

USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS: DESARROLLO DE UN CONVERTIDOR CC-CC CON SEGUIMIENTO DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

L. Luque¹, V. Toranzos², L. Vera³

¹²³GER – Grupo en Energías Renovables - FaCENA – UNNE.

Av. Libertad 5470 – 3400 Corrientes. Argentina.

Tel: +54 (0)379-4473931 – Int:116 e-mail: lluque@ger-unne.com.ar

Recibido: 13/08/12; Aceptado: 04/10/12

RESUMEN: En este trabajo se presenta el diseño, simulación y desarrollo experimental de un convertidor CC-CC en configuración *Buck* de 600 Wp que permite, en sistemas fotovoltaicos autónomos, el acoplamiento óptimo del generador fotovoltaico a la carga, aprovechando al máximo la capacidad de generación. Esto es posible gracias a la implementación de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia. Se detallan la configuración adoptada, la metodología de diseño y el algoritmo implementado. Simulaciones mediante software y ensayos realizados bajo condiciones reales de operación, permitieron caracterizar el prototipo experimental, obteniéndose eficiencias de conversión superiores al 95%.

Palabras clave: Sistemas Fotovoltaicos Autónomos, MPPT, Convertidor CC-CC.

INTRODUCCION

En los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFA) la potencia extraída del generador fotovoltaico (FV) depende de la naturaleza de la carga que se conecte a ella. Un generador FV definido eléctricamente por su curva característica I-V puede, en principio, operar en cualquier punto de su curva. Para el caso en que la carga sea resistiva, el punto de trabajo del sistema se obtiene mediante la intersección de la curva característica del módulo y de la recta de carga (V. Salas Merino, 2009). Cuando el acoplamiento de la carga se efectúe con una batería en paralelo, esta última fija la tensión de trabajo del sistema, polarizando al módulo en un valor de tensión que en general difiere del valor de tensión donde el sistema de generación FV es capaz de entregar la máxima potencia (V_{PMP}).

Para que la carga aproveche al máximo la capacidad de generación del dispositivo FV, la misma debe polarizar al módulo de manera que la curva I-V de la carga intercepte siempre a la curva I-V del módulo en el punto de máxima potencia (PMP). El punto donde el generador FV desarrolla la PMP depende de la irradiancia incidente y de los valores de temperatura. En un SFA, para que el generador FV opere regularmente en este punto, es necesario que este no se sobredimensione respecto del sistema de acumulación, ya que una desconexión prematura de las baterías por parte del controlador de carga provocará una disminución del aprovechamiento de la energía útil.

De esta forma, se evidencia que módulos FV polarizados a través de baterías o acoplados directamente a cargas de diferente tipo, no entregan la totalidad de la energía útil disponible. Para lograr el máximo aprovechamiento energético de los generadores FV, es necesario que los mismos sean polarizados de forma que la curva I-V de la carga o la tensión de la batería se encuentren siempre en el PMP o cercano a él. Para realizar esto, se debe utilizar un adaptador de impedancias o convertidor CC-CC que permita alcanzar esta condición de operación (V. Salas Merino, 2009). Este convertidor debe ser interconectado entre el sistema de generación FV y el sistema de acumulación de energía y/o la carga (Figura 1).

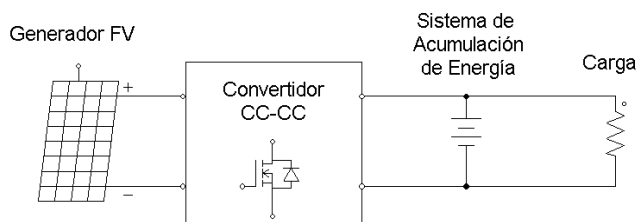


Figura 1. Diseño esquemático de un SFA con convertidor CC-CC.

El avance tecnológico en la fabricación de dispositivos semiconductores cada vez con menores pérdidas y el estudio de nuevas técnicas de conmutación permite el desarrollo de convertidores CC-CC cada vez más eficientes, alcanzado hoy en día, eficiencias de conversión de hasta 95% (ON Semiconductor, 2002). El uso de los mismos en SFA, permite maximizar la potencia extraída de los módulos respecto de convertidores CC-CC sin MPPT bajo las mismas condiciones ambientales, con lo cual se logra reducir la potencia de generación instalada disminuyendo el costo total del sistema. Además, este convertidor CC-CC conectado entre el sistema de generación y el de acumulación, puede gestionar el flujo de energía hacia y desde el banco de acumuladores electroquímicos, funciones típicas asignadas a controladores de carga (Salas et al., 2005). Por lo expuesto, el Grupo en Energías Renovables (GER) se abocó al diseño y desarrollo un convertidor CC-CC con MPPT con el fin de estudiar y analizar sus ventajas en SFA instalados en la región.

En la provincia de Corrientes existen SFA instalados en más de 80 escuelas rurales. En algunos de ellos será estudiado el impacto de la inserción de este dispositivo. En este trabajo se presenta el diseño, simulación, desarrollo del primer prototipo y resultados preliminares que caracterizan su eficiencia de conversión.

EL CONVERTIDOR CC-CC

Los convertidores CC-CC, también conocidos como fuentes de alimentación conmutadas (SMPS), son dispositivos electrónicos capaces de transformar tensiones y corrientes continuas de entrada en tensiones y corrientes continuas de salida con amplitudes diferentes. El principio de funcionamiento de estos convertidores se basa en el empleo de elementos semiconductores que operan en conmutación (estado de corte/conducción) para regular el flujo de energía hacia la carga. En función de la razón de tensión de salida a tensión de entrada, se los clasifica como reductores o elevadores.

El funcionamiento de una SMPS puede ser explicado desde la topología reductora, también conocida como *Buck*, la cual se basa en la técnica de modulación por anchura de pulso (PWM) que permite obtener una tensión formada por pulsos rectangulares de período T de ancho variable a partir de una tensión continua de entrada (Figura 2). Para obtener una tensión igual al valor medio (V_{media}) de la misma, es necesario añadir una etapa integradora o de filtrado paso bajo. De esta forma, variando el ancho de pulso resultante de la modulación, se puede modificar el valor medio y, en consecuencia, la tensión de salida (Floriani, 2002). Se denomina ciclo de trabajo (DT) a la relación t_{on} / T , el mismo es directamente proporcional a la anchura del pulso y para topologías reductoras, se verifica que la tensión media de salida es DT veces la tensión a la entrada del convertidor (Kazimierzuk, 2008).

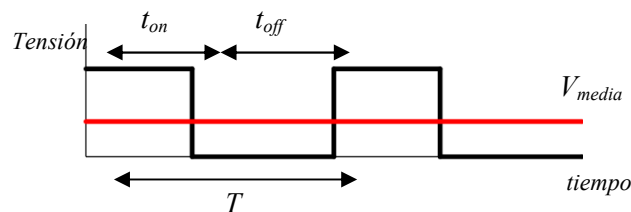


Figura 2. Forma de onda de la tensión de salida de una SMPS sin filtrado.

En la figura 3 se observa el circuito básico de un convertidor reductor *Buck*. El elemento Q_1 es el dispositivo semiconductor encargado de generar los pulsos rectangulares de tensión, el cual puede ser un transistor bipolar, transistor de efecto de campo (MOSFET) o transistor bipolar de puerta aislada (IGBT). El tiempo durante el cual este permanece en estado de conducción se denomina tiempo de encendido (t_{on}). Los elementos L_1 y C_o conforman el filtro de salida que permite obtener la tensión media resultante. El rizado de corriente depende del valor de la inductancia. El elemento D_1 es denominado diodo de libre circulación y asegura la conducción de corriente en la carga durante el tiempo en el que Q_1 permanece apagado, denominado tiempo de apagado (t_{off}).

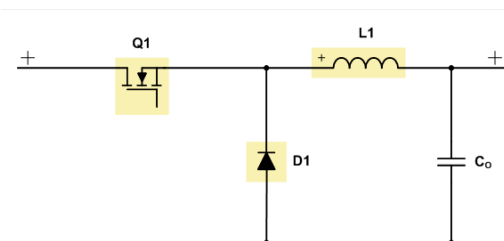


Figura 3. Circuito básico de un convertidor reductor *Buck*.

Existen diversas topologías para las SMPS. Sus salidas pueden estar aisladas galvánicamente o no respecto a la fuente primaria. El aislamiento se consigue mediante un acople magnético entre la entrada y la salida usando un transformador. Entre las SMPS sin aislamiento podemos citar a las topologías *Buck*, *Boost* y *Buck-Boost*. El convertidor *Boost* permite obtener una tensión continua de salida mayor que la presente en sus bornes de entrada. El convertidor *Buck-Boost* es un tipo de convertidor CC-CC que combina las ventajas del *buck* y el *boost* a la vez; puede generar a su salida tensiones mayores o menores que la magnitud del voltaje de entrada. La polaridad del voltaje de salida es opuesta al voltaje de entrada. Las ventajas de estas topologías radican en que carecen de problemas de acoplamiento magnético ya que solo se requiere un inductor. Entre las SMPS aisladas se encuentran la *Flyback*, *Forward*, *Push Pull*, Medio Puente y Puente Completo. Las ventajas de los convertidores conmutados incluyen la reducción significativa del transformador y componentes de almacenamiento de energía. Puesto que las SMPS pueden operar a altas frecuencias, se pueden emplear pequeños transformadores e inductores con núcleo de ferrita. El reducido tamaño es muy importante en muchas aplicaciones, tales como el aeroespacial, las computadoras y las tecnologías inalámbricas (Kazimierzuk, 2008).

La elección de una topología específica se basa en las potencias y rangos de tensiones de entrada y salida que se deben manejar, como también en el requerimiento o no de aislamiento entre fuente primaria y carga.

METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL CONVERTIDOR CC-CC CON MPPT

En primera instancia, se establecieron los parámetros de potencia máxima y rango de tensiones de entrada y salida para la elección de la topología adecuada. Considerando que los SFA instalados en escuelas rurales de la provincia de Corrientes tienen una capacidad de generación de 600 Wp con salida en 24 V y en algunos casos sistemas de 120 Wp con salida en 12 V, se fijó la potencia máxima del convertidor en 600 Wp. En la Tabla 1 se listan las topologías clásicas y los rangos de potencia de salida y tensión de entrada en los cuales pueden operar. Teniendo en cuenta la misma y en función de las pautas establecidas de potencia y tensión, se optó por desarrollar un convertidor con topología reductora *buck*.

Topología	Rango de Potencia (W)	Rango V_{entrada} (V)	Aislamiento
Reductora	0-1000	5-1000	No
Elevadora	0-150	5 - 600	No
Elevadora-Reductora	0-150	5 - 600	No
Half-Forward	0-150	5 - 500	No
Flyback	0-150	5 - 500	Sí
Push-Pull	100-1000	50 - 1000	Sí
Medio Puente	100-500	50 - 1000	Sí
Puente Completo	400-2000	50 - 1000	Sí

Tabla 1. Rango de potencias y tensiones de los convertidores DC-DC con MPPT. (Fuente: V. Salas Merino, 2009).

La elección de la frecuencia de conmutación es una relación de compromiso entre las pérdidas generadas en los transistores, las cuales aumentan al aumentar la frecuencia (Shen et al, 2006), la respuesta en frecuencia del material magnético del núcleo y el tamaño físico del inductor, el cual se reduce al aumentar la frecuencia de trabajo. Se adoptó una frecuencia nominal de trabajo de 100 kHz lo cual permitió el empleo del material magnético SIFERRIT N27 (EPCOS, 2010).

La determinación de los valores de inductancia y capacidad mínimas de salida se realizó de acuerdo a las Eq. (1) y (2) (Kazimierzuk M., 2008).

$$L_{\min} = V_o \frac{(1 - D_{\min})}{(2f_s I_{0_{\min}})} \quad (1)$$

donde: L_{\min} es la inductancia mínima que asegura que la corriente en la carga no se haga cero, V_o es la tensión de salida, D_{\min} es el ciclo de trabajo mínimo para una salida V_o , f_s es la frecuencia de conmutación y $I_{0_{\min}}$ es la corriente de salida mínima.

$$C_{0_{\min}} = V_o \frac{(1 - D_{\min})}{(8(f_s)^2 L \Delta v_{\max})} \quad (2)$$

donde: Δv_{\max} es el rizado máximo de tensión que se espera obtener a la salida y C_{\min} es la capacidad mínima de salida.

La aplicación de las Eq. (1) y (2) determinó el valor de la inductancia en 27 uH y el valor de la capacidad en 47 uF.

Para el diseño físico del inductor se optó por el *método del producto-área* (Floriani, 2002), el cual permite determinar las dimensiones mínimas del núcleo, la longitud del entrehierro y el número mínimo de espiras de la inductancia. La aplicación del método sugirió el uso del núcleo comercial EE42/21/20 (EPCOS, 2010). En la selección de los dispositivos semiconductores se tuvieron en cuenta los parámetros de tensión inversa máxima, corriente media máxima y frecuencia de conmutación. Como elemento de conmutación principal, se optó por emplear transistores IRF3205, HEXFET POWER MOSFET fabricados por International Rectifier (IR, 2001). Como diodo de libre circulación, la mejor alternativa en relación al costo dentro del mercado nacional fue emplear diodos Schottky MBR20100CTP, cuyo encapsulado TO-220 alberga dos diodos Schottky de 10 A de corriente media cada uno (Diodes Inc., 2011).

Algoritmo de control

Una vez definida la etapa de potencia del convertidor CC-CC, es necesario utilizar un algoritmo de control que sea el encargado de generar la modulación PWM y polarizar al generador FV en el PMP. Actualmente existen diversas técnicas y algoritmos para la búsqueda del PMP entre los cuales podemos destacar el de Perturbación y Observación (P&O), el de conductancia incremental, el de realimentación directa, etc. (Koutroulis, 2001).

El método aquí propuesto se basa en el algoritmo de P&O, tomando como variable de control a la corriente de salida del convertidor CC-CC (I_{out}). En aplicaciones de carga de baterías, este algoritmo presenta la ventaja de converger al PMP con solo buscar la máxima corriente de salida, ya que la tensión de salida es fijada por la tensión en bornes de la batería (Koutroulis, 2001). Se basa en evaluar la variación de la corriente de salida en función de la variación del ciclo de trabajo del convertidor.

El algoritmo inicia con una secuencia de reconocimiento en la cual se genera un barrido a lo largo de la curva característica del generador FV, desde la tensión de circuito abierto (V_{OC}) hasta el punto de polarización de tensión de batería. Durante este barrido, se toman valores instantáneos de la corriente de salida a fin de identificar el PMP. Luego de finalizar el barrido, el algoritmo polariza al módulo en el PMP o cercano a él, e inicia un lazo periódico de búsqueda constante de este punto. Para ello, se modifica constantemente el ancho de pulso del convertidor, se muestrea instantáneamente el valor de la corriente de salida y se evalúa su variación asociada a la modificación del ciclo de trabajo. La decisión de aumentar o disminuir el mismo es el resultado de comparar la pendiente que toma la corriente de salida en función del incremento de ancho de pulso. Es por ello que el algoritmo se reduce a evaluar el signo de la relación entre el incremento de I_{out} (ΔI) y el incremento del ciclo de trabajo (ΔDT).

Pueden identificarse así las siguientes condiciones:

Si el incremento en el ciclo fuera positivo, es decir $\Delta DT > 0$, y el incremento en la corriente de salida fuera positivo, $\Delta I > 0$, el cociente $\Delta I / \Delta DT$ resultaría positivo. De igual forma, si el incremento de DT y la variación asociada en la corriente de salida fueran negativas, el cociente $\Delta I / \Delta DT$ resultaría positivo. En este caso, el control decidirá aumentar el ciclo de trabajo hasta hallar la máxima corriente en la salida.

Si el incremento en el ciclo de trabajo fuera positivo, es decir $\Delta DT > 0$, y la corriente de salida acusa un decremento, $\Delta I < 0$, el cociente $\Delta I / \Delta DT$ resultaría negativo. De igual forma, un decremento de DT y un incremento en la corriente de salida daría el cociente $\Delta I / \Delta DT$ negativo. En este caso, el control decidirá disminuir el ciclo de trabajo hasta hallar la máxima corriente en la salida.

En la Figura 4 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo implementado.

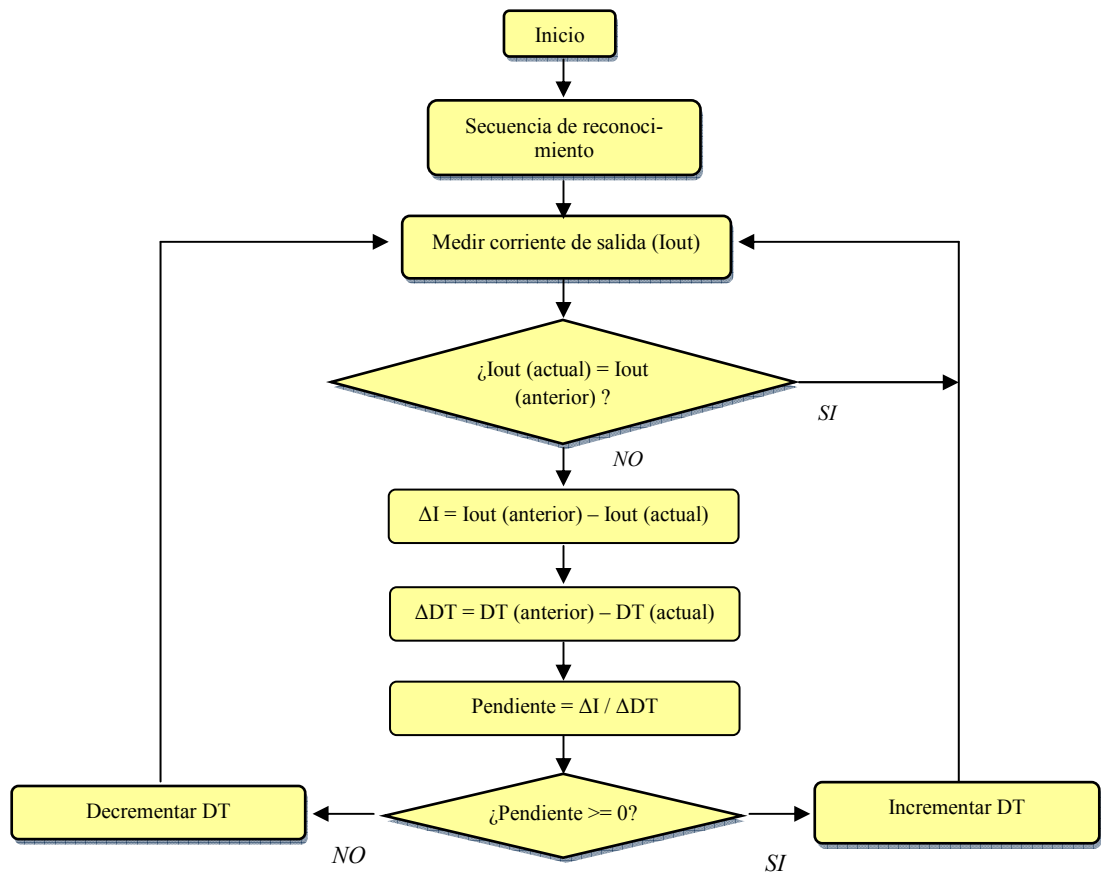


Figura 4: Diagrama de flujo del algoritmo MPPT implementado

RESULTADOS SIMULADOS Y EXPERIMENTALES

Para verificar el adecuado funcionamiento del prototipo diseñado y de su algoritmo de seguimiento de PMP, se realizó una simulación del circuito diseñado utilizando el software usando PSIM[®] 9.0.4, antes de su realización física. Para ello, en el circuito simulado se tuvieron en cuenta las resistencias parásitas del inductor y de los condensadores y los dispositivos semiconductores están modelados de acuerdo a los parámetros dispuestos por sus respectivos fabricantes.

La fuente primaria de energía consistió de un modelo de arreglo o generador FV (Powersim Inc, 2010), el cual permitió establecer parámetros como tensión de circuito abierto, tensión y corriente en el punto de máxima potencia y corriente de cortocircuito como también añadir perturbaciones durante la simulación, lo cual permitió simular variaciones en las condiciones de irradiancia.

En forma resumida, se puede decir que el convertidor CC-CC diseñado consta básicamente de tres etapas. La primera es un circuito adaptador de entrada que consiste en un filtro resonante capacidad-inductancia-capacidad, a fin de suprimir, en la entrada del convertidor, las armónicas generadas en la conmutación. La segunda etapa es la encargada de la modulación PWM y consta de un transistor MOSFET, el diodo de libre circulación y el bloque de control. La última etapa la conforman el inductor y la capacidad de salida calculadas mediante las Eq. (1) y (2). En la Figura 5 se presenta el circuito simulado.

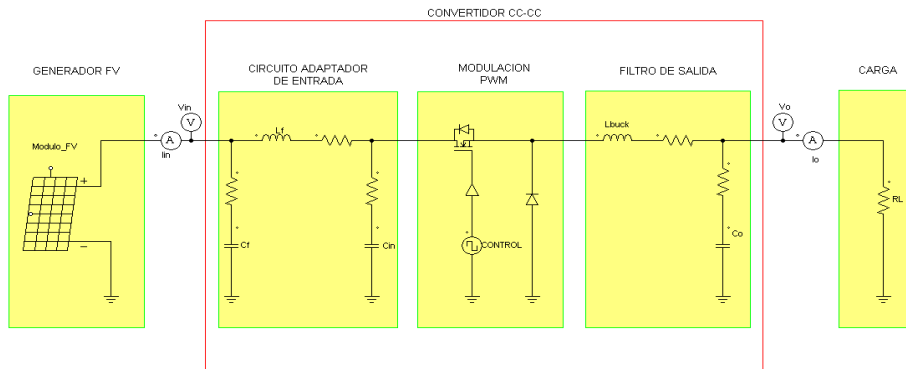


Figura 5. Esquema que presenta el diseño simplificado usado para la simulación en software PSIM.

Prototipo experimental desarrollado

Luego de la etapa de simulación del circuito diseñado, se construyó un convertidor CC-CC que fue ensayado en el laboratorio del GER (Figura 6); para ello se dispuso de un arreglo de módulos FV configurados en serie y paralelo para lograr una potencia de 300 Wp, que acomete a un tablero de conexión y maniobras. Como carga, se usó una fuente bipolar KEPCO modelo BOP 36-12D, lo que permitió evaluar el prototipo a distintas tensiones de salida.

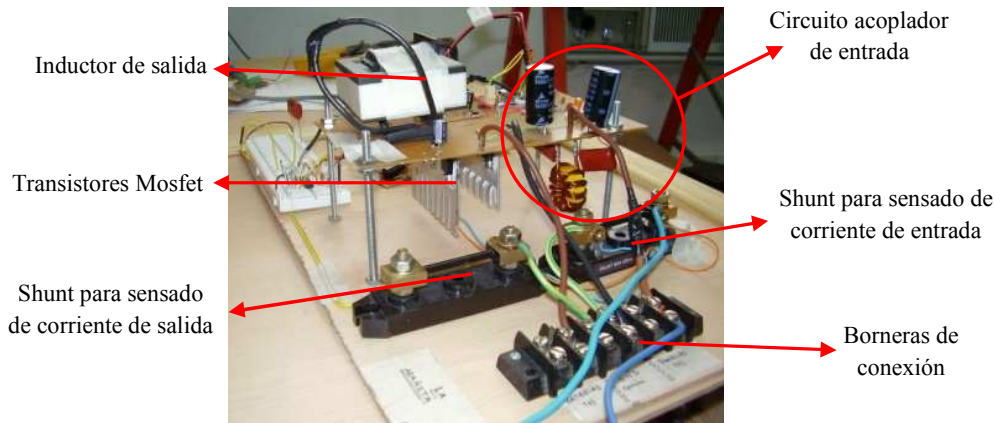


Figura 6. Prototipo de convertidor CC-CC desarrollado por el GER.

A fin de relevar curvas de potencia y eficiencia de conversión, se dispuso de instrumental de laboratorio para la medición de corrientes y tensiones de entrada y salida. En la medición de corrientes se usaron resistencias *shunt* cuya relación es 50 A – 60 mV y precisión 0,5% con amplificadores diferenciales de alta impedancia de entrada para el acondicionamiento de estas señales. Para la medición de tensiones, fueron empleados divisores resistivos del 1% de tolerancia, desacoplados del circuito de medición mediante *buffers* de alta impedancia con ganancia unitaria. Se emplearon multímetros de 6 ½ dígitos para la medición de dichas variables.

En la figura 7 se presentan las curvas obtenidas de potencia extraída del generador FV y de potencia de salida del convertidor CC-CC, el que fuera ensayado en un lapso aproximado de 4 horas un día de invierno con nubosidad variable.

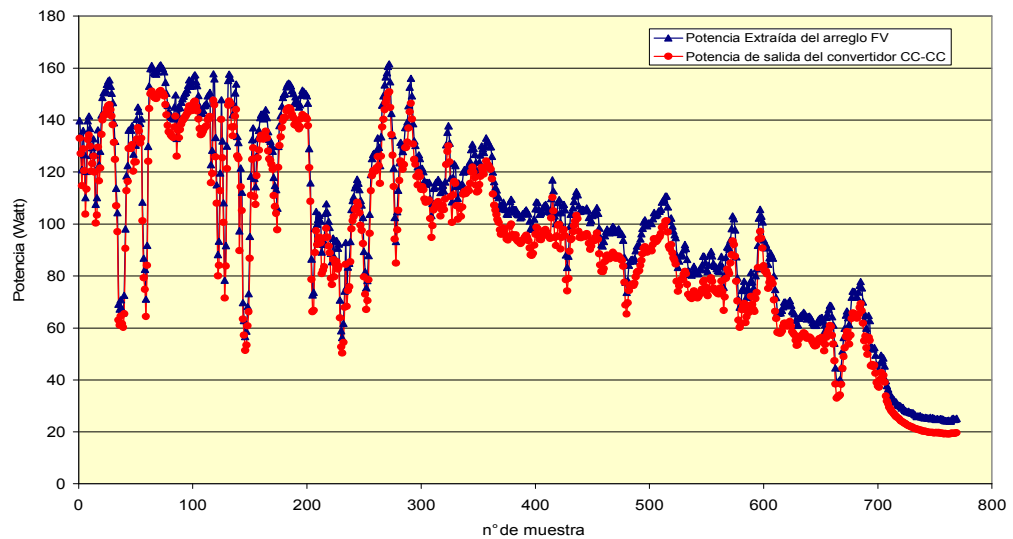


Figura 7. Potencia extraída del generador FV y de potencia de salida del convertidor CC-CC. Las muestras equidistan entre si por un lapso de tiempo de 20 segundos.

A efectos de realizar mediciones confiables para la determinación de la eficiencia de conversión y tomando como base la norma IEC 61683:1999, se simuló el arreglo FV mediante la fuente bipolar KEPCO realizando un barrido de potencia desde 50 W hasta 390W, la máxima potencia que pudo extraerse de esta fuente. Como carga se dispuso de un banco de baterías en 24 V previamente descargado. La temperatura ambiente a la hora de realizar el ensayo se registró en 24,8°C. Se relevaron puntos correspondientes a los valores que dicta la norma y otros valores intermedios a fin de obtener una mejor definición en el ajuste de los puntos experimentales.

En la Figura 8 puede observarse la curva de eficiencia obtenida del ensayo. Se presentan los datos experimentales obtenidos bajo las condiciones antes descritas como también los resultados obtenidos de la simulación mediante el software PSIM 9.0.4 a fin de validar el modelo virtual.

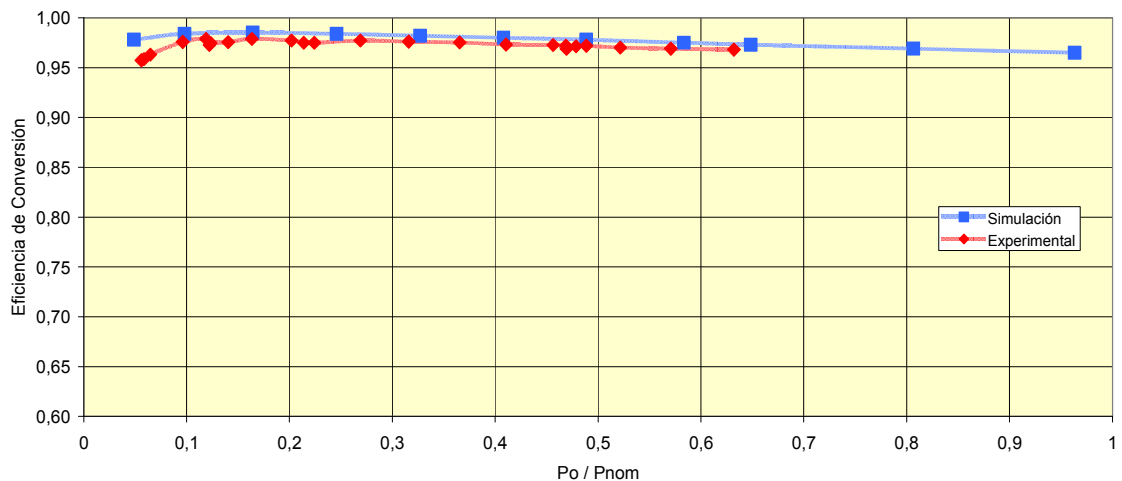


Figura 8. Curvas de eficiencia de conversión en función de la potencia de salida normalizada a 600 W, para una tensión de salida de 24 V.

Un análisis de la figura anterior permite afirmar que ambas curvas respetan la misma tendencia, por lo que es posible predecir el comportamiento del convertidor CC-C a valores de potencia a los que aún no se ha podido ensayar; el modelo simulado presenta un rendimiento mayor que el prototipo experimental

CONCLUSIONES

Los métodos de diseño implementados y expuestos en este trabajo fueron aplicados satisfactoriamente en el diseño y construcción de un convertidor CC-CC con MPPT aplicable a SFA. Los resultados obtenidos satisfacen los objetivos

propuestos, lográndose eficiencias de conversión superiores al 95% en el rango nominal de trabajo. Estos valores de eficiencia de conversión obtenidos en este primer prototipo permiten justificar su aplicabilidad en SFA a fin de gestionar eficientemente la energía disponible, analizando la ganancia energética lograda durante un período de tiempo y evaluar su impacto en la confiabilidad de los SFA.

REFERENCIAS

- Salas Merino V., (2009). El regulador de carga en Sistemas Fotovoltaicos Autónomos. SERIE DE PONENCIAS, fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica, pp. 9.5-9.25.
- ON Semiconductor (2002). "SWITCHMODE Power Supply Reference Manual".
- Salas V., Olias E., Barrado A., Lazaro A.(2005). Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems, Solar Energy Materials & Solar Cells. ELSEVIER.
- Kazimierzuk M. (2008). Pulse Width Modulated DC-DC Power Converters, Ed. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1-69.
- Z. John Shen, Yali Xiong, Xu Cheng, Yue Fu, Pavan Kumar (2006). Power MOSFET Switching Loss Analysis: A New Insight". IEEE.
- IEC 61683:1999 (2000). Photovoltaic Systems – Power conditioners Procedure for measuring efficiency. CENELEC.
- Koutroulis E., Kalaitzakis K., Voulgaris N. (2001). Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 16, NO. 1.
- Floriani J. (2002). Fuentes conmutadas, análisis y diseño. Ed. Universitas, pp. 13-69.
- Powersim Inc. (2010). PSIM Tutorial. How to use Solar Module Physical Model. www.powersimtech.com.
- EPCOS (2010). Ferrites and Accessories. E 42/21/20. Core and accessories.
- EPCOS (2010). Ferrites and Accessories. SIFERRIT material N27.
- IR (2001). International Rectifier. <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf3205.pdf>. Último acceso: 27/08/2012.
- Diodes Inc. (2011). Diodes Incorporated. <http://www.diodes.com/datasheets/ds31413.pdf>. Último acceso: 27/08/2012.

ABSTRACT

This paper presents the design, simulation and experimental development of a 600 Wp buck DC-DC converter which allows in stand-alone photovoltaic systems, optimal matching of the PV generator to the load, maximizing the generation capacity. This is possible due to the implementation of maximum power point tracking algorithms. The configuration adopted, design methodology and the algorithm implemented is explained. Software simulations and tests under real operation conditions, allowed to characterize the experimental prototype, resulting in conversion efficiencies above 95%.

Keywords: stand-alone photovoltaic systems, MPPT, DC-DC Converter.