

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROLADOR EMBEBIDO PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN EMBEDDED CONTROLLER FOR A PHOTOVOLTAIC SYSTEM

Juan José Martínez Nolasco

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
juan.martinez@itcelaya.edu.mx

Stefanny Lizet Rangel Pichardo

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
stefannyr9@gmail.com

Josué Aguilar Coronilla

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
15030992@itcelaya.edu.mx

Martín Galindo Jaramillo

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
15030812@itcelaya.edu.mx

Elías José Juan Rodríguez Segura

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
elias.rodriguez@itcelaya.edu.mx

Recepción: 29/abril/2020

Aceptación: 29/octubre/2020

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo un controlador embebido para un sistema fotovoltaico. El sistema fotovoltaico consta de un panel solar de 240 W, un convertidor CD-CD elevador y un convertidor CD-CA. El diseño e implementación del controlador embebido se realizó sobre la plataforma de desarrollo NI myRIO-1900. Este sistema de control consta de dos etapas, la primera etapa es el algoritmo de control perturbar y observar para el seguimiento del punto de máxima potencia, mientras que la segunda etapa se encarga del monitoreo de la red eléctrica principal de corriente alterna y la sincronización de la salida del convertidor CD-CA con la señal monitoreada, para esta acción se utilizó la técnica de Modulación de Ancho de Pulso Sinusoidal (SPWM por sus siglas en ingles). Para comprobar el funcionamiento del controlador embebido se utilizó un prototipo experimental del

sistema fotovoltaico, el cual extrae la máxima potencia del panel fotovoltaico y genera una señal de corriente eléctrica igual a la suministrada por CFE.

Palabras Clave: Control Embebido, Convertidor Electrónico de Potencia, LabVIEW, Panel Fotovoltaico, Prototipo Experimental.

Abstract

The design necessary to develop a control system for a DC-AC converter was realized in this project. The control part was embedded in a NI myRIO-1900 card. From Direct Current (DC) energy produced by the sunlight incidence on a Photovoltaic Panel (PVP) of 240 W, Alternating Current (AC) like the one CFE provides of 60 Hz electrical energy is produced. Connecting a DC-DC Boost converter and a DC-AC inverter to the PVP this was possible. A control integrated the Perturb and Observe (P&O) technique in the Maximum Power Point Tracker (MPPT) embedded in the system. In the control the Sinusoidal Pulse Width Modulation technique (SPWM) was used to synchronize with the CFE signal. Electricity like the one provided by CFE was produced in this project.

Keywords: *Embedded Control, Experimental Prototype, LabVIEW, Photovoltaic Panel, Power Electronic Converter.*

1. Introducción

Las Micro-Redes de Corriente Directa (μ R-CDs) se están convirtiendo en uno de los principales temas de investigación hoy en día, esto debido a que podrían resolver el problema de escasez de energía que enfrentamos en la actualidad [Yu et al., 2014]. Usualmente, una μ R-CD se compone de: fuentes generadoras de energía, Convertidores Electrónicos de Potencia (CEPs), así como de fuentes de almacenamiento como Bancos de Baterías (BBs) y Bancos de Super-Capacitores (BSCs), además de las cargas conectadas al bus de CD.

Todos los componentes antes mencionados requieren de un Sistema de Administración y Control (SAC) cuya función es monitorear la μ R-CD, tomar decisiones con base en los datos obtenidos y conmutar entre las distintas formas de operación con el objetivo de proporcionar estabilidad al bus de CD [Bae y

Kwasinski, 2012; Jin et al., 2014; Shadmand y Balog, 2014; Dizqah et al., 2015; Morstyn et al., 2016].

Para lograr la estabilidad en la μR cada CEP es manipulado por un controlador local, diversos autores proponen el uso de técnicas de control clásico para la manipulación de la energía generada por las fuentes de energía renovable, una de las opciones mas utilizada es transferir la energía generada por los paneles fotovoltaicos a la Red Eléctrica Principal (REP) de corriente alterna por medio de convertidores CD-CA [Zhang et al., 2011a; Sun et al., 2011; Zhang et al., 2011b; Hasanein, 2016]. Si se desea extraer la potencia máxima de un arreglo fotovoltaico en una μR es necesario contar con un sistema para transferir la energía que no consumen las cargas conectadas al bus de CD. Por lo tanto, el utilizar un convertidor CD-CA para transferir dicha energía eléctrica a la REP de corriente alterna es una opción. Para realizar esta acción es necesario diseñar un sistema de control embebido capaz de monitorear el comportamiento de la REP y sincronizar la señal de salida del convertidor CD-CA con la señal monitoreada.

Por tales motivos, la finalidad de este trabajo es el diseño e implementación de un controlador embebido capaz de extraer la potencia máxima de un panel fotovoltaico de 240 W aplicando un algoritmo de control para el seguimiento del punto de máxima potencia a un convertidor CD-CD elevador conectado en cascada con el panel; además, del desarrollo del sistema de control encargado de sincronizar la señal de salida del convertidor CD-CA con la REP de corriente alterna. Ambos controladores se implementaron sobre la plataforma de desarrollo NI myRIO-1900 utilizando el software de instrumentación virtual LabVIEW.

2. Métodos

El sistema fotovoltaico que se utilizó consta de un panel fotovoltaico de 240 W modelo S60 MC de Solartec, un convertidor CD-CD elevador diseñado para trabajar a una potencia máxima de 1 kW, un convertidor CD-CA con capacidad máxima de 1 kW que opera con el driver SPWM EGP3000W y un filtro LC. Los controladores se implementaron en dos tarjetas de desarrollo NI myRIO-1900, además se utilizó una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008 para aislar la señal medida en la

REP de CA. En la figura 1 se presenta el diagrama general del sistema fotovoltaico y las tarjetas de desarrollo.

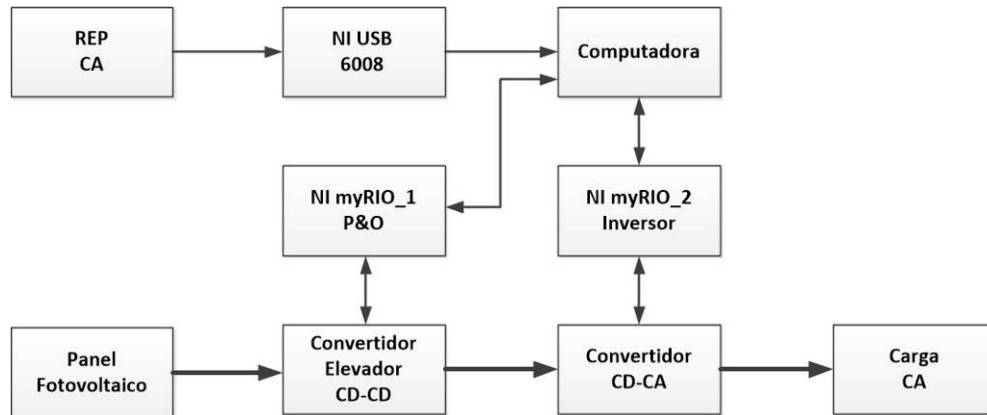


Figura 1 Diagrama general de la estructura implementada.

Convertidor CD-CD elevador

El panel fotovoltaico alimenta a un convertidor CD-CD en topología elevadora. En la figura 2 se presenta el diagrama esquemático del convertidor, el cual se emplea para extraer la máxima potencia del panel fotovoltaico y transferir la energía del panel fotovoltaico al convertidor CD-CA. En [Attanasio et al., 2013] se presenta la metodología de diseño del convertidor de la figura 2.

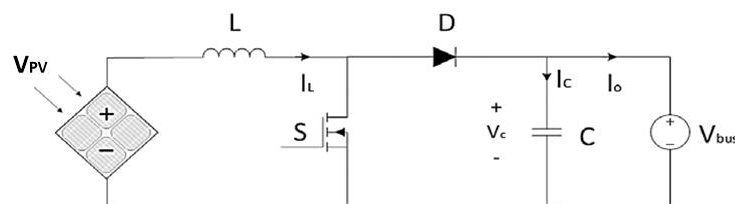


Figura 2 Diagrama esquemático del convertidor CD-CD elevador.

Convertidor CD-CA Bidireccional

El convertidor CD-CA opera como inversor modulando la energía para alimentar una carga de corriente alterna o transferir esta energía a la REP de corriente alterna. En la figura 3 se presenta el diagrama esquemático del convertidor CD-CA implementado. En [Attanasio et al., 2013] se presenta la metodología de diseño del

convertidor de la figura 3. Para suavizar los armónicos se empleó un filtro LC, el cual tiene un inductor de $710 \mu\text{H}$ y un capacitor de $1 \mu\text{F}$, este filtro pasa-bajas permite atenuar las corrientes de altas frecuencias que generan perturbaciones en la señal de salida del convertidor.

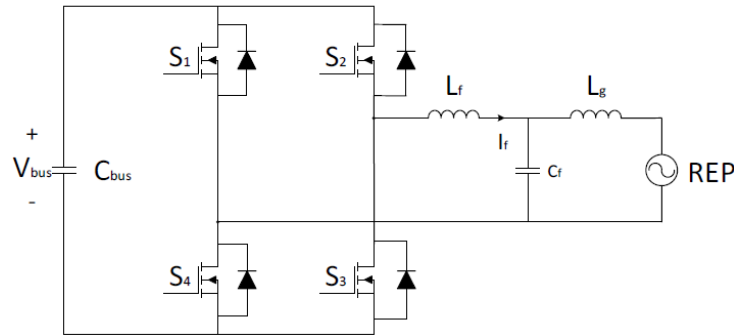


Figura 3 Diagrama esquemático del convertidor CD-CA.

Cada uno de los convertidores presentados necesita un sistema de control. A continuación, se describen los sistemas de control propuestos.

Control para el convertidor CD-CD elevador

El convertidor elevador CD-CD cuenta con un sensor de voltaje y corriente en la entrada con el objetivo de monitorear la potencia extraída del panel fotovoltaico. Además, cuenta con un sensor de voltaje a la salida del convertidor para monitorear el nivel de voltaje del bus que se genera al extraer la máxima potencia del panel. El algoritmo de control que se implementó en la tarjeta de desarrollo NI myRIO_1 que se ilustra en la figura 1 fue un controlador Perturbar y Observar (P&O) [Selmi et al., 2014] encargado del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés). El principio de funcionamiento de este algoritmo implica perturbar (modificar el ciclo de trabajo del convertidor) la salida del panel fotovoltaico, esta perturbación genera cambios en la potencia de salida del mismo, estos cambios son juzgados con el principio de generar un aumento en la potencia extraída. Si la perturbación genera un aumento en la potencia del sistema, la perturbación se sigue generando en esa dirección; de lo contrario, si la perturbación genera una disminución en la potencia, la perturbación se realizará en sentido opuesto. Este

algoritmo también evalúa el nivel de voltaje. Si al perturbar el voltaje o la corriente del panel, la potencia a la salida incrementa, la perturbación debe continuar en la misma dirección, en caso contrario la dirección se invierte. En la figura 4 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo utilizado para el MPPT.

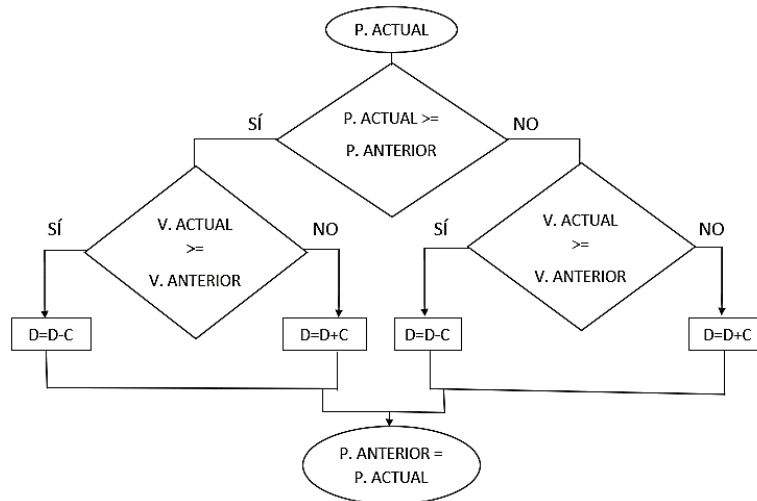


Figura 4 Diagrama de flujo del algoritmo para el MPPT.

Control para el convertidor CD-CA

El sistema de control embebido para que el convertidor CD-CA trabaje como inversor se basa en la técnica SPWM, para el cual se monitorea la señal de corriente alterna de la REP que suministra CFE y se emplea como señal de referencia. Además, es necesario generar una señal portadora, esta fue una señal triangular de 10 kHz. La señal de referencia y la señal portadora se comparan generando las señales de disparo de los interruptores de potencia. Todas estas acciones se realizaron en la tarjeta de desarrollo NI myRIO_2 a nivel FPGA. En la figura 5 se presenta el comportamiento de las señales al utilizar la técnica SPWM. La señal de control SPWM es definida por la modulación de la señal senoidal y por los puntos de intersección con la señal triangular. El SPWM es una onda de forma mejorada con un buen control y regulación. El principio permite ser versátil y eliminar armónicos, regular y estabilizar a la par el voltaje de salida. El cambio de tiempo del voltaje entre el capacitor corresponde al tiempo en que la señal del SPWM asciende y desciende [Lin et al., 2011].

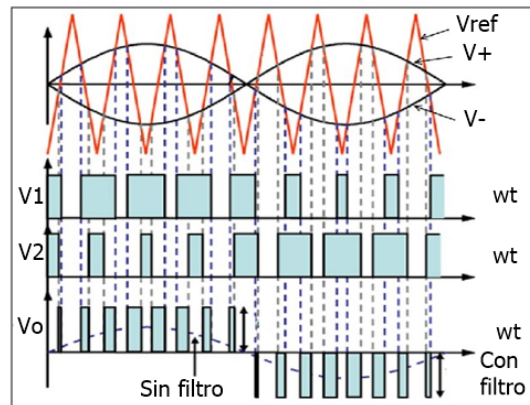


Figura 5 Comportamiento de las señales en la técnica SPWM.

3. Resultados

El primer experimento realizado fue la caracterización del panel fotovoltaico. En la figura 5 se ilustra el panel empleado para las pruebas experimentales. En esta actividad se conectó a la salida del panel una resistencia variable, registrando los valores de voltaje y corriente al modificar el valor de la resistencia de 3.8 a 38.1 Ω .



Figura 5 Panel fotovoltaico.

En la figura 6 se presenta el comportamiento del panel para diferentes condiciones climáticas, estas curvas representan la curva característica corriente-voltaje. Al realizar la caracterización del panel fotovoltaico bajo distintas condiciones climáticas se obtuvieron sus curvas de potencia-voltaje; en la figura 7 se presenta la curva cuando el panel genera la mayor potencia y en la figura 8 cuando el panel genera la menor potencia.

Antes de comprobar el funcionamiento del algoritmo de control para el MPPT se probó el convertidor CD-CD elevador en lazo abierto. Para esta prueba se utilizó el esquema de figura 2, con una carga resistiva a la salida del convertidor de 36.6 Ω .

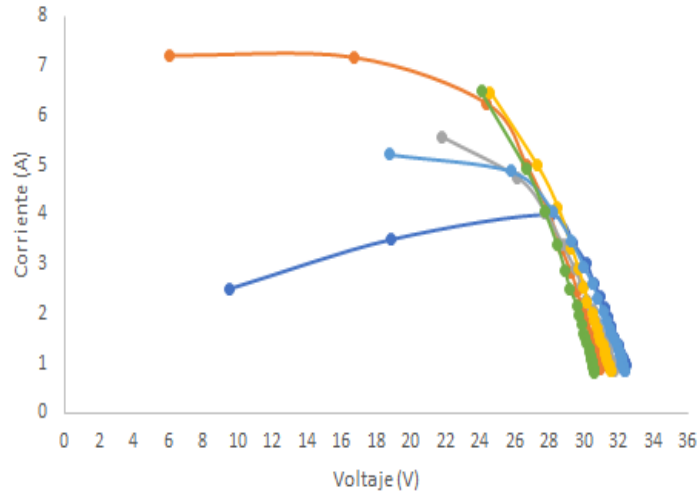


Figura 6 Curvas corriente-voltaje.

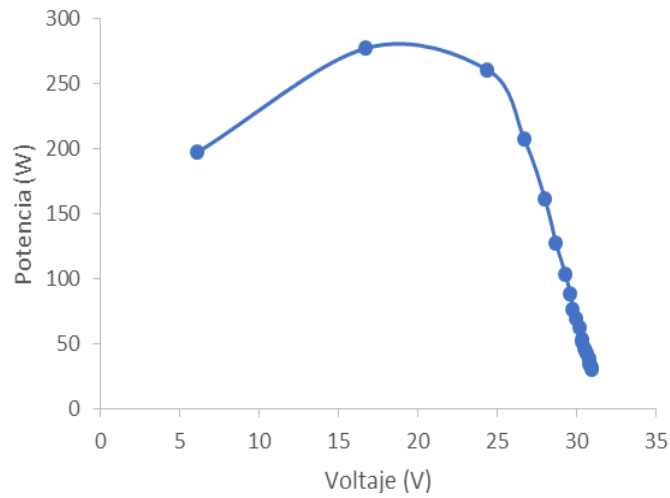


Figura 7 Curva potencia-voltaje para una potencia máxima de 261 W.

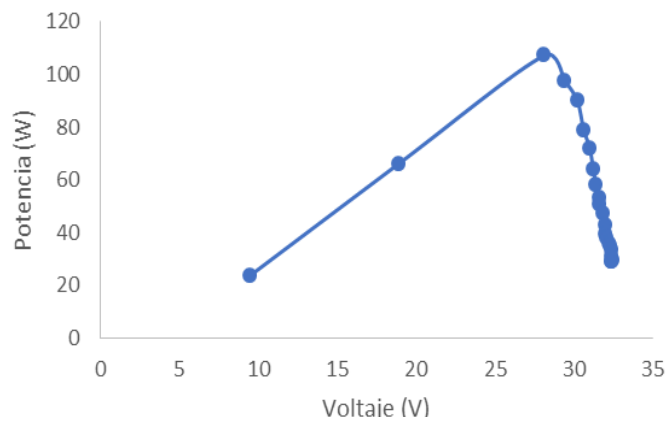


Figura 8 Curva potencia-voltaje para una potencia máxima de 100 W.

En la tabla 1 se presenta el comportamiento del voltaje del panel (V_{pv}) y el voltaje de salida del convertidor (V_{out}) al modificar el ciclo de trabajo (D), el ciclo de trabajo se modificó desde 0 al 50% con incrementos del 5%. En la figura 9 se muestra el comportamiento del voltaje de entrada (línea azul) y salida del convertidor (línea naranja).

Tabla 1 Comportamiento del convertidor CD-CD.

| % Ciclo de trabajo | V_{pv} | V_{out} |
|--------------------|----------|-----------|
| 0 | 30.7 | 29.8 |
| 5 | 30.5 | 31.1 |
| 10 | 30.2 | 32.5 |
| 15 | 29.8 | 34 |
| 20 | 29.4 | 35.6 |
| 25 | 28.8 | 37.1 |
| 30 | 27.7 | 38.2 |
| 35 | 25.8 | 38.5 |
| 40 | 22.2 | 36.5 |
| 45 | 19 | 34.7 |
| 50 | 16.3 | 34.2 |

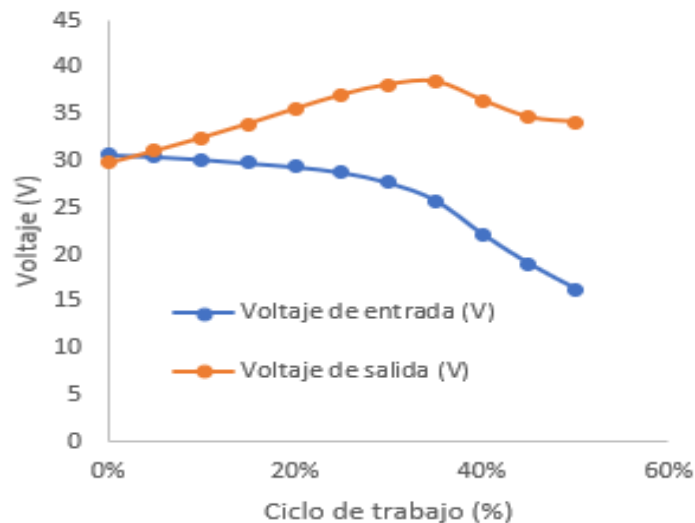


Figura 9 Comportamiento de los voltajes en el convertidor CD-CD.

Una de las ventajas que presenta el diseño de sistemas de control embebidos en las tarjetas NI myRIO es que operan de forma autónoma sin la necesidad de utilizar una computadora. Para obtener información del comportamiento del controlador P&O para el MPPT se utilizó la computadora para el monitoreo del voltaje y corriente

del panel, así como del cálculo de la potencia de este. En figura 10 se presenta el comportamiento del algoritmo P&O, al realizar el experimento, la potencia máxima del panel fue de 123 W y se obtuvo con un ciclo de trabajo del 37%.

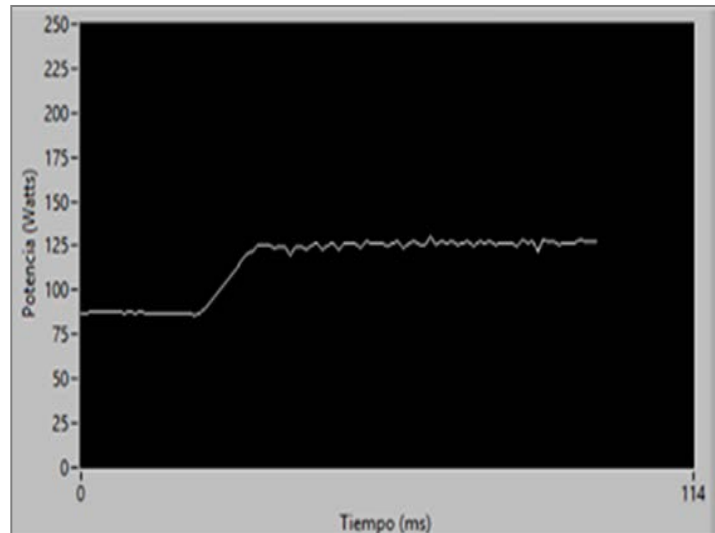


Figura 10 Respuesta del algoritmo MPPT.

Al extraer la potencia máxima del panel fotovoltaico se obtiene una señal de voltaje de corriente directa, para suministrar esta energía a cargas de corriente alterna o tener la opción de transferir la energía fotovoltaica generada a la REP de corriente alterna se manipula la energía utilizando el convertidor CD-CA. En la figura 11 se presenta el comportamiento de las cuatro señales de control que se utilizan para el convertidor CD-CA. Estas señales activan una de las ramas del convertidor mientras la otra permanece apagada. Para activar la primera rama se utiliza una señal de baja frecuencia (amarilla) y una de alta frecuencia (azul), mientras que para activar la segunda rama se activa la otra señal de baja frecuencia (verde) y la otra señal de alta frecuencia (rosa).

Para comprobar el comportamiento del sistema fotovoltaico con los controladores embebidos se utilizó el prototipo experimental que se presenta en la figura 12. Este es el prototipo experimental que corresponde al diagrama que se presentó en la figura 1. Además, en la figura 13 se presenta la salida del convertidor CD-CA sin utilizar el filtro LC, y en la figura 14 se muestra la señal empleando el filtro LC.

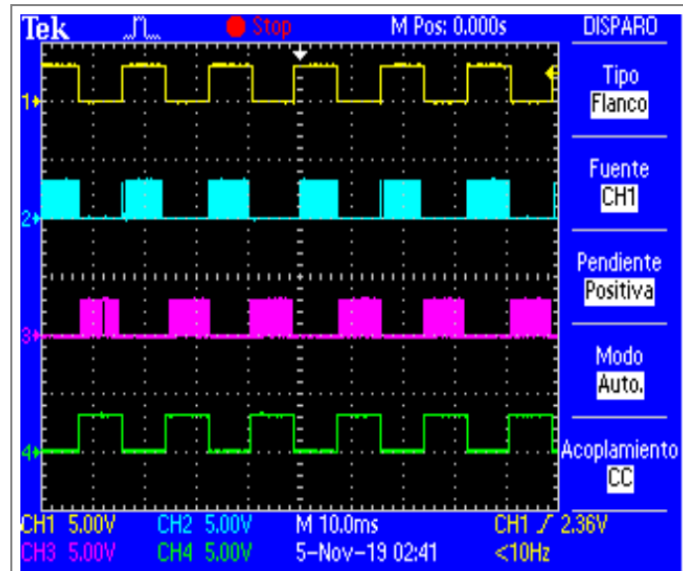


Figura 11 Señales de control para el convertidor CD-CA.



Figura 12 Prototipo experimental.

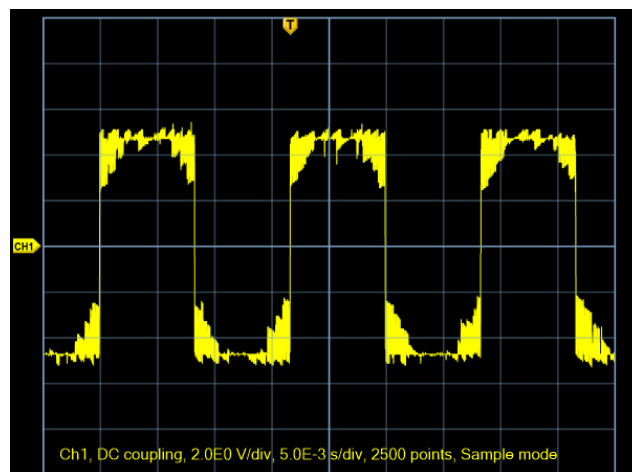


Figura 13 Señal de salida del convertidor CD-CA sin filtro.

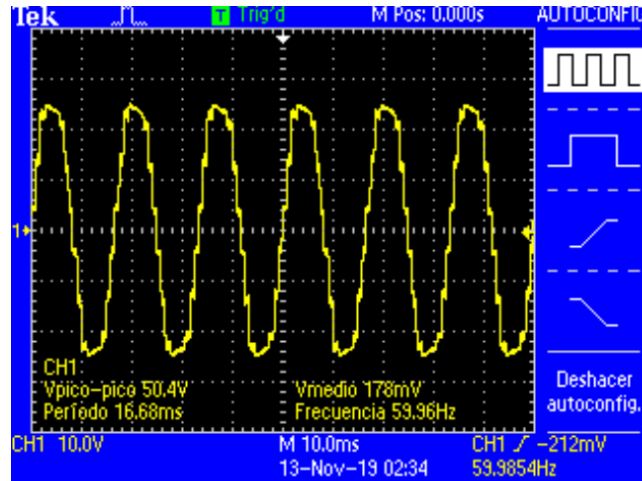


Figura 14 Señal de salida del convertidor CD-CA con filtro.

4. Discusión

En este artículo se presenta el diseño e implementación de un sistema de control embebido capaz de extraer la máxima potencia de un panel fotovoltaico, aunque existan perturbaciones como cambios en las condiciones climáticas, cambios en la carga resistiva conectada al bus de CD y las perturbaciones provocadas por el convertidor CD-CA conectado en cascada con el convertidor CD-CD. Además, se presenta la señal de salida del convertidor CD-CA, la cual es una señal con la misma frecuencia que la señal de corriente alterna de la red eléctrica principal suministrada por CFE. Como trabajos a futuro, es necesario implementar un sistema de control capaz de manipular la amplitud de la señal senoidal de salida del convertidor CD-CA, logrando manipular la energía que se transfiere a una carga de corriente alterna o la energía que se transfiere a la red eléctrica principal de corriente alterna.

5. Conclusiones

Para comprobar el comportamiento del prototipo experimental que se presenta en este trabajo se conectaron dispositivos electrónicos que pueden operar con niveles de corriente alterna como los que genera el prototipo, estos dispositivos fueron laptops y equipos de audio. Los controladores realizaron su función al conectar y desconectar estos dispositivos, extrayendo la máxima potencia del panel fotovoltaico y manteniendo la señal senoidal.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Attanasio, R., Gennaro, F., & Scuderi, G. (2013, October). A grid tie micro inverter with reactive power control capability. In AEIT Annual Conference, 2013 (pp. 1-6). IEEE.
- [2] Bae, S., & Kwasinski, A. (2012). Dynamic modeling and operation strategy for a microgrid with wind and photovoltaic resources. *IEEE Transactions on smart grid*, 3(4), 1867-1876.
- [3] Dizqah, A. M., Maheri, A., Busawon, K., & Kamjoo, A. (2015). A multivariable optimal energy management strategy for standalone dc microgrids. *IEEE transactions on power systems*, 30(5), 2278-2287.
- [4] Hasanien, H. M. (2016). An adaptive control strategy for low voltage ride through capability enhancement of grid-connected photovoltaic power plants. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(4), 3230-3237.
- [5] Jin, C., Wang, P., Xiao, J., Tang, Y., & Choo, F. H. (2014). Implementation of hierarchical control in DC microgrids. *IEEE transactions on industrial electronics*, 61(8), 4032-4042.
- [6] Lin, F., Li, K., & Liu, Y. (2011, June). A design and implementation of edge controller for SPWM waves. In 2011 IEEE International Conference on Information and Automation (pp. 764-767). IEEE.
- [7] Morstyn, T., Hredzak, B., Demetriades, G. D., & Agelidis, V. G. (2016). Unified distributed control for DC microgrid operating modes. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(1), 802-812.
- [8] Selmi, T., Abdul, M., Devis, L., Davis, A. (2014). P&O MPPT Implementation using MATLAB/Simulink. *Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 5(14), 978-981.
- [9] Shadmand, M. B., & Balog, R. S. (2014). Multi-objective optimization and design of photovoltaic-wind hybrid system for community smart DC microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(5), 2635-2643.
- [10] Yu, X., She, X., Zhou, X., & Huang, A. Q. (2014). Power management for DC microgrid enabled by solid-state transformer. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 954-965.

- [11] Sun, K., Zhang, L., Xing, Y., & Guerrero, J. M. (2011a). A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(10), 3032-3045.
- [12] Zhang, L., Sun, K., Xing, Y., Feng, L., & Ge, H. (2011a). A modular grid-connected photovoltaic generation system based on DC bus. *IEEE transactions on power electronics*, 26(2), 523-531.
- [13] Zhang, L., Sun, K., Xing, Y., Feng, L., & Ge, H. (2011b). A modular grid-connected photovoltaic generation system based on DC bus. *IEEE transactions on power electronics*, 26(2), 523-531.