

## Diseño de un banco de pruebas para paneles solares fotovoltaicos, mediante un convertidor reductor - elevador

L. G. González<sup>1,2\*</sup>, Esteban Farfán<sup>1</sup> y Henry Zamora<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Cuenca, Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Av. 12 de Abril y Agustín  
Cueva Ciudadela, Cuenca, Ecuador.

<sup>2</sup>Proyecto Prometeo, Departamento de Electrónica y comunicaciones, Universidad de los Andes. Mérida - Venezuela.

\*Autor principal/Corresponding author, correo electrónico: lgerardo@ula.ve

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 2015/03/16. Aceptado/Accepted: 2015/04/19.

Publicado en línea/Published online: 2015/05/22. Impreso/Printed: 2015/06/01.

### Design of a testing bench for photovoltaic solar panels using a buck-boost converter

#### Abstract

This research paper presents the system design for automatically obtaining the characteristics curves of a solar panel using a DC-DC Buck-Boost Converter. This converter allows to simply modify the operation point of the solar panel, delivering power to a load resistance with the aim to expose the solar panel to a wide range of operation to determine its characteristic curve, Power vs. Voltage. The solar panel is connected to the DC-DC converter using a capacitive in order to reduce the ripple current, to thereby obtain a better performance from the solar panel. The operation point is fixed with an open loop controller using a PWM modulator, the power is measured by the voltage and the solar panel output current, operation is verified by computer simulation using the *Psim*<sup>®</sup> software.

**Keywords.** PV array, I-V curve, buck - boost converter.

#### Resumen

En este artículo de investigación se presenta el diseño de un sistema para la obtención de forma automática de curvas características de un panel solar con la utilización de un convertidor DC-DC Reductor-Elevador. Este convertidor permite modificar de forma simple el punto del panel solar, entregando la energía a una carga resistiva, a fin de exponer al panel solar a un amplio rango de operación que permite determinar su curva característica, Potencia vs. Voltaje. El panel solar se conecta al convertidor DC-DC mediante un condensador a fin de disminuir el rizado de corriente, de manera que se pueda sensar con mayor precisión la energía entregada por el panel solar. El punto de operación es fijado con un controlador a lazo abierto mediante un modulador PWM; la potencia es medida mediante el voltaje y corriente en la salida del panel solar. Funcionamiento que es comprobado mediante simulación computacional utilizando el software *Psim*<sup>®</sup>.

**Palabras Clave.** panel solar, curva I-V, convertidor reductor - elevador.

#### Introducción

El uso indiscriminado de combustibles fósiles y otros procesos industriales utilizados en la producción de energía eléctrica han llevado al incremento acelerado de emisiones de CO<sub>2</sub> las cuales han producido un aumento en la temperatura de la tierra desembocando en el mal conocido como Calentamiento Global. El uso de energías renovables, tales como: energía solar fotovoltaica, eólica, geotérmica, entre otras, permite establecer fuentes de energía eléctrica con efectos insignificantes al medio ambiente en comparación a las fuentes tradicionales.

Esta investigación se centra en el diseño de un siste-

ma que determine de forma automática la caracterización de paneles solares fotovoltaicos similar al tratado en [1], caracterización expresada en curvas asociadas a la potencia de salida y el voltaje en bornes, que permiten conocer el comportamiento en distintos puntos de operación y así poder detectar fallas ó comportamientos anormales del panel.

Los equipos de prueba y medición de los parámetros de interés en los paneles solares son de mucha importancia, dado que dentro de los sistemas de aprovechamiento de energía solar fotovoltaica los paneles solares son los componentes más importantes del sistema, por esto es necesario comprobar si su funcionamiento es adecua-

do. Esta aplicación en específico es de gran utilidad en las líneas de control de calidad en los procesos de fabricación y ensamblaje de los paneles solares, donde de manera rápida y automática estos son expuestos a un amplio rango de operación, conociendo los parámetros importantes del panel, como tensión a circuito abierto, corriente de corto circuito, además de corriente y tensión en el punto de máxima potencia.

Una de las formas tradicionales de medición y prueba de los paneles solares consiste en conectar una resistencia variable al panel solar sensando la corriente y tensión [2], procedimiento lento y no automático, debido a la necesidad de variar manualmente la resistencia. En esta investigación se determinan las ventajas al utilizar convertidores DC-DC donde se comportan como resistencias variables, permitiendo un procedimiento de bajo costo, flexible y modular. Por ello se propone el uso del convertidor DC-DC reductor -elevador acoplado a un condensador para reducir el rizado de corriente a la salida del panel solar. Con esta topología el principal inconveniente consiste en el efecto del condensador sobre las respuestas transitorias ante los cambios en el punto de operación. Para reducir este efecto sobre la medición de la tensión y corriente de salida, es necesario realizar la medición una vez terminado el régimen transitorio a partir del nuevo cambio del punto de operación. La determinación del tiempo en régimen transitorio es tratado en la sección de resultados teóricos del sistema conversión de energía.

A diferencia de las investigaciones realizadas por [3], donde se implementa un convertidor sepic y cuk, con la finalidad de reducir el rizado de corriente en la salida del panel solar, se presenta la desventaja de utilizar más de un interruptor y elementos inductivos que aumentan las pérdidas por conducción, lo que conlleva a una aplicación compleja y costosa. Con el uso del convertidor buck-boost y el condensador de entrada se reduce el rizado de corriente en el panel solar, además del orden de los filtros asociados a estas medidas, lo que facilita el sensado de la corriente y tensión, asimismo utiliza un único interruptor e inductor, lo que representa una simplificación considerable del sistema a diseñar.

## Materiales y Métodos

### Modelo 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 el sol en electricidad, la conexión de las celdas solares pueden ser 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 Figura 1, muestra el circuito equivalente de una celda solar, que está representado mediante la ecuación (1), donde se toma en cuenta los efectos más importantes en

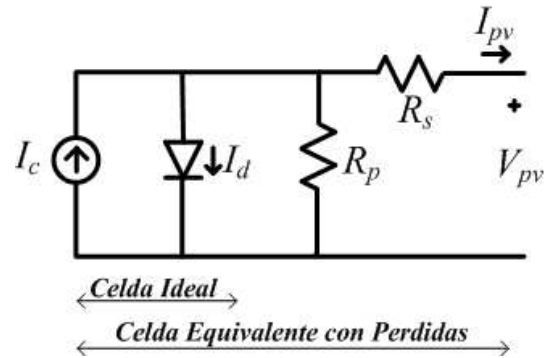


Figura 1: Circuito Equivalente, celda solar fotovoltaica.

la celda solar, aunque en otras investigaciones se desarrollan modelos más completos que toman en cuenta otros efectos como el de recombinación de los portadores entre otros [4]. El circuito de la Figura 1, contiene el circuito equivalente de una celda ideal formada por una fuente de corriente  $I_c$  que es generada por la incidencia solar, y es directamente proporcional a la irradiación solar.

La corriente  $I_d$  es la corriente asociada al diodo equivalente, compuesta por la corriente de saturación  $I_o$  dependiente de los parámetros como el voltaje térmico  $V_t$ , y el coeficiente de idealidad  $\alpha$ . El efecto de las pérdidas asociadas a la celda están representadas mediante la resistencia serie y paralelo, donde  $R_s$  es la suma de todos los dispositivos asociados en serie, que influye fuertemente sobre el desempeño de la celda cuando se opera en la región de fuente de voltaje. La resistencia en paralelo  $R_p$  está asociada a la corriente de fuga del diodo que influye cuando se opera en la región de fuente de corriente.

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

El comportamiento entre tensión y corriente del panel utilizado en esta investigación para una irradiación solar de  $1000 \text{ W/m}^2$  y  $25^\circ \text{C}$  de temperatura es mostrado en la Figura 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 es llamada 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 ( $V_{ca}$ ).

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 los datos de placa del panel solar (Siemens® SM55) utilizado en esta investigación.

$I_{cc}$ (A)	$V_{ca}$ (V)	$V_{mp}$ (V)	$I_{mp}$ (A)	$P_{mp}$ (W)
3.45	21.7	17.4	3.15	55

Tabla 1: Parámetros nominales de panel solar Siemens® SM55.

### Convertidor Buck-Boost

El convertidor buck-boost es uno de los convertidores DC-DC no aislados ampliamente utilizados hoy en día. El circuito básico del convertidor buck-boost inversor es mostrado en la Figura 3. El nombre de esta topología se debe a que permite obtener un voltaje de salida con una polaridad opuesta y con voltajes mayores o menores que la entrada [5].

Existen dos modos de operación básica en este convertidor, el modo de conducción continua CCM, y el modo de conducción discontinua DCM, que depende de la corriente en el inductor ( $I_L$ ), en el caso de esta investigación, el convertidor opera en el modo CCM principalmente. En este modo la corriente en el inductor siempre es mayor o igual que cero, y se presenta una relación entre el voltaje de entrada y salida bajo el modelo de estados promediados mostrado en la ecuación (2).

$$V_o = V_{in} \frac{d}{(1-d)} \quad (2)$$

Donde  $d$  corresponde al ciclo de servicio acotado en el intervalo ( $0 < d < 1$ ), el convertidor buck-boost no tiene una región de operación definida, con el cambio del ciclo de servicio el punto de operación permite encontrar la corriente de corto circuito y el voltaje de circuito abierto en el caso del panel solar, en otros términos, con esta topología se puede obtener una resistencia equivalente  $R_i$  en la entrada desde cero hasta infinito [6].

Si se consideran despreciables las pérdidas asociadas al convertidor, se puede establecer la relación de impedancias de entrada y salida mediante la ecuación (3).

$$R_i = R_c \frac{(1-d)^2}{d^2} \quad (3)$$

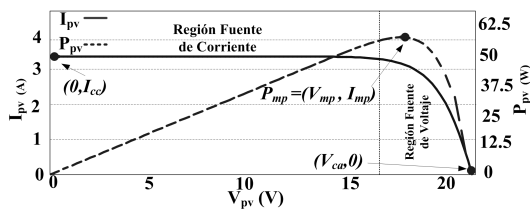
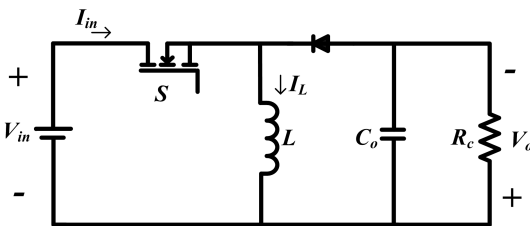
Figura 2: Curva características  $I_{pv}$  vs.  $V_{pv}$  y  $P_{pv}$  vs.  $V_{pv}$  del panel solar.

Figura 3: Circuito esquemático, convertidor reductor-elevador.

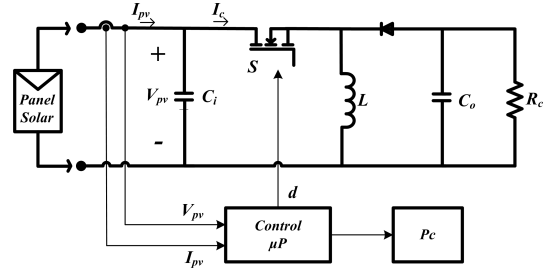


Figura 4: Circuito esquemático, banco de pruebas propuesto.

Donde  $R_i$  es definida como el cociente entre el voltaje ( $V_{in}$ ) y corriente de entrada ( $I_{in}$ ), relación importante en esta aplicación, dado que el convertidor DC-DC es considerado como una resistencia variable en función de ciclo de servicio  $d$ .

En esta aplicación la resistencia de carga se ha determinado fijando el punto de operación de máxima potencia para ciclos de servicios cercanos a  $d_{mp}=0.5$ .

El modo de conducción límite entre DCM y CCM en el convertidor depende básicamente del ciclo de servicio ( $d$ ), inductancia ( $L$ ) y frecuencia de conmutación ( $f_{sw}$ ), tal y como se muestra en la ecuación (4).

$$L_{mín} \geq \frac{R_c (1-d)^2}{2f_{sw}} \quad (4)$$

En el caso de esta aplicación, el convertidor DC-DC presenta el caso crítico cuando  $d \approx 0$ , donde la inductancia mínima necesaria para operar en el modo de conducción continua se determina mediante la ecuación (5).

$$L_{mín} \geq \frac{R_c}{2f_{sw}} \quad (5)$$

Una vez conocida la dimensión del inductor, es importante determinar la corriente promedio máxima a la cual estará expuesta, esto con la finalidad de dimensionar el tipo de conductor para su fabricación. La ecuación (6), representa la corriente promedio máxima en  $L$ , en función del punto de operación crítico, que ocurre a máxima potencia  $P_{mp}$ .

$$\langle I_L \rangle_{máx} = \frac{1}{1-d_{mp}} \sqrt{\frac{P_{mp}}{R_c}} \quad (6)$$

Donde  $d_{mp}$  es el ciclo de servicio cuando se opera a máxima potencia. Otro aspecto importante en el diseño del convertidor DC-DC, corresponde al dimensionamiento del condensador de salida  $C_o$ , que a pesar de no necesitar una regulación de voltaje en la carga, el condensador contribuye a mantener la validez del modelo de estados promediados en el cual se sustenta el análisis de funcionamiento del convertidor. De igual forma que para el inductor, se puede determinar el valor del condensador

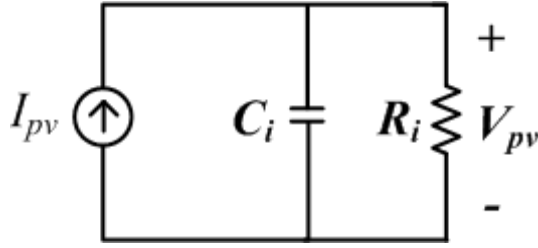


Figura 5: Circuito equivalente en la región fuente de corriente.

mediante la ecuación (7), a partir del rizado de voltaje deseado ( $\Delta V_o$ ) en la salida, en esta aplicación se ha elegido un rizado máximo del 2 % de  $V_{mp}$ .

$$C_o = \frac{V_o d}{R_c \Delta V_o f_{sw}} \quad (7)$$

### Sistema de Conversión de Energía y Banco de Prueba

El esquema propuesto en esta investigación es el mostrado en la Figura 4, donde el panel solar bajo prueba está conectado a un condensador de entrada, cuya finalidad es reducir el rizado de corriente en la salida del panel solar, para su posterior acople al convertidor reductor - elevador.

El convertidor reductor - elevador tiene la ventaja de emular una resistencia. Como consecuencia, la curva I-V puede ser obtenida rápidamente para una medición segura en tiempo real. Considerando la discusión previa, se puede deducir que la topología es capaz de realizar un barrido completo de la curva I-V del panel solar fotovoltaico desde  $V_{ca}$  a  $I_{cc}$ , así como varias topologías tal como buck-boost, zeta, cuk y sepic provienen de la misma relación de conversión y la resistencia de entrada. Sin embargo, en las topologías buck-boost y zeta, la corriente de entrada es siempre discontinua porque el interruptor está colocado en serie con el panel causando grandes componentes armónicos en la corriente, por lo tanto, produciendo alto rizado y problemas de ruido. Por tal motivo se ha incorporado un condensador de entrada ( $C_i$ ).

Los convertidores cuk y sepic derivado de (buck-boost) exhiben una entrada de corriente no pulsada, por lo tanto, el barrido de la curva I-V es más fiable, y con poco ruido, por lo que dichas topologías podrían ser las indicadas en estas aplicaciones. Pero a diferencia de los convencionales buck-boost estos requieren un mayor número de componentes [7].

El sistema propuesto en la Figura 4, presenta un circuito de regulación a lazo abierto, que permite variar la impedancia de entrada de forma automática mediante un sistema de control encargado de manejar la modulación por ancho de pulsos (PWM), y sensando continuamente de la corriente y voltaje en la salida del panel solar. Estas variables podrían ser enviadas y procesadas por una PC, donde se almacena y se muestra de manera gráfica el comportamiento del panel solar fotovoltaico bajo

$R_c$	$L$	$C_o$	$C_i$	$F_{sw}$	$T_s$
5.5Ω	27μH	100μF	100μF	100kHz	2.76ms

Tabla 2: Parámetros sistema conversión de energía.

prueba. Para el dimensionamiento del condensador de entrada, se utiliza la ecuación (8), considerando poder soportar un rizado de voltaje ( $\Delta V_{pv}$ ) definido, cuando  $S=off$  y se carga el condensador en el punto de máxima potencia. Al igual que en el caso de  $C_o$ , el rizado deseado de voltaje se ha fijado en 2 % de  $V_{mp}$ .

$$C_i \geq \frac{I_{mp}(1 - d_{mp})}{\Delta V_{pv} f_{sw}} \quad (8)$$

Desde el punto dinámico, el comportamiento de la respuesta del sistema ante cambios del punto de operación mediante la variación del ciclo de servicio  $d$  es un aspecto importante para el cálculo de la potencia de salida en el panel fotovoltaico, dado que ante cambios del punto de operación el efecto del condensador de entrada afecta la medición de la potencia real de salida en el panel [8, 9].

Para reducir el efecto dinámico agregado por el condensador de entrada, es importante conocer el tiempo en cual ocurre el régimen transitorio, el caso crítico ocurre cuando el panel solar fotovoltaico se encuentra en la región fuente de corriente y cercana al punto de máxima potencia donde el circuito equivalente es el mostrado en la Figura 5, en esta región el circuito equivalente presenta una constante de tiempo dado por la ecuación (9).

$$\tau = R_i C_i \quad (9)$$

De la ecuación (9), la constante de tiempo máximo en el régimen de fuente de corriente ocurre cuando la resistencia equivalente es cercana al punto de máxima potencia. El tiempo de establecimiento máximo del sistema de primer orden establecido en la figura 5, puede mostrarse en la ecuación (10).

$$T_s = 5 \frac{V_{mp}}{I_{mp}} C_i \quad (10)$$

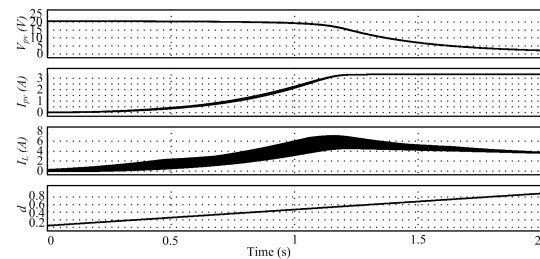


Figura 6: Desempeño de variables de interés en el sistema de conversión de energía.

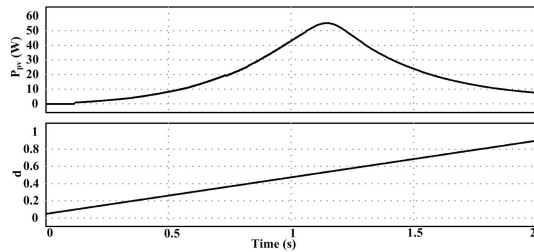


Figura 7: Comportamiento de la potencia de salida  $P_{pv}$  y ciclo de servicio  $d$ .

### Resultado Teórico del Sistema Conversión de Energía

Para corroborar los resultados teóricos del diseño, se ha realizado una simulación del panel solar y del sistema de conversión de energía mediante el software computacional *Psim*<sup>®</sup> con los parámetros mostrados en la Tabla 2, además se expone al sistema a un ciclo de servicio que varía en el rango  $0.1 < d < 0.9$ .

En la Figura 6, se presenta el comportamiento del voltaje y corriente del panel solar en función al ciclo de servicio, además se observa el funcionamiento bajo la región de fuente de voltaje cuando el  $V_{pv}$  permanece cercano a  $V_{ca}$ . En el caso de ciclo de servicios superiores a  $d_{mp}$ , el comportamiento se opera en la región de fuente de corriente donde la misma permanece cercana a  $I_{cc}$ . En el caso de la corriente en la inductancia se puede comprobar el funcionamiento en el modo de conducción continua para potencias superiores a 5.5W.

En la Figura 7, se observa el comportamiento de la potencia de salida en función del voltaje de panel, se obtiene el punto de máxima potencia en  $P_{mp}=55W$ , para un ciclo de servicio de  $d_{mp}=0$ .

Comúnmente la forma de presentar las curvas características de un panel solar en la industria, es la mostrada en la Figura 8. Donde la potencia de salida depende del voltaje  $V_{pv}$ . Además de la potencia, generalmente es mostrado el comportamiento de la corriente de salida  $I_{pv}$ . Con esta figura se identifica la potencia máxima de salida y el voltaje a la cual es posible, de manera similar es posible identificar la región de fuente de voltaje y corriente en el panel solar. De la figura 8 la potencia máxima ocurre cuando  $V_{mp} = 17,4V$ .

### Conclusiones

Con este trabajo, se muestra el diseño de un convertidor DC-DC aplicado a un sistema de conversión de energía solar fotovoltaica, en el cual se tiene por objetivo determinar comportamiento V-I del panel solar. El sistema diseñado utiliza un convertidor reductor - elevador acoplado a un condensador de entrada con la finalidad de disminuir el rizado de voltaje y corriente, el punto de operación está dado por el ciclo de servicio, y varía de modo que permita obtener el comportamiento del panel solar desde circuito abierto hasta obtener la corriente de cortocircuito. El desarrollo teórico es comprobado mediante simulación computacional utilizando *Psim*<sup>®</sup>.

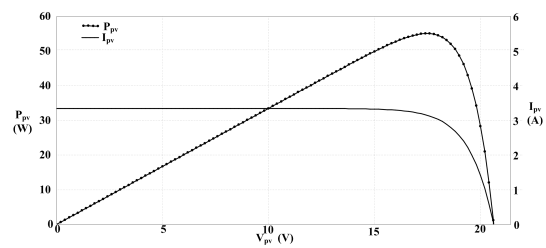


Figura 8: Comportamiento de Potencia y corriente en Panel Solar vs. Voltaje de panel.

### Agradecimientos

Agradecemos de manera especial al Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador por su patrocinio a este trabajo.

### Referencias Bibliográficas

- [1] Durán E.; Andújar, J.; Enrique, J.; Pérez-Oria, J. 2012. "Determination of PV Generator I-V/P-V Characteristic Curves Using a DC-DC Converter Controlled by a Virtual Instrument". *International Journal of Photoenergy*, 2012:13. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/843185>.
- [2] Duran, E.; Piliouline, M.; Sidrach-de-Cardona, M.; Galán, J.; Andujar, J. 2008a. "Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review". *Photovoltaic Specialists Conference, PVSC '08. 33rd IEEE: 1-6*. DOI: 10.1109/PVSC.2008.4922578.
- [3] Duran, E.; Sidrach-de-Cardona, M.; Galán, J.; Andujar, J. 2008b. "Comparative analysis of buck-boost converters used to obtain I-V characteristic curves of photovoltaic modules". *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE: 2036- 2042*. DOI: 10.1109/PESC.2008.4592243.
- [4] Shekoofa, O.; Taherbaneh, M. 2007. "Modelling of Silicon Solar Panel by MATLAB/Simulink and Evaluating the Importance of Its Parameters in a Space Application". *Recent Advances in Space Technologies, RAST '07. 3rd International Conference on: 719-724*. doi: 10.1109/RAST.2007.4284087.
- [5] Rashid, M. 2004. "Electrónica de Potencia, circuitos dispositivos y aplicaciones", *Pearson Educación, México, 2004*.
- [6] Taghvaei, M.; Radzi, M.; Moosavain, S.; Hashim, H.; Hamiruce, M. 2013. "A current and future study on non-isolated DC-DC converters for photovoltaic applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17: 216-227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.023>.
- [7] Enrique, J.; Durán, E.; Sidrach-de-Cardona, M.; Andújar, J. 2007. "Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies". *Solar Energy*, 81(1): 31-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.006>.

- [8] Durán, E.; Ferrera, M.; Andújar, J.; Mesa, M. 2010. "I-V and P-V curves measuring system for PV modules based on DC-DC converters and portable graphical environment". *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*: 3323- 3328. DOI: 10.1109/ISIE.2010.5637972.
- [9] Durán, E.; Galán, J.; Sidrach-de-Cardona, M.; Andújar, J. 2007. "A new Application of the Buck-Boost-Derived Converters to obtain the I-V curve of PV Modules". *Proc. of the 38th IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2007*: 413-417. DOI: 10.1109/PESC.2007.4342022.