC microgrid. In *Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC), 2016 7th*, 326-331. IEEE. DOI: 10.1109/PEDSTC.2016.7556882
- [7] Tank I., Mali S., 2015, February. Renewable based DC microgrid with energy management system. In *Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), 2015 IEEE International Conference on*, 1-5. IEEE. DOI: 10.1109/SPICES.2015.7091542
- [8] Varghese A., Chandran L. R., Rajendran A., 2016, July. Power flow control of solar PV based islanded low voltage DC microgrid with battery management system. In *Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), IEEE International Conference on*, 1-6. IEEE. DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853407
- [9] Yu X., Wang F., Huang A., 2012, October. Power management strategy for plug and play DC microgrid. In *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on* 1-7. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465882

- [10] Yu X., Huang A., Burgos R., Li J., Du Y. 2013, March. A fully autonomous power management strategy for DC microgrid bus voltages. In Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE, 2876-2881. DOI: 10.1109/APEC.2013.6520706
- [11] Zadeh M. K., Saublet L. M., Gavagsaz-Ghoachani R., Nahid-Mobarakeh B., Pierfederici S., Molinas M. 2016, March. Energy management and stabilization of a hybrid DC microgrid for transportation applications. In Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2016 IEEE, 3397-3402. DOI: 10.1109/APEC.2016.7468355.