

## **CONVERTIDOR CC-CC EN CONFIGURACIÓN PUENTE COMPLETO CON SEGUIMIENTO DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA PARA USO EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

**G. Leiva<sup>1</sup>, M. Cáceres<sup>2</sup>, A. Busso<sup>3</sup>.**

<sup>123</sup>GER – Grupo en Energías Renovables - FaCENA – UNNE.

Av. Libertad 5470 – 3400 Corrientes. Argentina.

Tel/Fax: (0379) 4473931 - INT 116 - e-mail: gleiva@ger-unne.com.ar

*Recibido: 13/08/12; Aceptado: 02/10/12*

**RESUMEN:** En este trabajo se presenta el desarrollo de un convertidor CC-CC de 2 kW de potencia nominal para uso en sistemas fotovoltaicos. En el mismo se utilizó una topología en configuración puente completo con modulación por desplazamiento de fase. Una ligera modificación a la estructura convencional de esta topología consistente en la incorporación de una inductancia de conmutación y dos diodos de enclavamiento ha permitido reducir las pérdidas que se producen en los elementos de conmutación. A su vez, a efectos de extraer la máxima potencia disponible del arreglo fotovoltaico, se implementó en la etapa de control, un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia basado en la técnica denominada "Perturbación y Observación". Los resultados obtenidos demuestran un buen desempeño del prototipo desarrollado.

**Palabras clave:** generación FV, convertidor DC-DC, MPPT

### **INTRODUCCIÓN**

En los últimos años, la generación de energía eléctrica proveniente de sistemas fotovoltaicos ha mostrado un notable crecimiento en virtud de las ventajas que ofrece en términos económicos, técnicos y ambientales en comparación a otras fuentes de energías renovables. En particular, el uso de sistemas fotovoltaicos acoplados a la red de distribución de energía eléctrica (SFCR), se posiciona como una propuesta interesante como paliativo a la actual crisis energética que atraviesa nuestro país y el mundo ( Hoffman, 2006; Pontoriero, et al., 2009 ). Estos sistemas, instalados en puntos estratégicos de la red de baja tensión, próximo al lugar de consumo, permitirían abastecer los picos de demanda que superen a la capacidad de suministro de la red y provoquen sobrecarga en las líneas de distribución (Morán, et al., 2009). A los efectos de estudiar el impacto que los SFCR producen en la red de baja tensión de la ciudad de Corrientes, el Grupo en Energías Renovables (GER) de la Universidad Nacional del Nordeste, instaló un SFCR de 525 W de potencia nominal (Cáceres, et al., 2010). Dado que en la actualidad, no existe desarrollo a nivel nacional de inversores para conexión a red, estos deben importarse y, en consecuencia, sus parámetros eléctricos de funcionamiento se ajustan a normas extranjeras, que definen márgenes muy pequeños de permisividad en las variaciones de los parámetros de la red (tensión y frecuencia principalmente). De los estudios realizados en el laboratorio del GER, se encontró que la red de distribución de energía eléctrica local presenta variaciones de frecuencia y tensión que caen fuera del rango de aceptación del inversor provocando su salida de servicio.

En virtud de lo expuesto, el GER se propuso el desarrollo de un inversor para conexión a red cuyos parámetros de funcionamiento se ajusten a las características que presenta la red de distribución local de baja tensión. En la figura 1, se observa un esquema típico de inversor de este tipo. La energía obtenida en la conversión fotovoltaica pasa por dos etapas de conversión antes de ser inyectada a la red. La primera de ellas, es un convertidor CC-CC que genera una tensión continua y constante mientras a su vez busca extraer la máxima potencia que el arreglo es capaz de generar. La segunda etapa de conversión, es un convertidor CC-CA y se encarga de la conversión de corriente continua a alterna con parámetros de tensión y frecuencia iguales a los de la red.

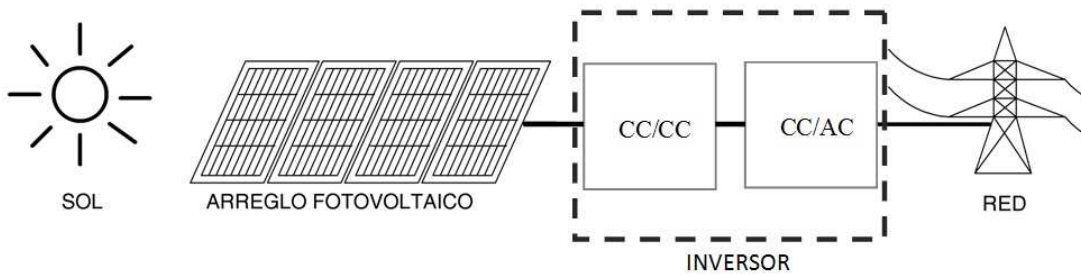


Figura 1: Esquema típico de un sistema fotovoltaico conectado a red.

En este contexto, el presente trabajo expone el desarrollo de un convertidor CC-CC de 2 kW de potencia nominal como la primera etapa de conversión del inversor. Se presentan además los primeros resultados experimentales obtenidos del prototipo construido.

### CONVERTIDOR CC-CC

El convertidor CC-CC desarrollado está constituido por dos etapas: una de potencia y otra de control. En la primera de ellas se lleva a cabo el proceso de conversión. En el mismo se utilizó una configuración en puente completo modificado en el cual la lógica que controla la secuencia de conmutación de las llaves del puente se basa en la técnica denominada modulación por desplazamiento de fase, dada las ventajas que ofrece en comparación a la técnica de modulación convencional utilizada en topologías de este tipo. Por otra parte, la etapa de control se implementó en un Controlador Digital de Señales (CDS) donde se ejecuta un algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia (SPMP) a efectos de optimizar la capacidad de generación del sistema fotovoltaico, entre otras funciones de control.

#### Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia

Debido a que la capacidad de generación de un módulo fotovoltaico depende de la radiación solar incidente y de la temperatura del panel, resulta necesario asegurar el máximo aprovechamiento de la potencia generada mediante la incorporación, en la etapa de control, de un algoritmo de SPMP. En las figuras 2 y 3 se muestran las curvas características de corriente-tensión (curva I-V) y potencia-tensión (curva P-V) de un módulo fotovoltaico que evidencia este comportamiento. Se observa cómo la radiación solar afecta principalmente a la corriente del módulo mientras que las variaciones en temperatura se manifiestan mayormente en la tensión. Se deduce de la misma que para cada condición, existe un punto de tensión y corriente en el que la potencia es máxima, según se muestra en las curvas P-V correspondientes.

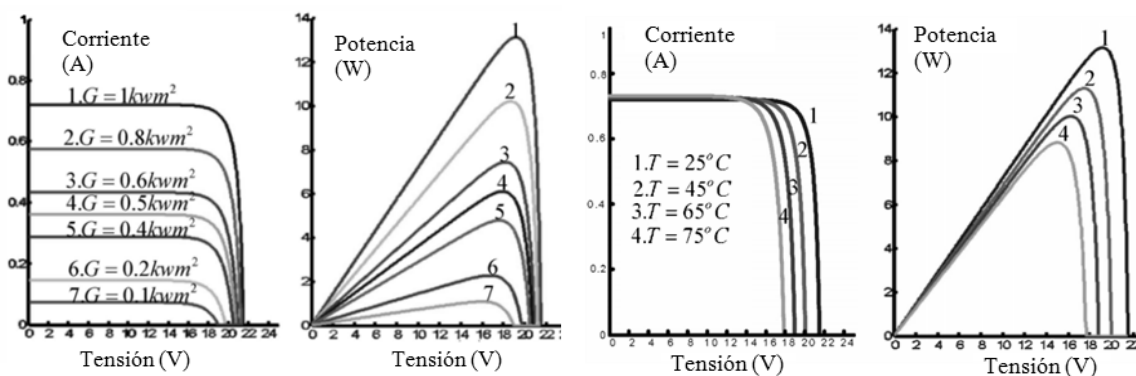


Figura 2: Efectos de la radiación incidente en la curva I-V y P-V. Figura 3: Efectos de la temperatura en la curva I-V y P-V.

Para que esto pueda realizarse, es necesario que el convertidor CC-CC ajuste continuamente sus condiciones de operación a fin de mantener polarizado al arreglo fotovoltaico en el punto de máxima potencia. El algoritmo de SPMP implementado para lograr esta condición de adaptación se basa en la técnica denominada "Perturbación y Observación" (P&O) (Phattara, et al., 2011). El mismo calcula la potencia en intervalos de tiempo determinados por

la frecuencia de muestreo del circuito de conversión mediante la medición de la tensión y corriente de entrada al convertidor. El valor resultante es comparado con el obtenido en la muestra anterior para determinar si ha ocurrido una disminución o un aumento en la potencia generada. Seguidamente calcula la posición del punto de polarización actual, esto es, si el mismo se encuentra a la derecha o a la izquierda del punto de máxima potencia para luego determinar la acción de control requerida. Este es un proceso iterativo a fin de asegurar una óptima polarización bajo las distintas condiciones en todo momento. En la figura 4 se observa en detalle el algoritmo de seguimiento implementado.

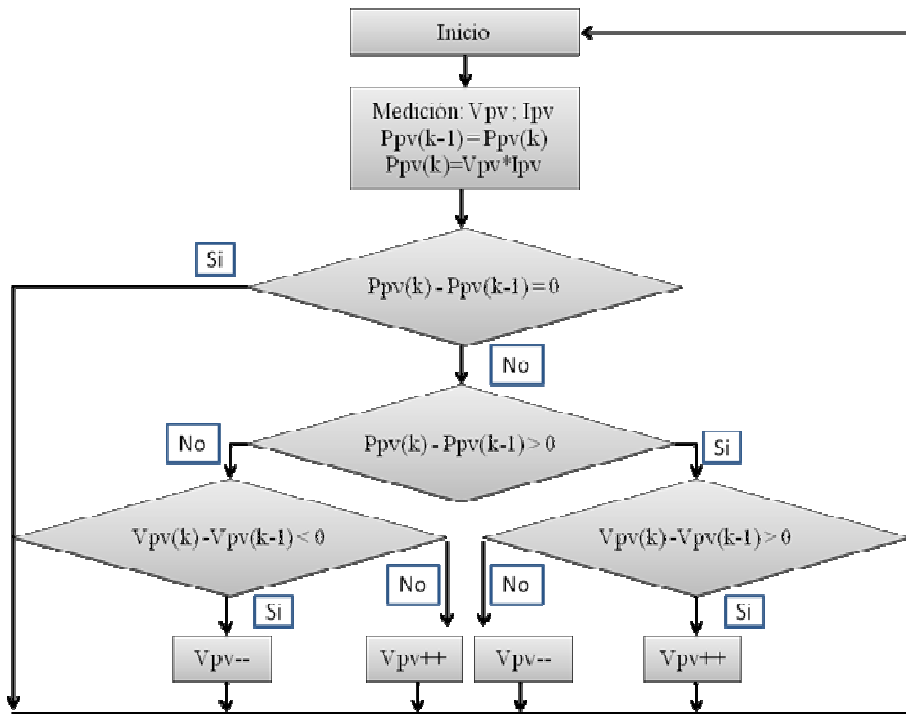


Figura 4: Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia - Método "P&O".

En el diagrama de flujo, las variables  $V_{pv}$  e  $I_{pv}$  hacen referencia a la tensión y corriente respectivamente del arreglo fotovoltaico. Análogamente  $P_{pv}$  es la potencia extraída del arreglo calculada a partir del producto entre  $V_{pv}$  e  $I_{pv}$ . De esta forma,  $P_{pv}(k)$  hace referencia a la potencia calculada con los valores actuales de  $V_{pv}$  e  $I_{pv}$  mientras que  $P_{pv}(k-1)$  es la potencia resultante en el instante anterior. Por otra parte, la denotación  $V_{pv++}$  y  $V_{pv--}$  indican una perturbación en la polarización del arreglo fotovoltaico, que producen un aumento o disminución en la tensión de módulo respectivamente.

#### Selección de la topología utilizada

En la figura 5 se presenta el esquema básico del circuito implementado. El mismo está compuesto por las siguientes etapas: Un generador fotovoltaico cuya capacidad de generación es de 750 Wp; un capacitor de entrada cuya función es mantener polarizado al arreglo fotovoltaico en una tensión estable; el puente rectificador, que se encarga de establecer una corriente en sentido unidireccional; un filtro LC a fin de obtener a la salida una tensión y corriente con baja ondulación; una etapa de control y un circuito de conmutación. La topología de puente completo utilizada en la etapa de conmutación es apropiada para el nivel de potencia proyectado, ya que permite un óptimo aprovechamiento de los transistores de potencia, del transformador, y los diodos del rectificador (Kazimierzuk, 2008). Asimismo, en virtud de la técnica de control utilizada, este circuito presenta la ventaja de alcanzar conmutación suave en una amplia gama de potencias durante el encendido de los dispositivos de conmutación. Esto significa que en las llaves  $SW1$ ,  $SW2$ ,  $SW3$  y  $SW4$ , cuando pasan del estado de bloqueo a la conducción, la tensión entre drenador y fuente es próxima a cero, haciendo que la potencia disipada en ese lapso, también lo sea. Si bien las pérdidas en los transistores de efecto de campo (*mosfets*) se reducen considerablemente en una topología típica de este tipo mediante el uso de esta modulación, existen importantes transitorios sobre los diodos del rectificador que provocan un aumento de las pérdidas en los mismos. Si bien en las simulaciones realizadas antes de la implementación física del prototipo, estas

oscilaciones no fueron observadas, aún cuando en la misma se utilizaron componentes modelados con parámetros reales, sin embargo, se ha dado que en la práctica las mismas son de considerable importancia. Con el objeto de compensar este efecto, se realizó una modificación en la estructura convencional de un puente completo que consistió en la adición de una inductancia de conmutación  $L_c$  y los diodos  $D1$  y  $D2$  (Redl, 1991), según se muestra en la figura 5. A su vez, esta modificación ha permitido extender la gama de potencias bajo la cual ocurre conmutación suave, ya que de lo contrario, sólo podría haberse logrado conmutación bajo cero voltios hasta la mitad de su potencia nominal aproximadamente.

En el funcionamiento del convertidor, dada la modulación implementada, cada mosfet trabaja con un régimen de trabajo fijo de 50%, por lo que el control del ciclo de trabajo efectivo del sistema se logra regulando el desfase de una rama respecto a la otra obteniéndose así un ciclo de trabajo máximo cuando ambas ramas están desfasadas  $180^\circ$  y un ciclo mínimo cuando ambas están en fase. Asimismo, debe destacarse que las condiciones de operación de los mosfets  $SW1$  y  $SW2$  no son las mismas que las de  $SW3$  y  $SW4$ . Esto se debe a que existen dos estados, uno denominado ACTIVO, que es cuando dos mosfets diagonalmente opuestos se encuentran en conducción y el transformador transfiere la energía al lado secundario, y otro PASIVO, en el que el primario se encuentra en condición de cortocircuito y por lo tanto no transfiere energía. La rama compuesta por  $SW1$  y  $SW2$  se caracteriza por realizar la transición del estado ACTIVO al PASIVO (A-P), mientras que la rama opuesta compuesta por  $SW3$  y  $SW4$  realiza la transición del estado PASIVO al ACTIVO (P-A). Es por esta asimetría, que resulta conveniente que la inductancia de conmutación  $L_c$  y los diodos de enclavamiento  $D1$  y  $D2$  se coloquen entre el transformador y la rama que produce la transición de A-P específicamente, ya que de otro modo, corrientes elevadas circularían por  $D1$  y  $D2$  incrementando sus pérdidas considerablemente. Por su parte, el circuito de control se implementó en un CDS de la empresa Microchip, modelo dsPIC30F2023. El mismo, fue específicamente diseñado para aplicaciones de control en fuentes de alimentación conmutadas ya que posee avanzados módulos de conmutación y de conversión analógica a digital que permiten la implementación de las mayorías de las topologías existentes (Mohammed, 2007). Su función es indispensable en el funcionamiento del sistema, dado que es el encargado de la ejecución del algoritmo de SPMP y del control de los mosfets del puente.

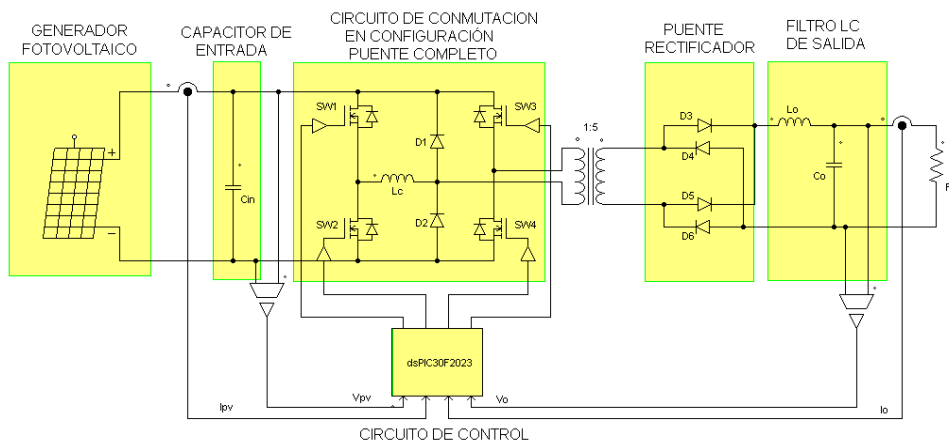


Figura 5: Esquema del convertidor DC-DC.

#### Parámetros del convertidor CC-CC

Como se indicó anteriormente, el convertidor se diseñó para una potencia nominal de trabajo de 2 kW. Los valores de tensiones y corrientes de entrada y salida y frecuencia de operación se detallan en la tabla 1.

Rango de Tensión de entrada	110 V - 170 V
Tensión de salida	400 V
Corriente Máxima de entrada	20 A
Corriente Máxima de salida	5 A
Frecuencia de operación	50 kHz

Tabla 1: Parámetros de funcionamiento del convertidor.

Dado que la alimentación del sistema proviene de paneles fotovoltaicos, cuya capacidad de generación es función de factores externos, es la necesidad del amplio rango de tensiones de entrada considerada en el diseño.

A continuación, siguiendo la denominación dada en la figura 5, se presentan los parámetros de los componentes utilizados en el convertidor.

SW1, SW2, SW3 Y SW4:	IRFP260
D1 Y D2:	MUR1620
Lc:	8 $\mu$ H
Cin:	700 $\mu$ F
Núcleo del transformador:	EE65/32/27 - Material N87 - EPCOS
Devanado primario	9 vueltas
Devanado secundario	44 vueltas
D3,D4,D5 y D6:	MUR820
Lout:	1,2 mH
Cout:	22 $\mu$ F

*Ensayos realizados sobre el prototipo.*

El prototipo desarrollado fue instalado y ensayado en el laboratorio del GER. Para el mismo, se dispuso de un arreglo de paneles de 750 Wp que acometen a un tablero de conexión y maniobras.

Para evaluar las características del convertidor se utilizó un multímetro de valor eficaz verdadero de 4 dígitos y medio y un osciloscopio digital marca *Tektronix* modelo TDS 1002B. Para la medición de corrientes se utilizaron resistencias *shunt* de 10 A por 60 mV en el lado primario y de 5 A por 60 mV en el secundario, ambos de 0,5% de precisión. Durante los ensayos se midieron valores de tensión y corrientes de entrada y salida a fin de determinar las potencias respectivas y estimar así la eficiencia del conversor en la gama de potencia determinada. También, se observó en el osciloscopio las formas de ondas en el punto medio de cada rama en simultáneo con la compuerta de los mosfet adyacentes a fin de verificar la ocurrencia de transición bajo cero voltios.

## RESULTADOS PRELIMINARES

De los primeros resultados experimentales, se obtuvo que el prototipo desarrollado alcanza una eficiencia del 92% a un cuarto de la potencia nominal. Cabe destacar que las condiciones de ensayo se realizan con un arreglo fotovoltaico cuya capacidad de generación es de 750 Wp, por lo cual no se pudo caracterizar la eficiencia del convertidor para potencias superiores.

Asimismo, se verificó que la inclusión de la inductancia de conmutación y los diodos de enclavamiento, representados en la figura 5 por Lc, D1 y D2 respectivamente, han producido una mejora notable en la reducción de las oscilaciones producidas en los diodos del puente rectificador. En la figura 6 se observa la tensión medida en el lado primario del transformador para un circuito convencional mientras que el circuito que incorpora a Lc, D1 y D2 se presenta en la figura 7. La reducción de las oscilaciones lograda reduce las pérdidas que se producen en los elementos de conmutación y facilita el proceso de filtrado necesario para la medición de las variables que se utilizan en el algoritmo de control.

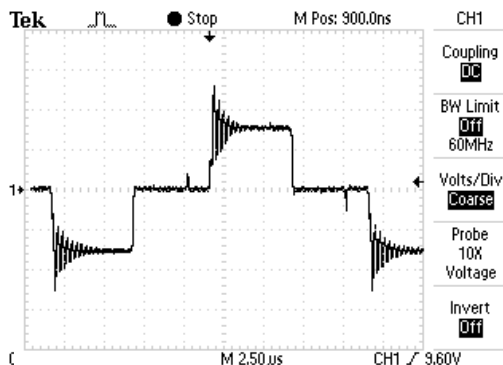


Figura 6: Forma de onda de la tensión en el lado primario del transformador para una topología en puente completo convencional.

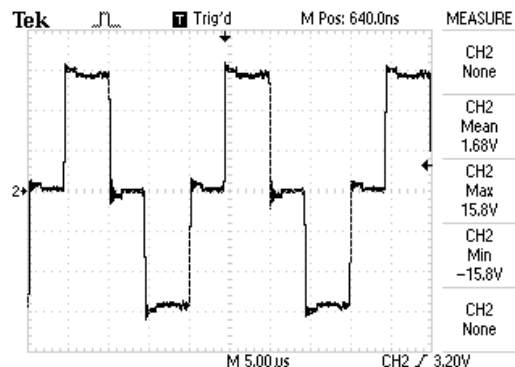


Figura 7: Forma de onda de la tensión en el lado primario del transformador para una topología en puente completo con la inclusión de Lc, D1 y D2.

Por otra parte, se comprobó que, en virtud de la modulación por desplazamiento de fase utilizada, los mosfets cumplen la condición de transición bajo cero voltios. Esto se muestra en las figuras 8 y 9 para las ramas de transición A-P y P-A respectivamente. Se observa que cuando la tensión drenador-fuente cae a cero, existe un pequeño lapso

que retarda el encendido del mosfet. Este retardo, asegura que la transición bajo cero voltios ocurra para una amplia gama de potencias.

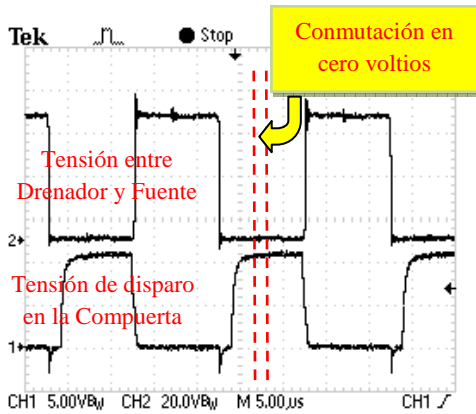


Figura 8: Verificación de la Conmutación suave en la rama A-P.

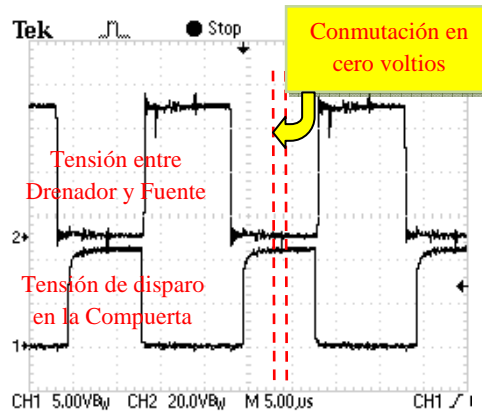


Figura 9: Verificación de la conmutación suave en la rama P-A:

Más estrictamente, es la rama P-A quien se halla propensa a perder este beneficio, dado que la energía acumulada en los elementos inductivos y capacitivos es mínima en ese instante. Esto se relaciona directamente con el nivel de potencia que controla, ya que a menor carga, menor es la energía puesta en juego, a tal punto en que los mosfets pertenecientes a esta rama, pierden la capacidad de conmutar en condición bajo cero voltios. Sin embargo, la inductancia  $L_c$ , permitió además disminuir este límite a potencias realmente bajas, menores a un cuarto de la potencia nominal.

Finalmente, en la figura 10 se muestra el prototipo del convertidor DC-DC con seguidor de punto de máxima potencia desarrollado e instalado en el laboratorio del GER. En el mismo se indican las partes constitutivas del mismo permitiendo así realizar la analogía con el esquema presentado en la figura 5.



Figura 10: Prototipo del Convertidor CC-CC desarrollado.

## CONCLUSIONES

De esta manera, se implementó un convertidor CC-CC como parte del desarrollo de un inversor para conexión a red. En el mismo se han utilizado técnicas de control que reducen las pérdidas en la conmutación con el objetivo de obtener una eficiencia elevada. A su vez, con una ligera modificación a la topología en puente completo convencional, mediante el agregado de una inductancia cuyo valor es mucho menor al de la inductancia magnetizante del transformador, se han obtenido excelentes resultados en cuanto a la disminución de las oscilaciones producidas por la conmutación, principalmente en el puente rectificador, bajo distintas condiciones de operación. A su vez, esta

modificación permitió extender el rango de conmutación suave, dado que de lo contrario, para niveles de potencia menor al 50% de la nominal, la transición en la rama P-A deja de obtener este beneficio. Como continuación del presente trabajo, se plantea la realización de ensayos que permitan caracterizar completamente la eficiencia y fiabilidad de los algoritmos de control del convertidor según el procedimiento establecido en la norma IEC 61683.

## REFERENCIAS

- Cáceres Manuel, Pintos Exequiel, Vera Luis H., Busso Arturo J., Cadena Carlos (2010). Modelo Matemático de Red de Baja Tensión Para Simulación de Sistemas de Generación Fotovoltaica Acoplada a Red. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 2010, 14, 04.25-32.
- Pontoriero D. H., Molina M. G., Mercado P. E. (2009). Evaluación Técnica y Económica de Generación Híbrida Solar-Eólica en la Provincia de San Juan - Argentina. XIII Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré 2009.
- Morán Federico A., Facchini Marcos L., Pontoriero Domingo H. y Doña, Victor M. (2009). Inserción de Energía Distribuida a través de instalaciones fotovoltaicas domiciliarias ajustadas a las curvas típicas de demanda residencial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 2009, 13, 04.93.
- Kamil, Mohammad (2007). *Switch Mode Power Supply (SMPS) Topologies (Part I)*. Microchip Technology Inc. AN1114.
- Phattara Suwannatrai, Pisist Liutanakul y Pongpit Wipasuramonton (2011). Maximum Power Point Tracking by Incremental Conductance Method for Photovoltaic Systems with Phase Shifted Full-Bridge dc-dc Converter. The 8th Electrical Engineeringl ElectroniCS, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011.
- Redl Richard, . Fellow Nathan O y Balogh Laszlo (1991). A novel Soft-Switching Full-Bridge DC/DC Converter: Analysis, Design Considerations, and Experimental Results at 1.5 kW, 100 kHz. *IEEE Transactions of Power Electronics* 3, 14, 408-418.
- Hoffman W. (2006). PV on the way from few lead markets to a world market. *European Renewable Energy Review* 2006, 31-34
- M. Kazimierzuk (2008). *Pulse Width Modulated DC-DC Power Converters*, 1ª edición, pp. 325-257. John Wiley & Sons.

## ABSTRACT

In this paper, the development of a 2 kW DC-DC Converter for use in photovoltaic systems is presented. In this, a full bridge topology with phase shift keying is used. A small change to the conventional structure consisting in the addition of a commutating inductance and two clamp diodes reduce losses in the commutating elements. Moreover, in order to extract the maximum power available from photovoltaic array, in the control a Maximum Power Point Tracker algorithm based on the "Perturbation and Observation" technique state is implemented. The results obtained show a good performance of the prototype developed.

**Keywords:** PV generation, DC-DC converter, MPPT