

Control de un Sistema de Energía Solar Para la Alimentación de Cargas Aisladas

Lucas L. Martín Fernández[#], Federico M. Serra[#], Guillermo L. Magaldi[#]

[#]Laboratorio de Control Automático (LCA), Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias (FICA), Universidad Nacional de San Luis, Villa Mercedes, San Luis, Argentina

lucaslucianomartinfernandez@gmail.com

Abstract— The implementation of a system which controls the power extracted from a photovoltaic panel supplying an isolated load is presented in this paper. The system consists of an isolated DC-AC converter, composed by a DC-DC converter which maximizes the power of the solar resource using a maximum power point tracking algorithm (Perturbation and Observation), and a DC-AC converter responsible for generating the sinusoidal output voltage. The design and implementation of the high frequency transformer is presented. The controllers of the converters are implemented in a low cost processor. Simulation and experimental results validate the system performance.

Resumen— Se presenta la implementación de un sistema que permite controlar la potencia extraída de un panel fotovoltaico mediante un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (perturbación y observación) y acondicionarla a los valores requeridos por una carga monofásica aislada. El sistema completo es un convertidor DC-AC aislado, el cual está formado por un convertidor DC-DC encargado de maximizar la potencia extraída del recurso solar, y un convertidor DC-AC que tiene por finalidad generar la tensión de salida sinusoidal requerida por la carga. Se realiza el diseño del transformador elevador de alta frecuencia que permite generar los niveles de tensión de salida requeridos a partir de la tensión disponible en los paneles. Los controles de ambos convertidores se implementan en un único procesador de bajo costo. Se presentan resultados de simulación y experimentales que validan el comportamiento del sistema propuesto.

Palabras claves— Energía solar, Convertidor DC-AC, Sistemas aislados, Perturbación y observación.

I. INTRODUCCIÓN

Con el aumento de la demanda de energía, los problemas ambientales del mundo y el agotamiento de los recursos energéticos (carbón, petróleo y gas, entre otros) se hace necesario, en un futuro inmediato, disponer de nuevas fuentes de energía que sean renovables y limpias [1].

La energía solar es un tipo de energía limpia y abundante que está siendo ampliamente desarrollada en los últimos años a partir de la utilización de paneles fotovoltaicos. El flujo de energía proveniente de un panel es controlado por convertidores de potencia, los cuales se conectan directamente a la red o alimentan una carga arbitraria según la aplicación, como se muestra en la Fig. 1.

Los avances en sistemas fotovoltaicos autónomos han permitido que un dispositivo determinado pueda funcionar independientemente de la red eléctrica o en lugares donde ésta sea inaccesible [2, 3]. Por lo tanto, y debido a que existen espacios recreativos que se encuentran alejados de la red eléctrica, surge la necesidad de construir prototipos autónomos que permitan conectar alguna carga aislada tales

como teléfonos celulares, computadoras portátiles, entre otros.

El objetivo de este trabajo es la implementación de un prototipo que pueda alimentar cargas arbitrarias aisladas independientes de la red eléctrica a partir de la generación de energía utilizando paneles fotovoltaicos y que en un futuro pueda ser instalado en espacios recreativos dentro de escuelas, universidades, etc.

Debido a esto, en el Laboratorio de Control Automático (LCA) se decidió implementar un sistema de estas características que nos permita implementar alguna estrategia de control para mejorar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos extrayendo la máxima potencia disponible en el recurso solar y poder desarrollar un sistema autónomo de generación de corriente alterna (*Alternating Current, AC*) para alimentar el tipo de cargas antes mencionadas.

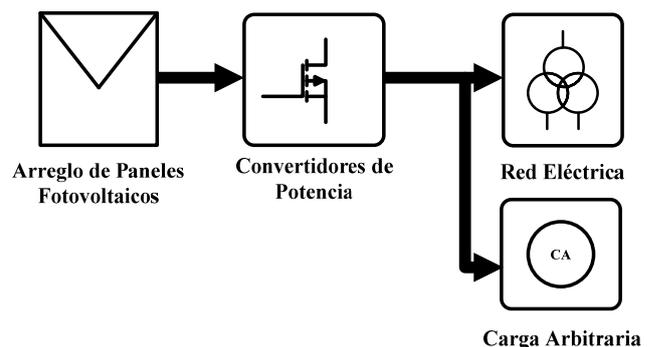


Figura 1: Diagrama en bloques representativo de la interconexión entre diferentes sistemas de energía.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección I, la introducción presentada, en la sección II se presenta el sistema propuesto, en la sección III se muestran los resultados de simulación, en la sección IV se muestran los resultados experimentales, y en la sección V, las conclusiones.

II. SISTEMA PROPUESTO

Los convertidores DC-AC permiten obtener a la salida una tensión AC a partir de una tensión corriente continua (*Direct Current, DC*) aplicada a la entrada. Estos se basan, fundamentalmente, en el encendido y apagado de llaves semiconductoras de potencia [4].

El sistema propuesto consta de varias etapas, como se muestra en la Fig. 2. En la etapa I se muestra el panel fotovoltaico, este está conectado a un convertidor de DC-DC aislado, con control del seguimiento del punto de máxima potencia (*Maximum Power Point Tracker, MPPT*) que

conforma la etapa II, esta etapa se compone de un convertidor DC-AC, un transformador de alta frecuencia (*High Frequency*, **HF**), un convertidor AC-DC y una barra de DC. Como etapa III se conecta un convertidor DC-AC monofásico, el cual a su salida tiene un filtro LC pasa-bajas.

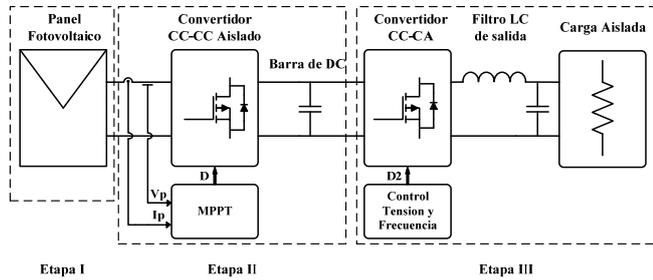


Figura 2: Diagrama en bloques del sistema propuesto.

A. Panel Fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos tienen la característica de producir energía eléctrica a partir del efecto fotoeléctrico. Este efecto consiste en la emisión de electrones por medio de un determinado material, cuando este es afectado por una radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta).

Los paneles fotovoltaicos presentan curvas características de operación como la mostrada en la Fig. 3, las cuales tienen diferentes niveles dependiendo de la intensidad de la radiación que llegue a la celda fotosensible. El punto de operación sobre la curva se puede cambiar produciendo variaciones en el valor de la carga vista por el panel, de esta forma si variamos la impedancia vista por el panel podemos hacer trabajar el panel en el MPP de la curva.

Por lo antes mencionado, si conectamos en bornes del panel fotovoltaico un convertidor de potencia, este al variar su ciclo de trabajo nos permitiría variar la impedancia vista por el panel, y así podríamos modificar el punto de la curva en el que está trabajando permitiéndonos extraer la mayor energía disponible en el recurso solar. En la Fig. 4 se muestra un diagrama equivalente que relaciona una impedancia variable y un convertidor de potencia que nos permite adaptar la impedancia vista por el panel.

Para lograr hacerlo trabajar en el punto de máxima de potencia, se deben conmutar los interruptores de potencia aplicando un control basado en MPPT, estos pueden ser perturbación y observación (**P&O**), conductancia incremental (*Incremental Conductance*, **IC**), lógica difusa, entre otros.

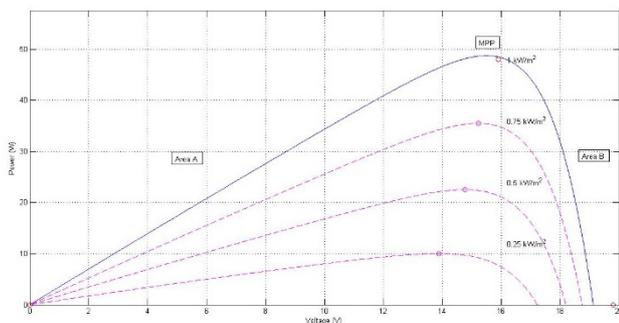


Figura 3: Curvas características de potencia vs tensión para diferentes valores de irradiancia del panel Siemens M75.

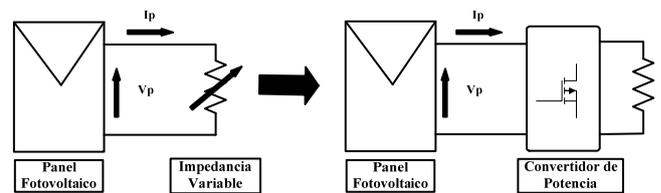


Figura 4: Circuito equivalente de adaptación de impedancia.

En este trabajo se optó por implementar un algoritmo de P&O, por su simplicidad y bajo costo computacional, en la Fig. 5 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo implementado.

El algoritmo consiste en observar el sistema, realizando la medición de la tensión y corriente del panel, y se perturba variando el ciclo de trabajo del convertidor de potencia. El parámetro que se utiliza para modificar el ciclo de trabajo del inversor es la potencia calculada a partir de los valores de tensión y corriente capturados por las mediciones.

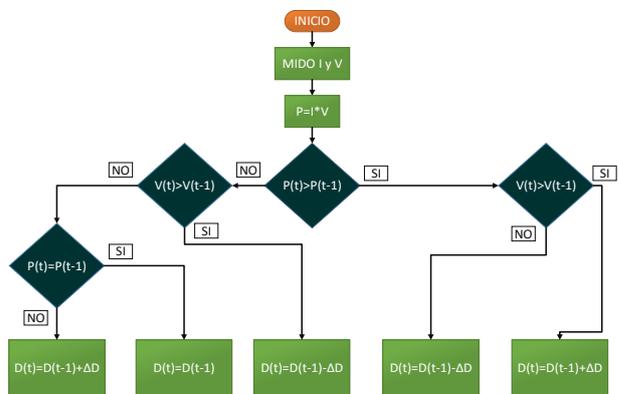


Figura 5: Algoritmo de MPPT de perturbación y observación (P&O).

B. Convertidor DC-DC Aislado

El convertidor DC-DC aislado que conforma la etapa II del sistema propuesto, está constituido por un convertidor DC-AC en configuración puente completo, el cual conectado a su salida tiene un transformador de HF que permite elevar la tensión a los valores requeridos por el convertidor de salida. En el secundario del transformador se conecta un convertidor AC-DC (rectificador monofásico), seguido a este se encuentra una barra de DC en combinación serie/paralelo que permite filtrar la tensión pulsante entregada por el rectificador, con una capacidad de 330uF - 900 V. En la Fig. 6 se muestra el diagrama del circuito antes mencionado.

La placa del convertidor consta de 4 semiconductoras (MOSFET IRFP250 de 30A y 200V), conectadas en configuración puente, como se ve en la Fig. 7. Esta placa se diseñó mediante el software Altium.

El diseño del transformador de HF se realizó con el fin de cumplir con los parámetros expresados en la Tabla I. En la Fig. 8 se muestra una foto del mismo.

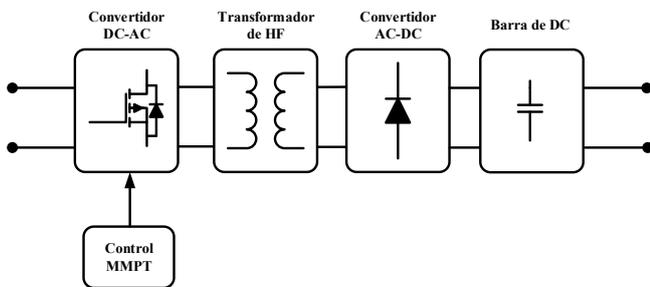


Figura 6: Diagrama en bloques del convertidor DC-DC aislado.

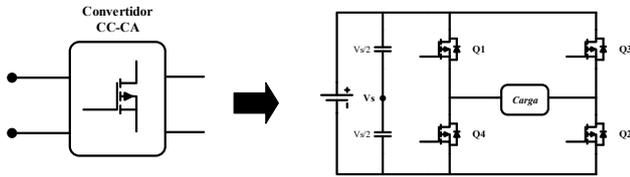


Figura 7: Diagrama del convertidor puente completo.

TABLA I
PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR HF DISEÑADO

VPri	15 V
Vsec	155 V
IPri	3.2 A
ISec	0.309 A
Snom	48 VA
n	10
Jrms	0.4936 A/mm ²
B	100 mT
$A_{cu_{pri}}$	6.64 mm ²
$A_{cu_{sec}}$	0.66 mm ²
Npri	3
Nsec	30
DPri	5.24 mm
Dsec	1.64 mm



Figura 8: Fotografía del transformador HF.

C. Convertidor DC-AC

Este convertidor tiene la misma configuración y las mismas características que el de la etapa II, con la salvedad que en este caso se realiza un control a lazo abierto fijando la amplitud y frecuencia de la señal sinusoidal deseada a través de una modulación por ancho de pulso (*Pulse Width Modulation, PWM*) con referencia sinusoidal.

A la salida de este convertidor se conecta un filtro inductivo-capacitivo, que tiene como finalidad filtrar cualquier señal que sea mayor a los 500 Hz, conformado por una inductancia $L = 2.25mH$ y un capacitor $C = 45\mu F$. En la Fig. 9 se muestra el esquema del circuito implementado.

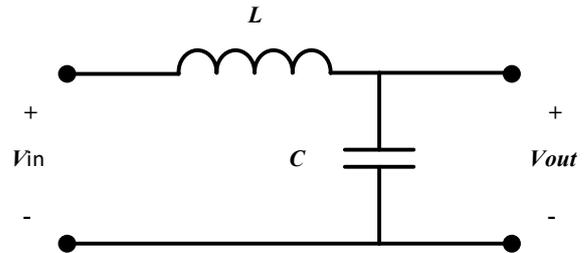


Figura 9: Circuito pasa bajos L-C.

III. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En este apartado se muestran resultados de simulación que muestran el comportamiento del sistema completo. También se muestra cómo trabaja el algoritmo de perturbación y observación buscando el punto de máxima potencia.

Con el fin de evaluar el desempeño de la estrategia de MPPT del panel fotovoltaico, se realizaron simulaciones utilizando el software Simulink que funciona bajo la plataforma de MatlabTM. En la Fig. 10 se muestra un diagrama esquemático del sistema propuesto utilizado para realizar las simulaciones. En el diagrama se pueden observar los bloques principales del sistema como son, el panel fotovoltaico, el convertidor DC-AC, el transformador elevador de alta frecuencia, el circuito rectificador y la barra de CC, el convertidor de DC-AC, el filtro LC de salida, y los respectivos bloques de control. Los bloques fueron configurados teniendo en cuenta los elementos utilizados en la implementación, como tensión de alimentación, dispositivos de potencia, valores de capacidad e inductancia y carga utilizada, entre otros. En la Tabla II se presentan los parámetros utilizados en la simulación.

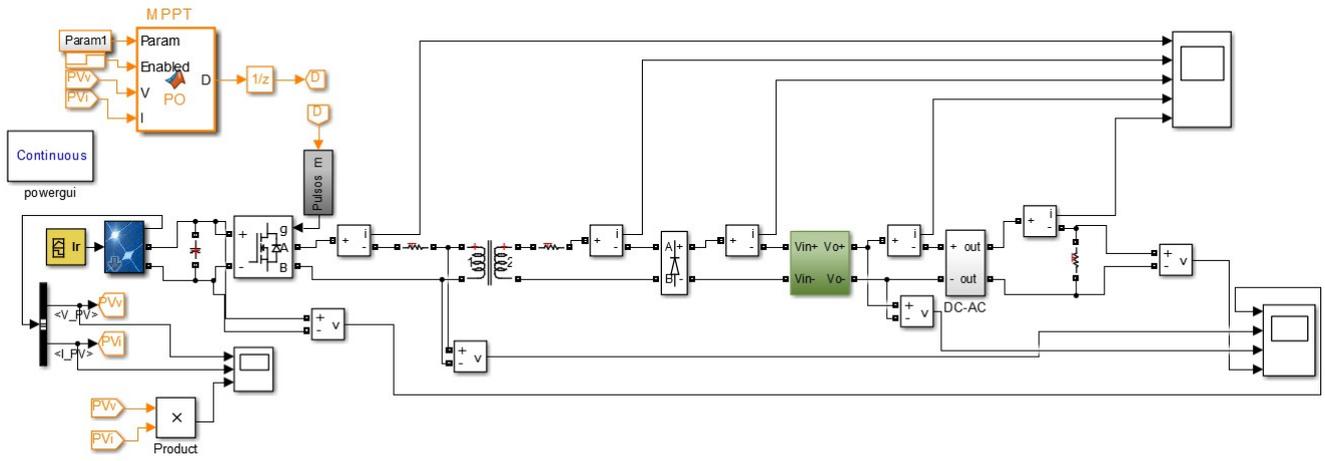


Figura 10: Esquema de simulación para el sistema propuesto.

TABLA II
PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN.

Irradiancia	1000Kw/m2
RL	5000Ω
C	45uf
L	2.25mHy
n	16:311V
Vp	16V
Ip	3A

En la Fig. 11 se muestra la curva del panel fotovoltaico simulado, para distintos valores de irradiancia, donde se puede observar cómo la estrategia de control de MPPT (P&O) busca trabajar siempre en el punto de máxima potencia de cada curva.

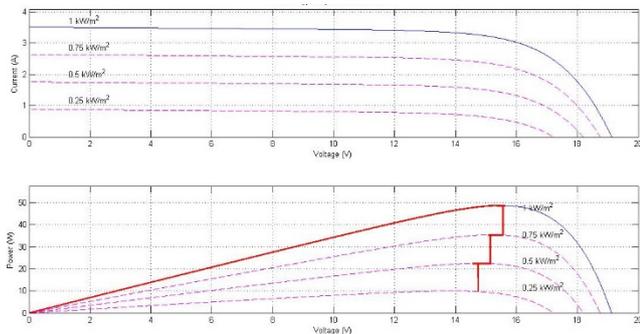


Figura 11: Curvas características de potencia del panel para diferentes valores de irradiancia, comparada con la estrategia de perturbación y observación implementada.

Como se mencionó anteriormente, tenemos un transformador de alta frecuencia que eleva los valores de tensión del panel fotovoltaico, de 16 V, que es la tensión de máxima potencia del panel, a 220 V eficaces. En la Fig. 12 podemos observar las tensiones del panel, del primario y secundario del transformador.

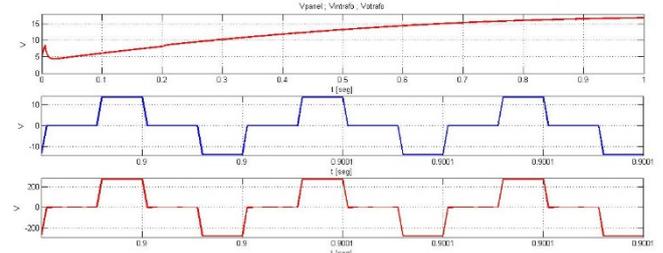


Figura 12: Tensiones de panel, primario y secundario del transformador.

A continuación, en las Fig. 13 se muestra la señal de salida del filtro LC, todo esto simulado con carga resistiva pura. Se puede observar, que la tensión de la salida del sistema es una señal sinusoidal de 50 Hz y un valor eficaz de $V_{out} \approx 200V$.

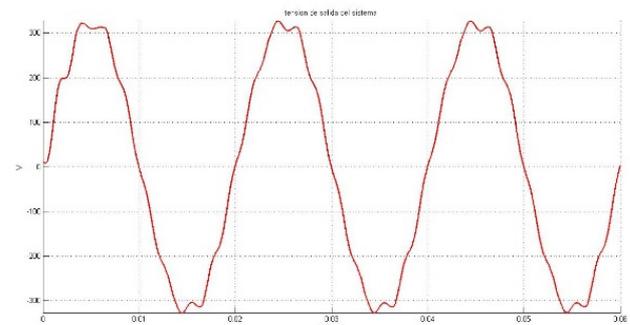


Figura 13: Tensión a la Salida del filtro LC con carga resistiva.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se exponen los resultados experimentales que permiten validar el desempeño del sistema propuesto.

El prototipo experimental fue construido en el LCA, el mismo consta de dos placas que contienen los convertidores y sus disipadores, como se ve en la Fig. 14. También, se compone de una placa que contiene el rectificador y la barra de DC, que se muestra en la Fig. 15. Para el sensado de la corriente y tensión del panel, se utilizaron dos placas (Fig. 16 y Fig. 17 respectivamente). Para implementar el control de MPPT y definir la amplitud y frecuencia de la señal de salida del sistema se utilizó un DSC dsPIC30F4011 de microchip. En la Fig. 18 se muestra una placa del mismo.

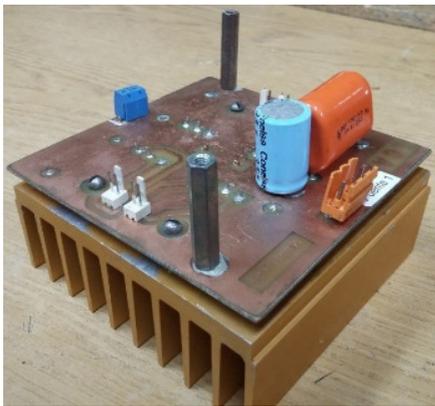


Figura 14: Fotografía del convertidor montado sobre su disipador.

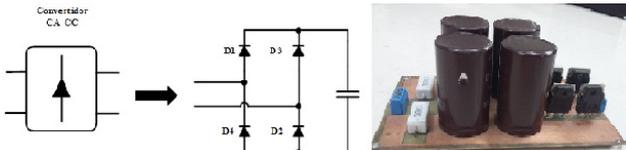


Figura 15: De derecha a izquierda, circuito rectificador y barra de DC y su respectivo esquema.

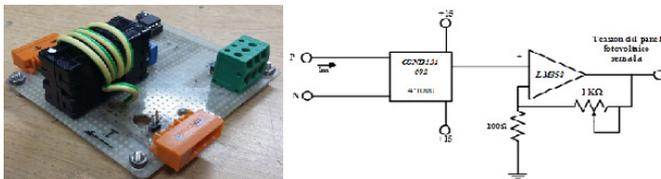


Figura 16: De izquierda a derecha, Circuito de sensado de corriente y su respectivo esquema.

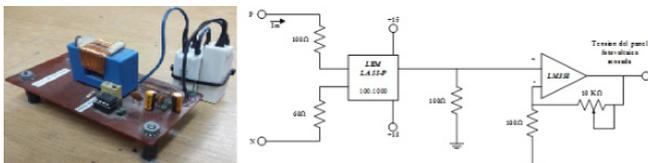


Figura 17: De izquierda a derecha, circuito de sensado de tensión y su respectivo esquema.

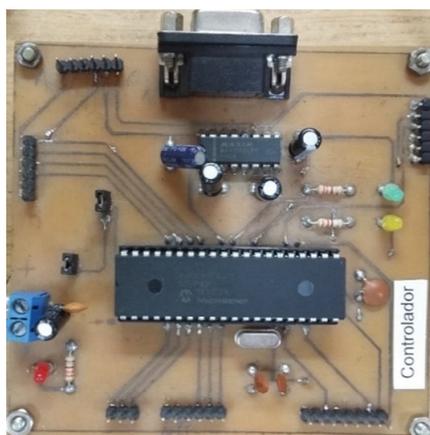


Figura 18: Fotografía de la placa que contiene al controlador.

Se realizaron los ensayos correspondientes con el panel fotovoltaico, pero se decidió presentar los ensayos realizados con una fuente de laboratorio emulando al panel fotovoltaico para no depender de los cambios climáticos.

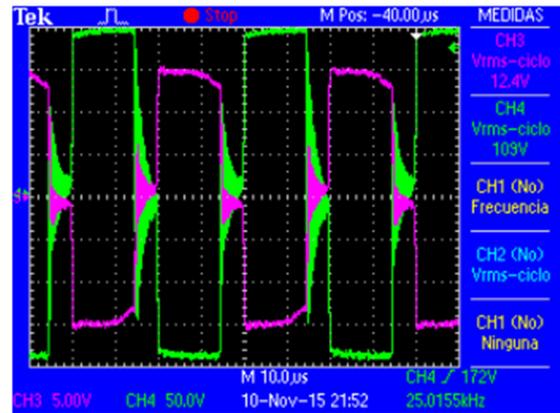
También, debido a la disponibilidad de un solo panel fotovoltaico (*panel Siemens M75*), se decidió reducir la

relación de transformación para la implementación del hardware, esta era 16/400V a 16/152V, logrando a la salida una tensión sinusoidal de 110V de valor eficaz y 50Hz.

D. Ensayo sin control MPPT de P&O

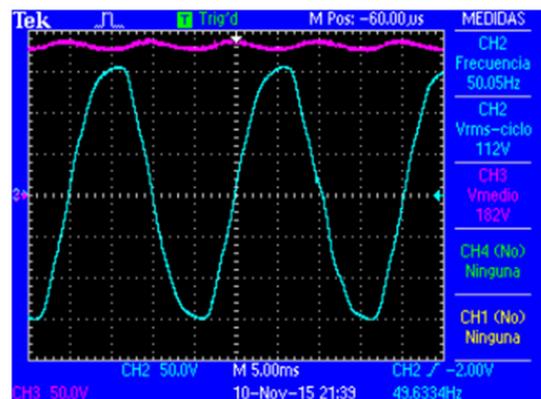
Se presentan ensayos donde el convertidor DC-AC de la etapa I se controla con un ciclo de trabajo fijo del 50%.

En la Fig. 19, se observa la tensión de entrada y salida del transformador, con lo que se corrobora el desempeño del mismo como elevador de tensión en alta frecuencia. Se obtiene una tensión alterna cuadrada de 110V eficaces con una frecuencia de 25kHz. También se pueden observar los valores pico de cada señal, siendo el valor pico del primario del transformador de 15V y el del secundario de $\approx 200V$.



TPS 2014 - 12:05:48 10/11/2015
Figura 19: Tensión de entrada (violeta) y salida (verde) del transformador de HF.

En la Fig.20, se muestra la tensión de salida del Barra de DC implementado y la salida del filtro LC conectado a una carga resistiva pura de 7K Ω . Se puede observar que la tensión a la salida del filtro tiene una amplitud de 150V, que corresponde a un valor eficaz de 110V, y con frecuencia constante de 50Hz.



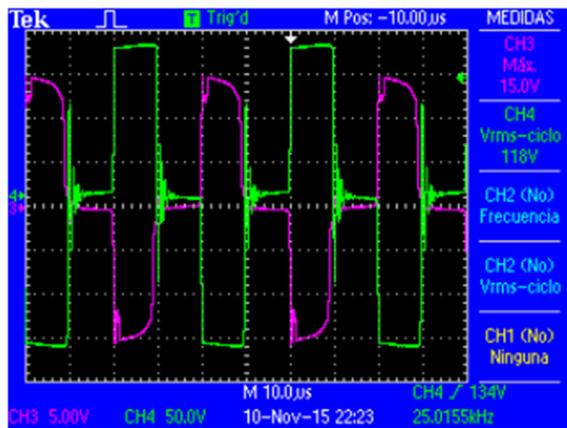
TPS 2014 - 11:53:20 10/11/2015
Figura 20: Tensión de salida del filtro LC (canal 2) y Tensión del Bus de continua (canal 3).

E. Ensayo con control MPPT de P&O

Al utilizar en este ensayo una fuente de laboratorio emulando al panel fotovoltaico, se procedió a variar la tensión y corriente de la misma para observar el comportamiento del sistema, emulando las perturbaciones

que podrían aparecer en el sistema al variar la temperatura del panel o la irradiancia que le llegue al mismo. Una vez que se llegó a los valores de tensión y corriente, para los cuales el panel estaría entregando la máxima potencia, se observó cómo se estabilizaba el ciclo de trabajo automáticamente por medio del algoritmo de MPPT de P&O implementado y se procedió a la captura de las señales del sistema.

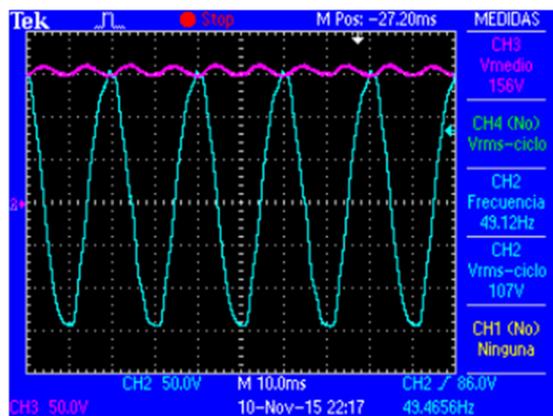
En la Fig. 21, se muestra la tensión en el primario y secundario del transformador, donde se puede observar claramente como el ciclo de trabajo es menor en comparación con el ciclo de trabajo constante que se fijó en el apartado anterior, ver Fig. 20. También se puede observar los valores pico de cada señal, siendo el del primario del transformador de 15V y el del secundario $\approx 200V$, y ambas señales tienen una frecuencia de 25kHz.



TPS 2014 - 12:36:51 10/11/2015

Figura 21: Primario del Transformador (canal 3) y secundario del transformador (canal 4).

En la Fig. 22 se muestran las señales de salida de la barra de DC y la salida del filtro LC el cual tiene como carga una resistencia de $7K\Omega$. Se puede observar que la tensión a la salida del filtro tiene una amplitud de 150V, que corresponde a un valor eficaz de 110V, y con una frecuencia constante de 50HZ.



TPS 2014 - 12:30:34 10/11/2015

Figura 22: Salida del filtro LC (canal 2) y salida del bus de CC (canal 3).

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la implementación de un sistema de adaptación de energía proveniente de un panel fotovoltaico con el fin de alimentar una carga aislada, utilizando una estrategia de seguimiento del máximo punto de potencia.

Primeramente, se realizó el estudio de las diferentes estrategias de MPPT, para luego elegir una para su implementación, en este caso se eligió la estrategia de P&O por su simplicidad a la hora de ser implementada y por su bajo costo computacional.

Se realizaron ensayos de simulación y experimentales que mostraron el correcto desempeño de la estrategia de control y del funcionamiento del sistema como fuente adaptable de energía.

Los resultados experimentales mostraron que el prototipo de adaptación de energía se comporta según lo estipulado. Se logró obtener en la salida del sistema una tensión monofásica de amplitud y frecuencia constantes de acuerdo con los requerimientos de una carga monofásica resistiva.

Como propuesta de trabajo futuro se pretende evaluar el desempeño del sistema para cargas no-lineales. También, se pretende sensar la tensión, frecuencia y corriente a la salida del sistema, para así poder controlar la señal de salida y realizar algún sistema de protección que evite la rotura del prototipo o de la carga conectada en caso de algún defecto en el funcionamiento del mismo. Y para completar el sistema, se propone realizar un circuito que cargue algún tipo de baterías cuando el sistema no esté en uso para evitar la pérdida de energía y tener alguna reserva para cuando no esté disponible la luz solar.

REFERENCIAS

- [1] Farfán R.F., C.A. Cadena, L.T. Villa (2013). *Uso de convertidores Boost en sistemas de seguimientos del punto de máxima potencia de sistemas fotovoltaicos autónomos.*, Acta de la XXXVI Reunión de trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente., Vol.1, pp 08.97 – 08.104.
- [2] Santiago González J.A., Cruz Colon J., Otero De León R., Lopez Santiago V., Ortiz Rivera E.I. *Three Phase Induction Motor Drive Using Flyback Converter and PWM Inverter Fed from a Single Photovoltaic Panel.* IEEE 2011.
- [3] Farfán R.F., C.A. Cadena, L.T. Villa (2013). *Uso de convertidores Boost en sistemas de seguimientos del punto de máxima potencia de sistemas fotovoltaicos autónomos.*, Acta de la XXXVI Reunión de trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente., Vol.1, pp 08.97 – 08.104.
- [4] Rashid M. (2004) *Electrónica de Potencia: Circuitos, Teoría y Aplicaciones.* Prentice Hall, 2da edición, México