

# CONVERTIDOR ELEVADOR PARA RIEGO DE HUERTAS UTILIZANDO ENERGÍA FOTOVOLTAICA<sup>1</sup>

Fernando Botterón<sup>2</sup>; Guillermo A. Fernández<sup>3</sup>; Gabriel Y. Aguirre<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Trabajo de investigación y desarrollo tecnológico, Programa Agrovalor I, Proyecto: Análisis, Diseño e Implementación de un Sistema de Riego Fotovoltaico con Seguidor Solar para Pequeñas Huertas Familiares o Comunitarias.

<sup>2</sup> Director de Proyecto, Ingeniero Electricista, [botteron@fio.unam.edu.ar](mailto:botteron@fio.unam.edu.ar)

<sup>3</sup> Codirector de Proyecto, Ingeniero Electrónico, [guillermo.fernandez.fio@gmail.com](mailto:guillermo.fernandez.fio@gmail.com)

<sup>4</sup> Integrante de Proyecto, Ingeniero Electrónico, [gabrielaguirre@fio.unam.edu.ar](mailto:gabrielaguirre@fio.unam.edu.ar)

## Resumen

En este artículo se presenta el estudio y desarrollo experimental de un convertidor *CC-CC* elevador conectado con paneles solares utilizados para riego en huertas rurales. Se realiza el diseño de un convertidor *CC-CC* del tipo elevador de tensión (*Boost*) de una potencia máxima de 5 kW con una tensión de entrada entre los 100 a 120 V y una tensión controlada a la salida de 400 V. A la entrada se conectan paneles solares (o banco de baterías) y a la salida se conecta un inversor de tensión, trifásico o monofásico, que trabaja en forma autónoma y permite el bombeo de agua para alimentar huertas. Todo el diseño realizado se validó mediante pruebas experimentales, con resultados satisfactorios tanto en el desempeño dinámico ante variaciones de carga como en régimen permanente.

**Palabras Clave:** *Convertidor CC-CC – Inversor – Energía fotovoltaica – Sistemas autónomos – Riego.*

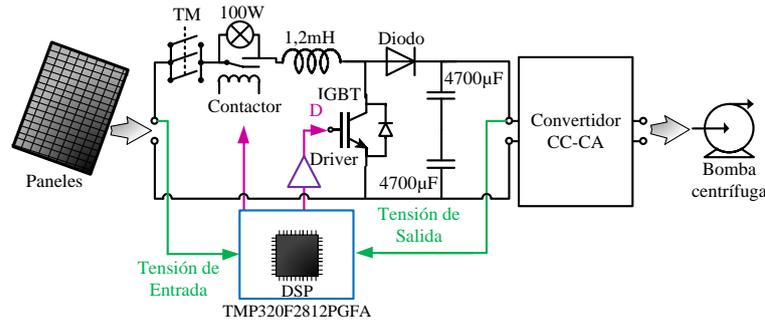
## Introducción

Los sistemas de abastecimiento de agua, tanto para riego de huertas, bebederos para animales y sistemas reservorios son indispensables en las zonas rurales donde no se posee un servicio de distribución del recurso. Para alimentar estos sistemas es necesario disponer de energía para mover una bomba conectada a una fuente de agua, donde generalmente se usa la red eléctrica para mantener el servicio.

En el ámbito rural el servicio de energía eléctrica tiene inconvenientes de confiabilidad, como cortes frecuentes, baja estabilidad, caídas de tensión; además de no tener tendido eléctrico en algunas regiones debido a una serie de inconvenientes, como costos, mantenimiento, relieve y el valor elevado debido a la alta dependencia de los combustibles fósiles (Villalonga 2013). Por lo tanto se comenzó a buscar soluciones alternativas vinculadas con las energías renovables. Dentro de este grupo aparecen los sistemas de riego utilizando energía solar fotovoltaica, que actualmente poseen una mayor viabilidad debido a incentivos a nivel gubernamental para el sector agrario (MAGyP 2015).

Los sistemas alimentados por paneles solares puede diferenciarse en grandes rasgos en dos grupos, sistemas que alimentan la bomba en corriente continua (CC) y sistemas que alimentan en corriente alterna (CA), los primeros poseen la gran ventaja de ser sistemas directos que se conectan a una bomba de corriente continua, denominada bomba solar, pero

poseen costos altos, donde sumado a los valores de los paneles solares tienen un monto de inversión inicial muy elevado. Por otro lado, los sistemas alimentados en CA tienen etapas vinculadas al proceso de conversión de la energía, que es convertir la energía continua de los paneles solares en energía alterna y dicha etapa es conectada posteriormente con una bomba convencional de bajo costo que opera con las características de la red. Estos sistemas poseen menor costo y muy buenas prestaciones. En la Figura 1 se representa un sistema de estas características, con un conjunto de paneles solares, un convertidor de corriente continua a corriente continua *CC-CC* y un convertidor de corriente continua a corriente alterna *CC-CA* vinculado con una bomba para extracción de agua.



**Figura 1: Esquema de un sistema fotovoltaico conectado a una bomba para riego rural.**

El objetivo del trabajo es la selección, modelado, validación, diseño, construcción y puesta en marcha de un convertidor *CC-CC* elevador de tensión de 5 kW, que posee las características necesarias para elevar la tensión de los paneles solares, para ser insertada a la posterior etapa de conversión: inversor PWM alimentado en tensión que alimenta el sistema de riego. Se plantea para el mismo una estrategia de control de tensión y el controlador se diseña utilizando el análisis de respuesta en frecuencia.

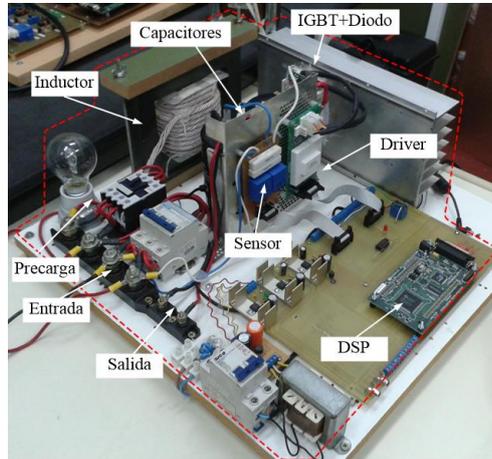
### Metodología

La tensión entregada por los paneles es del tipo continua, generalmente de baja tensión, con lo cual se debe elevar para poder acoplar el inversor como se mostró en la Figura 1.

Las topologías elevadoras más utilizadas según (Erickson and Maksimovic 2007; Kazimierczuk 2008) son *boost*, *buck-boost* (Cuk), *push-pull* y *full-bridge* (Botteron, Fernandez et al. 2011). De las topologías estudiadas se selecciona el convertidor *boost* o *step-up*, debido a que posee un circuito sencillo ilustrado en la Figura 1, además de bajo costo, fácil implementación y baja interferencia electromagnética de entrada. El convertidor posee dos modos de operación (Kazimierczuk 2008), de los cuales se selecciona el modo de conducción continua (*MCC*).

La potencia de diseño se establece en 5kW, una tensión de entrada de 100 a 120  $V_{cc}$  y una tensión de salida de 400 $V_{cc}$  compatible con el inversor monofásico de 220  $V_{ca}$ . El ciclo de trabajo nominal es de 0,7, el valor de la inductancia  $L$  es de 1,2 mH, el capacitor de salida  $C$  es de 2350  $\mu F$ . El sensor utilizado para medir la tensión de salida es del tipo LEM LV 25-P con una ganancia de 2/400. La frecuencia de conmutación y de muestreo es de 20 kHz. El módulo IGBT–Diodo es el SKM400GAL176D y el *DSP* es el TMP320F2812PGFA. El prototipo confeccionado se presenta en la Figura 2.

Para llevar adelante el proyecto es necesario realizar el control de la tensión de salida, donde existen diferentes estrategias de control, como se detallan en (Kazimierczuk 2008), pero para poder aplicar estas estrategias se debe obtener primero el modelo dinámico del convertidor en pequeña señal (Erickson and Maksimovic 2007). Este modelo puede ser del tipo entrada-salida o en espacio de estados (Kuo 1996; Ogata 2010).

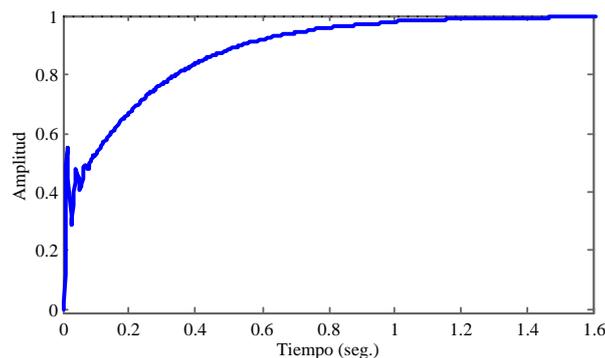


**Figura 2: Prototipo del convertidor *Boost* montado.**

Siguiendo los pasos presentados en (Erickson and Maksimovic 2007) la función de transferencia que vincula el modelo dinámico de la tensión de salida  $v_s(s)$  con el ciclo de trabajo  $d$  se presenta en la siguiente ecuación.

$$G_{vs}(s) = \frac{-0,58493(s + 2,935 \times 10^4)(s - 2494)}{s^2 + 99,92s + 4,056 \times 10^4} \quad (1)$$

Con el modelo se procede a diseñar el controlador apropiado para el sistema con la respuesta en frecuencia. Para este caso se selecciona un controlador *PI* (Kuo 1996; Erickson and Maksimovic 2007) que garantiza un error de régimen permanente nulo y una respuesta rápida ante variaciones en la tensión de entrada y de carga. La respuesta al escalón unitario del sistema compensado se observa en la Figura 3, donde posee un tiempo de asentamiento de 0,7 s, no posee sobrepasos y el error de régimen es nulo.



**Figura 3: Respuesta al escalón unitario del sistema en lazo cerrado compensado.**

La función de transferencia del compensador diseñado se presenta en (2).

$$G_c(s) = \frac{0,09541(s + 10,48)}{s} \quad (2)$$

Discretizando según *Backward* (Ogata 2010) a 20 kHz se obtiene.

$$G_c(z) = \frac{0,09546z - 0,09541}{z - 1} \quad (3)$$

## Resultados y Discusión

Para validar el desempeño real del convertidor *boost* se presentan a continuación las pruebas experimentales. La fuente primaria utilizada es un banco de 10 baterías de plomo-ácido 12V-55Ah conectadas en serie y como carga se utilizan una serie de resistencias lineales y luego un rectificador del tipo puente completo, contemplando el tipo de carga que representa una bomba para riego.

El inversor PWM monofásico que se tiene en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería es de 5 kVA, con una tensión de entrada de 400 V<sub>cc</sub>, tensión de salida regulada en 220 V<sub>ca</sub> con un índice de modulación de 0,78; una inductancia del filtro LC de 520 μH y una capacidad de 240 μF; la frecuencia de conmutación es de 5 kHz. El inversor posee un control de la tensión de salida con una estrategia proporcional derivativo *PD* más modelo interno *DSIM* (Botteron, Carballo et al. 2013). En la Figura 4 se muestra una fotografía de los prototipos de los convertidores conectados en cascada.

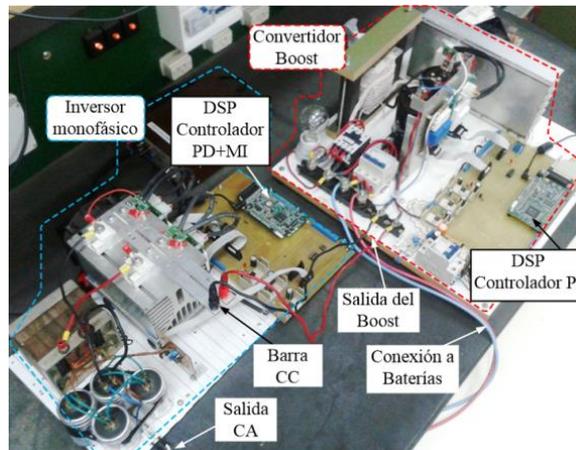
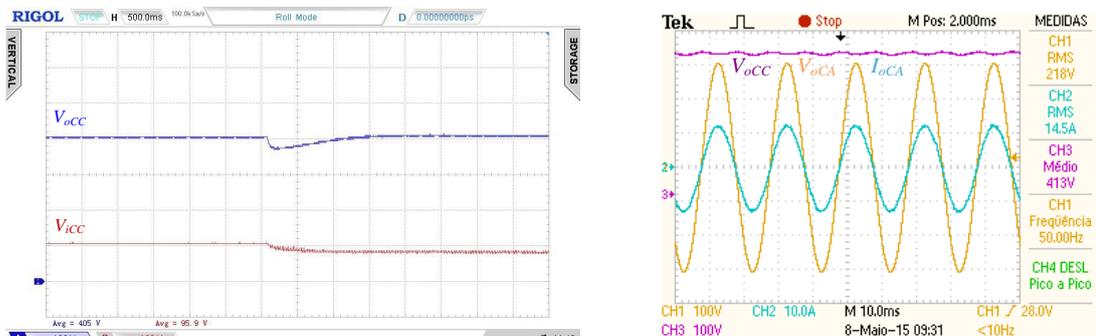


Figura 4: Fotografía del inversor (izquierda) y del *boost* (derecha) conectados en cascada.

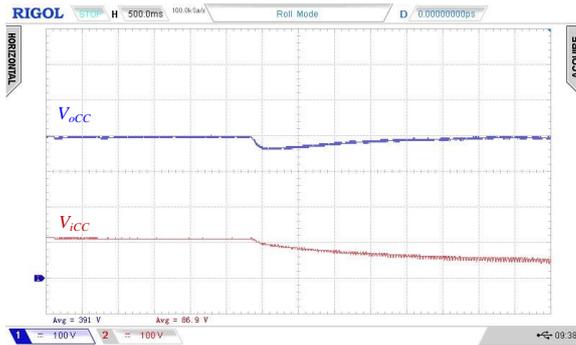
En la Figura 5(a) se aprecia la variación de la tensión de salida del *boost* cuando se varía una carga lineal resistiva de 1,6 kW a 3,2 kW, mientras que en la Figura 6(a) se aprecia la variación de la tensión de salida del *boost* cuando se varía una carga no lineal, produciéndose una variación de potencia de los 660 W a los 1,275 kW. En ambos casos la tensión de la barra CC ( $V_{oCC}$ ) cae entre 30 V a 40 V, luego aumenta hasta el valor nominal de 400 V en menos de 1,5 s. La tensión del banco de baterías cae debido a la alta corriente.



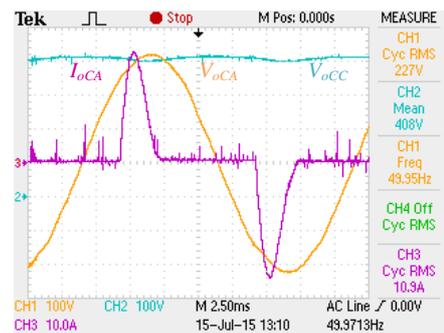
(a) Variación de la tensión de salida del *boost* debido a un escalón de potencia lineal de 1,6 a 3,2 kW.

(b) Formas de ondas para carga lineal a la salida del inversor.

Figura 5: Desempeño del convertidor conectado al inversor monofásico con carga lineal.



(a) Caída de la tensión de salida del *boost* debido a un salto de potencia no lineal de 660 W a 1,3 kW.



(b) Formas de ondas para carga no lineal a la salida del inversor.

Figura 6: Desempeño del convertidor conectado al inversor monofásico con carga no lineal.

En la Figura 5(b) se puede observar la tensión de salida del inversor y la corriente drenada por la carga, la  $THD_v$  de la tensión de salida del inversor es de 1,18%. Mientras que en la Figura 6(b) se presenta la forma de onda de la tensión de salida del convertidor *boost* y la tensión de salida del inversor cuando se entrega a la carga no lineal una potencia aparente de 2,47 kVA. La  $THD_v$  obtenida es de 1,59%.

La regulación del convertidor *boost* para ambos tipos de cargas se mantuvo en 0,25%.

## Conclusiones

En el presente artículo se presentó el análisis, diseño e implementación experimental de un convertidor *CC-CC* elevador de tensión de 5kW para el aprovechamiento de la energía de paneles solares aplicado a los sistemas de riego rural. Se planteó y diseñó un control de tensión de salida y se validó la respuesta con resultados experimentales. El convertidor operando en lazo cerrado presentó muy buen desempeño, en régimen permanente y en régimen transitorio alimentando un inversor PWM monofásico tanto con carga lineal como no lineal, lo que valida fehacientemente el estudio y diseño realizado.

## Referencias

- Botteron, F., R. E. Carballo, et al. (2013). "High Reliability and Performance PWM Inverter for Standalone Microgrids." *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)* **11**(1): 505-511.
- Botteron, F., G. A. Fernandez, et al. (2011). "Controlador de tensión de alto desempeño en espaciode estado aplicado a un convertidor *CC-CC* Full Bridge Phase-Shift para sistemas fotovoltaicos en sistemas de generación híbrida." *XIV Reunión de Trabajo Procesamiento de la Información y Control -- RPIC 2011*: 471-476.
- Erickson, R. W. and D. Maksimovic (2007). *Fundamentals of power electronics*, Springer Science & Business Media.
- Kazimierczuk, M. K. (2008). *Pulse-width modulated DC-DC power converters*, John Wiley & Sons.
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático*, Prentice Hall Hispanoamericana.
- MAGyP. (2015). "Programa de Servicios Agrícolas Provinciales (PROSAP)." from <http://www.prosap.gov.ar/>.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*, Prentice Hall.
- Villalonga, J. C. (2013). "Energías renovables : ¿por qué debería ser prioritario cumplir el objetivo del 8% al 2016? ." **1**: 76.