

Diseño de un cargador de baterías en aplicaciones de energía solar

Rafael Gallardo A.¹, Sebastián Placencia L.¹, Luis G. González M.²

¹ Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca, Avenida 12 de Abril y Agustín Cueva, Cuenca, Ecuador, 010150.

² Proyecto Prometeo, Departamento de Electrónica y Comunicaciones, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela, 5101.

Autor para correspondencia: lgerardo@ula.ve

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 20 de octubre de 2014

RESUMEN

En este artículo se diseña un cargador de baterías para aplicaciones aisladas alimentado con energía solar fotovoltaica, se utiliza un convertidor DC-DC reductor y paneles solares con potencia nominal de 100W. En el sistema de control es aplicado un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia llamado perturbar y observar con el fin de extraer la máxima potencia disponible en el panel solar utilizando un modulador PWM que controla la corriente de salida en el panel solar. Los elementos pasivos del convertidor son calculados para operar en el modo de conducción continua, el sistema de control utiliza un dsPIC30F4011, y su funcionamiento es comprobado experimentalmente.

Palabras clave: Convertidor reductor, cargador de baterías, energía solar, seguimiento del punto de máxima potencia.

ABSTRACT

This article addresses the design of a battery charger for off-grid applications powered by photovoltaic solar energy, using a DC-DC buck converter and solar panels with nominal power of 100W. In the control system a perturb and observe (P&O) maximum power point tracking algorithm is applied aiming of operating at the optimum point, using a PWM modulator which controls the output current of the solar panel. The passive elements of the converter are calculated to operate in a continuous conduction mode. The control system uses a dsPIC30F4011, and its performance experimentally verified.

Keywords: Buck converter, battery charger, solar energy, maximum power point tracking.

1. INTRODUCCIÓN

El auge de las energías renovables en los últimos años se ha dado principalmente por el aumento de la demanda energética mundial al mismo tiempo que sus costos y al alto impacto ambiental que trae el uso de la energía fósil. La energía solar fotovoltaica y la energía eólica, entre otras, pertenecientes a las llamadas energías limpias que hoy en día presentan la mayor explotación de estas y pueden ser utilizadas fácilmente en sistemas de baja potencia. Para aplicaciones en zonas aisladas, especialmente en áreas rurales o remotas del sistema eléctrico nacional, los sistemas de energía solar fotovoltaica conectadas a un banco de baterías con una interface de conversión de energía DC-DC ó DC-AC hacia la carga, que puede ser una opción importante para generar energía eléctrica confiable (Lo *et al.*, 2011; Anand *et al.*, 2012).

En las aplicaciones de cargadores de baterías antiguos, se utilizaban topologías con eficiencia reducida, por ejemplo, cuando el panel es conectado a la batería directamente hasta completar su

carga, en este caso son topologías simples y de bajo costo al igual que su rendimiento energético, dado que el punto de operación del panel solar en la mayoría de los casos no es adecuado (Chang & Ng, 1994). Otras topologías que van desde operar a un voltaje fijo sin tomar en cuenta la radiación solar (Ferdous *et al.*, 2014), o el uso de distintos convertidores DC-DC como el buck, boost o derivados del buck-boost, que puedan operar en distintos puntos de trabajo y así exponer al panel solar a una impedancia de carga variable entendida como la impedancia de entrada equivalente del convertidor en un punto de trabajo donde el panel solar entregue su máxima potencia (Chen *et al.*, 2011).

Hoy en día una gran cantidad de investigaciones del área permiten la evolución en aplicaciones de carga de baterías a partir de paneles fotovoltaicos, esta evolución ha derivado en el diseño de cargadores inteligentes, donde estos sistemas buscan operar en el punto de máxima potencia, además de alargar el ciclo de vida de la batería limitando la corriente de carga en algunos casos. (Matsui *et al.*, 2007; Anand *et al.*, 2012; Wang & Zhang, 2010).

En el caso donde los cargadores de batería que buscan operar en el punto de máxima potencia ante condiciones climáticas variables como el sombreado parcial, se necesita utilizar algoritmos de seguimiento de máxima potencia "MPPT", donde uno de los más conocidos y utilizados es el llamado Perturbar y Observar "P&O" a diferencia de otros, este es un proceso iterativo que converge al punto de máxima potencia de forma simple y rápida, este algoritmo tiene la ventaja de no necesitar conocer el modelo en detalle del panel solar y solo necesita sensor la potencia de salida del sistema (Hu & Sathiakumar, 2011; Ke *et al.*, 2010).

2. MODELO DE PANEL SOLAR

El panel solar fotovoltaico está constituido por varias celdas fotovoltaicas conectadas entre sí, que son las responsables de transformar los fotones emitidos por la luz en electricidad. La conexión de las celdas solares puede presentarse de varias formas, entre las que se destacan las conexiones en serie y/o paralelo para alcanzar la potencia nominal del panel, dado que cada una por separado presenta una tensión cercana a los 0,7V y potencias hasta 5W.

La Fig. 1, muestra el circuito equivalente de una celda solar que está representado mediante la ecuación (1), donde se toman en cuenta los efectos más importantes en la celda solar. Existen modelos más completos que toman en cuenta otros efectos como por ejemplo el de recombinación de los portadores entre otros (Shekoofa & Taherbanach, 2007). El circuito de la Fig. 1, contiene el circuito equivalente de una celda ideal formada por una fuente de corriente I_c que es directamente proporcional a la irradiación solar. La corriente I_d es la corriente asociada al diodo equivalente, compuesta por la corriente de saturación I_0 dependiente de los parámetros como el voltaje térmico V_t , y el coeficiente de idealidad α . El efecto de la potencia de pérdidas asociadas a la celda están representadas mediante la resistencia serie y paralelo, donde R_s es la suma de todas las resistencias asociadas en serie, que afecta fuertemente el desempeño de la celda cuando se opera en la región de fuente de voltaje. R_p está asociado a la corriente de fuga del diodo que influye cuando se opera en la región de fuente de corriente.

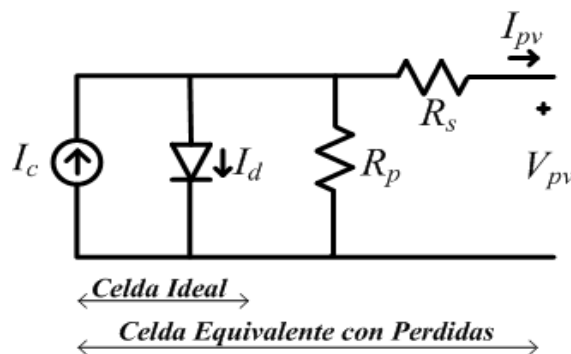


Figura 1. Circuito Equivalente celda solar fotovoltaica.

$$I_{pv} = I_c - I_o \left[e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t \alpha} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (1)$$

El comportamiento entre la tensión y corriente del conjunto de paneles utilizado en esta investigación para una irradiación solar de 1000W/m^2 es mostrado en la Fig. 2, en esta figura se observa que para voltajes de operación bajos la corriente de salida se limita a la corriente de cortocircuito (I_{cc}), esta zona se le llama región de fuente de corriente, en esta región la magnitud depende básicamente de la radiación solar presente en la celda. Otra zona de operación importante es la llamada región de fuente de voltaje, que ocurre en voltajes cercanos al voltaje de circuito abierto (V_{ca}) y la corriente tiende a ser pequeña.

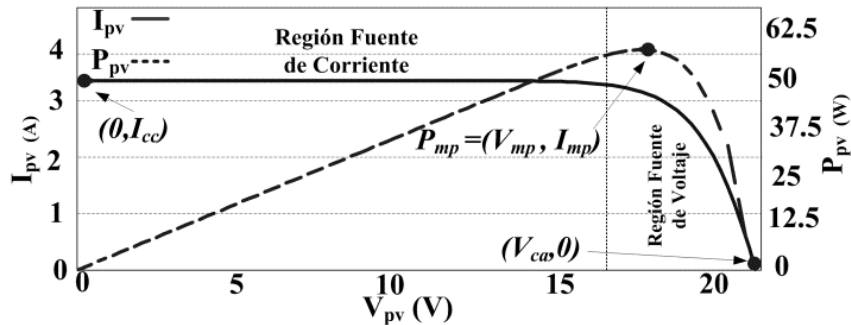


Figura 2. Curva características I_{pv} vs. V_{pv} y P_{pv} vs. V_{pv} del panel solar.

Otro aspecto importante a conocer en el panel solar es el punto de máxima potencia (P_{mp}) ubicado cercano a la frontera de las regiones de operación y definido por las coordenadas (V_{mp} , I_{mp}). En la Tabla 1, se muestra las especificaciones técnicas del tipo de panel solar utilizado en esta investigación. Para alcanzar la potencia nominal del cargador se ha dispuesto dos paneles fotovoltaicos con las mismas especificaciones técnicas en serie.

Tabla 1. Parámetros nominales de panel solar Siemens® SM50-H.

I_{cc} (A)	V_{ca} (V)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)	P_{mp} (W)
3.35	19.8	15.9	3.15	50

3. CONVERTIDOR BUCK

El convertidor buck es uno de los convertidores DC-DC no aislados más utilizados hoy en día. El circuito básico de convertidor buck es mostrado en la Fig. 3. El nombre de esta topología se debe a que permite obtener un voltaje de salida menor a la de entrada.

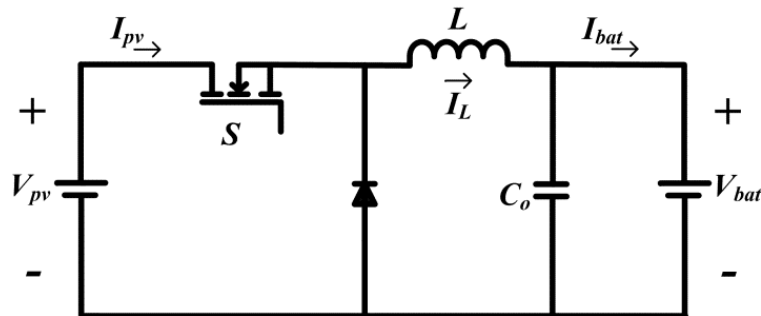


Figure 3. Circuito equivalente convertidor Buck.

En los convertidores conmutados DC-DC existen dos modos de operación básicamente, el modo de conducción continua CCM, y el modo de conducción discontinua DCM, que están estrechamente relacionados con la corriente en el inductor (I_L). En el caso de esta investigación, el convertidor opera en el modo CCM principalmente, debido a que siempre existe una circulación de corriente en el inductor y se presenta una relación entre el voltaje de entrada y salida bajo el modelo de estado promediado mostrado en la ecuación (2).

$$V_{bat} = d \cdot V_{pv} \quad (2)$$

donde d es el ciclo de trabajo, el cual es definido por el sistema de control en el intervalo $0 < d < 1$. Es importante destacar que en esta aplicación el intervalo de operación del ciclo de servicio está limitado por el modo de conducción continua, mediante el voltaje de la batería y el voltaje del panel solar a circuito abierto como se muestra en la ecuación (3). Esto es debido a que el voltaje de salida del convertidor está limitado a la batería y no se presentan tensiones menores a esta en el modo de conducción continua.

$$d_{min} = \frac{V_{bat}}{V_{pvca}} \quad (3)$$

Para el cálculo de la inductancia (L) es importante precisar que se operará bajo el modo de conducción continua, para esto la ecuación (4) define el caso límite entre CCM y DCM (Garcerá *et al.*, 1998).

$$L_{min} \geq \frac{d_{min} \cdot (V_{pvca} - V_{bat})}{2 \cdot I_{bat_{min}} \cdot f_{sw}} \quad (4)$$

donde f_{sw} es la frecuencia de conmutación del convertidor. Es importante destacar que el punto de operación crítico del modo de conducción continua depende de la corriente de salida mínima, para esto se ha fijado el punto mínimo de operación del cargador en el 10% de la potencia nominal del panel solar, de esta manera es calculada $I_{bat_{min}}$.

En este tipo de convertidor conmutado se presenta un voltaje de salida con rizado cuando se utilizan baterías con elevada resistencia interna que depende básicamente de la frecuencia de conmutación y del filtro de salida compuesto por el condensador C_o . El criterio utilizado en (Koutroulis *et al.*, 2001) determina el condensador de salida mínimo mediante la ecuación (5), donde se ha fijado un rizado de voltaje ΔV_{bat} máximo del 2% del voltaje nominal de salida. El punto de operación para cumplir con este criterio ocurre a potencia máxima del panel solar.

$$C_o \geq \frac{I_{pv_{mp}}}{f_{sw} \cdot \Delta V_{bat}} \quad (5)$$

En este caso de aplicación, al conectar la batería en la salida del convertidor buck, el rizado de voltaje está limitado por la resistencia interna de la batería r_{bat} que generalmente está en el orden de unidades de mΩ para el caso de la batería utilizada (modelo 31-AGM-100), produciendo un rizado de voltaje prácticamente despreciable en bornes de la batería.

En la topología del convertidor buck la corriente de entrada es de tipo pulsante, condición que no es recomendable en esta aplicación por el comportamiento no lineal del panel solar y su implicación en el modelo de estado promedio, por esto se incluye un condensador de entrada C_i como se muestra en el Fig. 4, y dimensionado mediante la ecuación (6).

$$C_i \geq \frac{I_{pv_{mp}} \cdot (1 - d_{mp})}{f_{sw} \cdot \Delta V_{pv_{mp}}} \quad (6)$$

donde $\Delta V_{pv_{mp}}$ es el voltaje de rizado permitido, al igual que para el condensador de entrada se ha definido un rizado máximo del 2%.

4. SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA PROPUESTO Y DESEMPEÑO EXPERIMENTAL

En la Fig. 4, se muestra el sistema de conversión de energía propuesto, en la misma se observa el uso del convertidor buck con un sistema de control retroalimentado, sistema que opera en dos modos de funcionamiento dependiendo del estado de carga de la batería; el primero de ellos es el modo de carga con seguimiento de máxima potencia, que consiste en aplicar el algoritmo de seguimiento de máxima potencia P&O utilizado en (Ke *et al.*, 2010), sensando el voltaje y corriente en el panel solar, de manera que se encuentre iterativamente el punto de operación donde se pueda entregar la máxima energía disponible del panel solar. El segundo modo de funcionamiento, llamado carga limitada, consiste en acotar la corriente entregada a la batería en los casos cuando la carga de la batería no lo permita. Eventualmente este modo de operación puede utilizarse para limitar la corriente de carga con la finalidad de regular la temperatura en la batería, aspecto importante en la vida útil de la misma (Yatsui *et al.*, 2012).

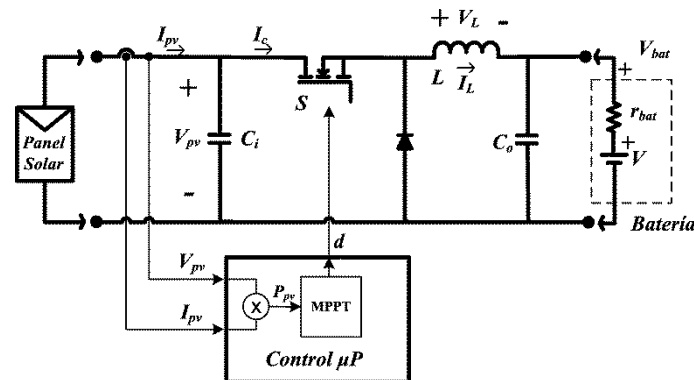


Figura 4. Circuito esquemático del sistema cargador de baterías.

Los parámetros del convertidor utilizado están dados en la Tabla 1, y el montaje de laboratorio es mostrado en la Fig. 5.

Tabla 2. Parámetros del cargador de baterías.

L	C_o	C_i	f_{sw}	V_{bat}
$50\mu H$	$100\mu F$	$100\mu F$	$100kHz$	$12V$

La Fig. 4 muestra el cargador de batería desarrollado, donde se observa que se ha utilizado un núcleo toroide para la inductancia, se ha utilizado el Mosfet IRF540, diodo BYV29, para la excitación de los transistores Mosfet, opto acopladores 6N137 junto a IR2110 como driver de potencia. Para el censado de voltaje y corriente es utilizado un amplificador aislado HCPL-7520 y ACS714 respectivamente y como elemento de control un dsPIC30F4011.

Para el algoritmo de seguimiento de máxima potencia se ha utilizado un tiempo de actualización en el ciclo de trabajo de $T_{ac}=0,9s$, tiempo que debe ser mayor al tiempo de establecimiento definido por el condensador de entrada y la resistencia equivalente a la entrada del convertidor a baja potencia. Otro aspecto importante en la sintonización del algoritmo de seguimiento es el tamaño de escalón, fijado en $\Delta d=0,05$, estos parámetros pueden ser seleccionados en función de la agresividad que se desea obtener en el algoritmo de seguimiento de máxima potencia. Específicamente el tiempo de actualización está estrechamente relacionado con el tiempo de establecimiento de sistema, el tiempo de actualización debe ser mayor que el de establecimiento para poder alcanzar el régimen permanente en el peor de los casos luego de la perturbación realizada por el algoritmo P&O. En el caso de Δd , debe ser capaz de producir un cambio perceptible en la potencia de salida considerando la componente de ruido u oscilaciones presentes en la misma (González *et al.*, 2010).

Para comprobar su funcionamiento, se ha utilizado el software de simulación computacional de

electrónica de potencia Psim® comprobando el funcionamiento deseado, se ha omitido intencionalmente la presentación del comportamiento en las simulaciones computacionales. Para el funcionamiento experimental se ha utilizado un único panel modelo SM50-H a la entrada del cargador de baterías debido a su disponibilidad y una batería de ciclo profundo de material de vidrio absorbente (AGM) de 12V modelo (31-AGM-100), durante la fase experimental, el panel, expuesto a radiación solar en el campus de la Universidad de Cuenca - Ecuador, presenta un comportamiento del algoritmo del seguimiento de máxima potencia mostrado en la Fig. 6. Esta figura presenta una iteración del ciclo de servicio característico del algoritmo perturbar y observar para un periodo de 200s.

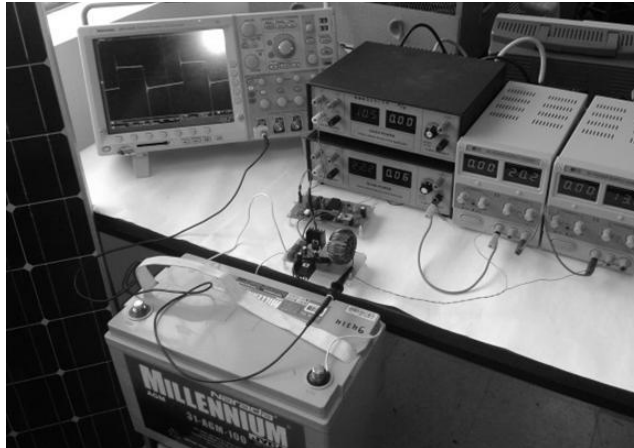


Figura 5. Instrumentación de laboratorio, convertidor buck.

En la Fig. 6, se observa la componente de baja frecuencia del ciclo de servicio (d) mediante un filtro pasa bajo RC. Dado que la salida digital del microcontrolador es de 5V, además de que la salida del microcontrolador es negada por la inversión inherente a la etapa de driver; cuando el ciclo de trabajo medido es cercano a 0V corresponde a $d=1$ y cuando es 5V corresponde a $d=0$. El punto de operación en (A) tiene un voltaje promedio cercano a 2,15V lo que corresponde a un ciclo de servicio de $d=0,57$, con respecto a punto (B) tiene un voltaje promedio cercano a 1,1V, lo que corresponde a un ciclo de servicio de $d=0,78$. Este cambio es el resultado de una reducción de la radiación solar durante la fase experimental.

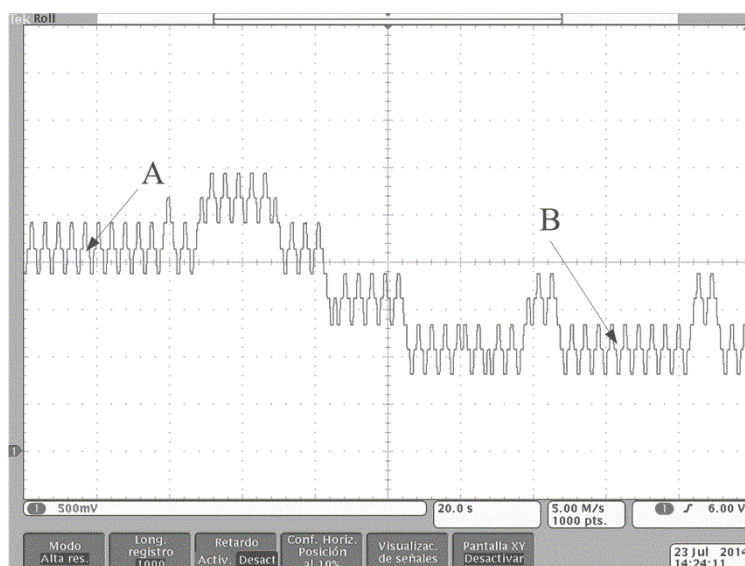


Figura 6. Comportamiento MPPT ante radiación solar presente en Campus de la Universidad de Cuenca, 23/07/2014, 14:20:51 a 14:24:11.

En la Fig. 7 se observan en detalle las características de la perturbación del MPPT. Es una ampliación de la Fig. 6, donde la amplitud de la perturbación es $269mV$, que representa $\Delta d=0,05$, y un tiempo de establecimiento de $T_{ac}=930ms$.

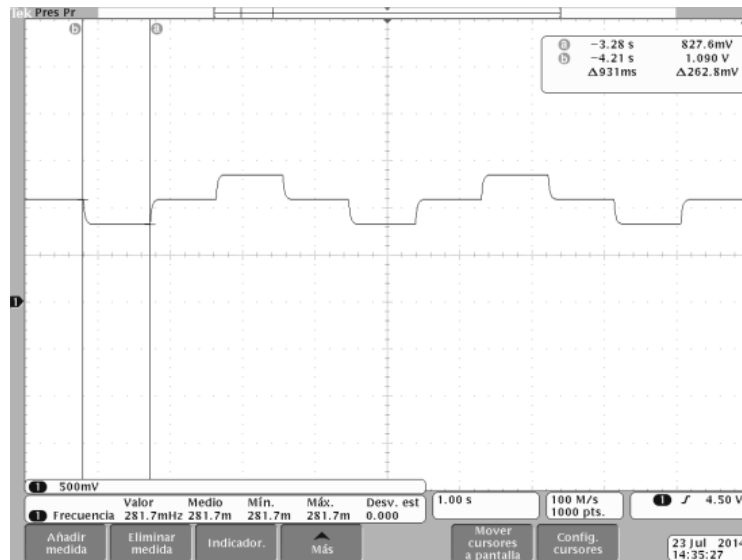


Figura 7. Perturbación Algoritmo MPPT.

En la Fig. 8 se muestra el comportamiento del voltaje en el panel solar, en la misma se observa que el algoritmo MPPT itera alrededor de $V_{pv} \approx 13,4V$. Es importante destacar que en caso de tener máxima radiación solar el sistema debe oscilar en torno al voltaje de máxima potencia identificado por el fabricante del panel $V_{mp} = 15,9V @ 1000W/m^2$.

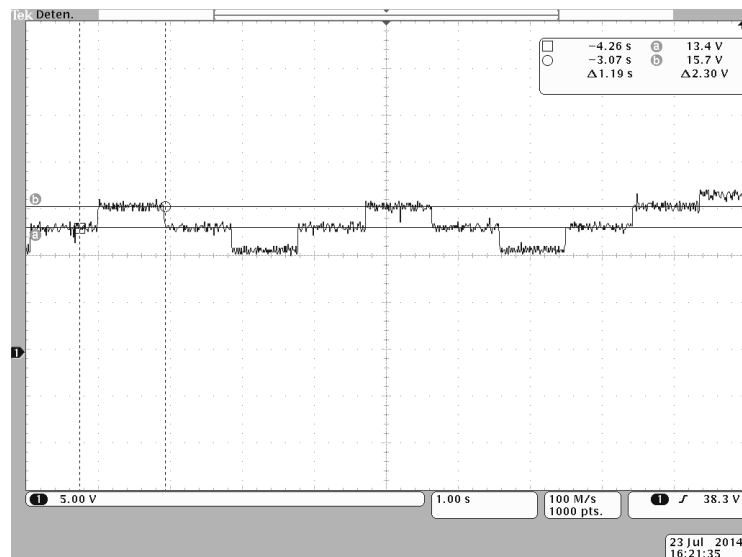


Figura 8. Voltaje del Panel solar ante cambios en el ciclo de servicio por el MPPT.

En régimen permanente la Fig. 9, muestra el voltaje la inductancia V_L , donde se comprueba la frecuencia de conmutación de $f_{sw} = 100kHz$, en el caso cuando es conectado un panel solar al cargador de baterías, la potencia de salida del panel es aproximadamente de $P_{pv} \approx 30W$. Es importante destacar que en esta condición se comprueba el modo de conducción continua debido a que en el periodo de conmutación la tensión del inductor es distinta de cero.

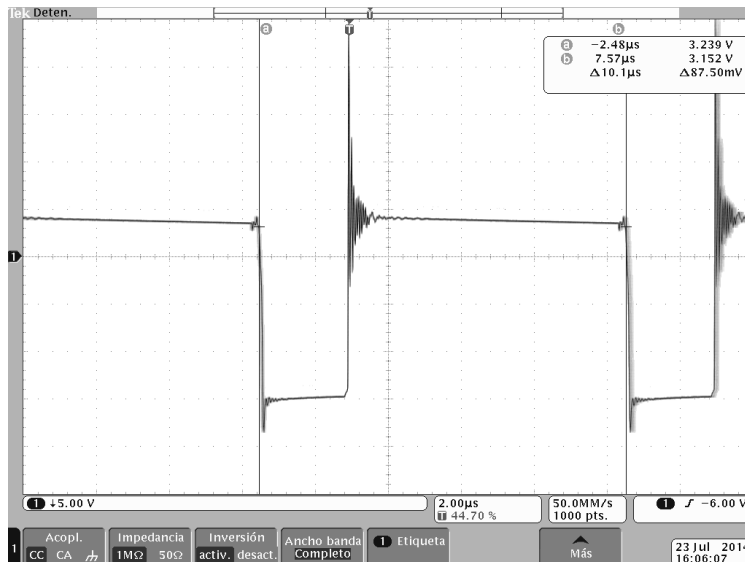


Figura 9. Voltaje Inductancia (V_L) en régimen permanente para una potencia de entrada $P_{pv}=30W$.

En la Fig. 10, se observa el comportamiento del voltaje entre el drenador y fuente del transistor mosfet IRF540 bajo las pruebas experimentales antes descritas, donde se observa un sobre impulso cuando el transistor conmuta del estado de saturación a corte. Para reducir este sobre impulso se ha dispuesto una red de amortiguamiento RDC. Es importante mencionar que a potencia nominal este sobre impulso no representa peligro alguno para el funcionamiento del dispositivo.

Además de las pruebas experimentales antes descritas, el funcionamiento a mayor potencia fue probado con el uso de fuentes de laboratorio como se muestra en la Fig. 5, la potencia de entrada estuvo limitada a la potencia de las fuentes utilizadas alcanzando 80W, bajo estas condiciones se obtuvo un rendimiento cercano al 75%.

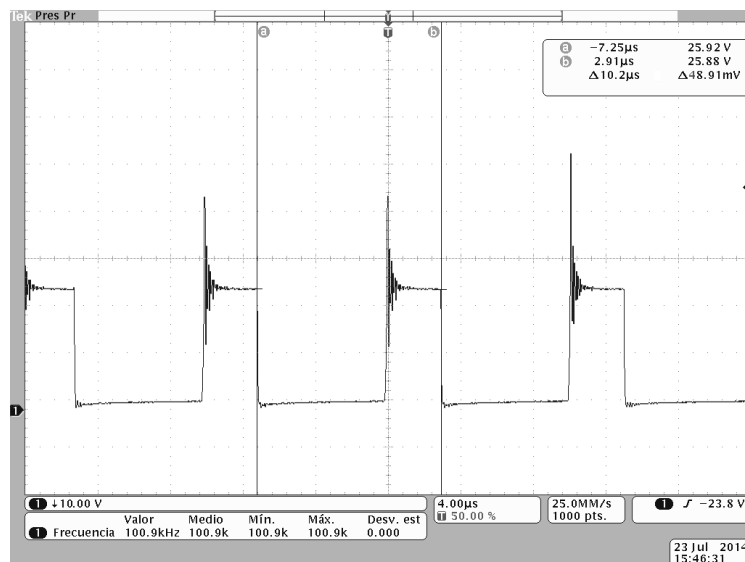


Figura 10. Voltaje entre drenador fuente Mosfet (V_{DS}).

5. CONCLUSIONES

Con este trabajo, se muestra el diseño de un sistema de carga de batería a partir de paneles solares fotovoltaicos, el sistema diseñado utiliza un convertidor reductor y un condensador de entrada con la

finalidad de disminuir el rizado de voltaje y corriente, el punto de operación está dado por un algoritmo de seguimiento de máxima potencia o el modo de limitación de corriente censando voltaje y corriente en el panel solar. El desarrollo teórico es comprobado experimentalmente utilizando como elemento de control el *dsPIC30F4011*.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue patrocinado por el Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador.

REFERENCIAS

- Anand, S., R.S. Farswan, B. Mangu, B.G. Fernandes, 2012. Optimal charging of battery using solar pv in standalone dc system. *6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012)*, 1(6), 27-29.
- Chang L., Ng C., 1994. A solar battery charger with improved energy utilization. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 1, 105-108.
- Chen, T.T., M.-Y. Hsiao, S.-H. Tsai, C.-N. Lin, 2011. Design of digital battery charger system based on PV-module. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ)*, 27(30), 1860-1865.
- Ferdous, S.M., M.A. Mohammad, F. Nasrullah, A.M. Saleque, A.Z.M.S. Muttalib, 2012. Design and simulation of an open voltage algorithm based maximum power point tracker for battery charging PV system. *7th International Conference on Electrical & Computer Engineering (ICECE)*, 908-911.
- Garcerá, G., E. Figueres, A. Abellán, 1998. *Convertidores conmutados: Circuitos de potencia y control*. Servicio de Publicaciones de la Universitat Politècnica de Valencia.
- González, L., E. Figueres, G. Garcerá, O. Carranza, 2010. Maximum-power-point tracking with reduced mechanical stress applied to wind-energy-conversion-systems. *Applied Energy*, 87(7), 2304-2312.
- Hu, B., S. Sathiakumar, 2011. Modeling of a new multiple input converter configuration for PV/battery system with MPPT. *International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT)*, 3, 1209-1214.
- Ke, Y.-L., Y.-C. Chuang, Y.-K. Wu, B.-T. Jou, 2010. Implementation of a solar power battery energy storage system with maximum power point tracking. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, 1(8), 3-7.
- Koutroulis, E., K. Kalaitzakis, N.C. Voulgaris, 2001. Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 16(1), 46-54.
- Lo, K.-Y., Y.-M. Chen, Y.-R. Chang, 2011. *MPPT battery charger for stand-alone wind power system*. Power Electronics, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(6), 1631-1638.
- Matsui, M., K. Kanghooon, B. Yu, T. Kitano, 2007. A solar battery charging module by means of Limit-Cycle MPPT control. *7th International Conference on Power Electronics (ICPE '07)*, 572-575.
- Shekoofa, O., M. Taherbaneh, 2007. Modelling of silicon solar panel by MATLAB/Simulink and evaluating the importance of its parameters in a space application. *3rd International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST '07)*, 719-724.
- Wang, H., D. Zhang, 2010. The stand-alone pv generation system with parallel battery charger. *International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*, 4450-4453.

Yatsui, M., Hua Bai, N. Cramer, Xi Zheng, M. Azhinehfar, D. Mead, 2012. Evaluation of the impact of the different charging algorithms on the lead-acid batteries lifetime. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 1-4.