

## **DISEÑO DE UN CONVERTIDOR ELEVADOR CONTINUA-CONTINUA PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS.**

**Serrano V., Villena M., Cadena C.**

Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)  
Consejo de Investigación Universidad Nacional de Salta (CIUNSA)  
Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta  
Tel. 03874255578 – email: serranovh@asades.unsa.edu.ar

Recibido 09/09/15, aceptado 16/10/15

**RESUMEN:** Este trabajo presenta el diseño de un convertidor elevador de corriente continua a corriente continua cuyo objetivo es alimentar la etapa de potencia de un inversor fotovoltaico de dos etapas. Para elevar la tensión se diseñó, simuló y posteriormente se fabricó un transformador de alta frecuencia que es gobernado por cuatro transistores IGBT conectados en la topología puente completo. La señal de alta frecuencia se genera mediante un circuito integrado que emplea la técnica de modulación por ancho de pulso. Se presentan las ecuaciones utilizadas en el proyecto y las mediciones obtenidas en laboratorio. Se concluye que el objetivo se cumplió satisfactoriamente.

**Palabras clave:** Convertidor continua-continua, Convertidor elevador. Transformador de alta frecuencia, Generación Fotovoltaica.

### **INTRODUCCION**

En los sistemas que proveen electricidad utilizando energías no convencionales como es el caso de la energía solar fotovoltaica, se hace necesario modificar la tensión continua que entregan los paneles fotovoltaicos en tensión alterna sinusoidal para alimentar a diferentes equipos que así lo requieran. En estos casos se utilizan los inversores de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA), los mismos deben minimizar las pérdidas por conversión para mejorar la eficiencia de todo el sistema. La bibliografía consultada presenta una amplia variedad de modelos de inversores que pueden estar conformados por diferentes etapas en su constitución interna. (Kjær, 2005; Hassaine, 2010).

En este trabajo se busca complementar la etapa de potencia realizada previamente y presentada en el Congreso de ASADES 2014 (Serrano et al, 2014), el objetivo final es unir ambos trabajos y montar un inversor con conexión a la red eléctrica. El prototipo final tendrá las correcciones y mejoras que se fueron implementado en base a la experiencia adquirida en el transcurso de las investigaciones.

Una de las topologías utilizadas en los inversores, está conformada por dos etapas, la primera de ellas, es la etapa de conversión CC-CC, en la misma se eleva la tensión que se obtiene del generador fotovoltaico hasta una tensión de 320V. La segunda, es la etapa de potencia, en ésta se convierte la tensión continua en tensión alterna sinusoidal que luego será conectada a la red. En la figura 1 se puede observar el diagrama de un sistema fotovoltaico con el inversor de dos etapas, el bloque convertidor CC-CC es el que se implementa en este trabajo.

El convertidor CC-CC seleccionado esta formado por un transformador que trabaja a una frecuencia de 50 KHz y es gobernado por transistores bipolares de compuerta aislada o IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) que se conectan en una configuración en puente H, a la vez, los transistores se comandan con un dispositivo específico para esta función, como es el circuito integrado (CI) driver IR2110 (International Rectifier-IR2110, 2005). La etapa de oscilación y generación de los pulsos de control lo realiza el circuito integrado SG3525A (STMicroelectronics-SG3525A, 2005) que utiliza la técnica de modulación por ancho de pulso.

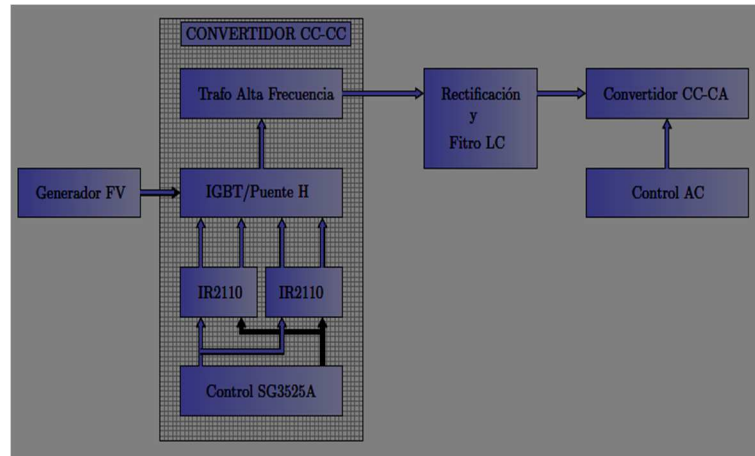


Figura 1: Sistema FV. con Inversor de dos etapas.

Uno de los objetivos de estudio de este proyecto es el cálculo y posterior bobinado del transformador. Se pretende, mediante el CI SG3525, realizar un control directo de la frecuencia de funcionamiento del convertidor para comprobar el correcto funcionamiento del transformador. Una vez alcanzada esta etapa se puede acoplar al conjunto constituido por los siguientes elementos: Transformador-IGBT-Driver; una placa de control que incluya un micro-controlador para que realice la función del CI SG3525A; agregando un lazo de control para la tensión de salida y la obtención del punto de máxima potencia del generador fotovoltaico entre otras funciones.

## DISEÑO DEL TRANSFORMADOR

El transformador es el elemento encargado de transferir energía de una fuente de alimentación hacia la carga. Idealmente no almacena energía, la transfiere en forma instantánea. En la práctica, el transformador almacena energía que generan pérdidas que no serán consideradas en este trabajo.

Algunas características de interés que aporta el transformador para un circuito eléctrico se enumeran a continuación:

- Con la elección de una adecuada relación de vueltas entre el bobinado primario y secundario, se puede obtener un nivel de tensión mayor, menor o igual a la tensión de entrada.
- El secundario puede tener múltiples salidas con diferentes niveles de tensión.
- Aislación entre el bobinado primario y secundario, que le otorga a la carga, la protección necesaria ante un contacto eléctrico no deseado.

Para el diseño del transformador se puede consultar una extensa bibliografía que aborda este tema. (Díaz, 2004; Sánchez, 2012). El método utilizado en este trabajo es el denominado: “Producto de áreas”. (Vázquez, 2010; Molina, 2006). Los datos de partida son:

Tensión de entrada	[Vin]	105 [Vcc]
Tensión salida	[Vo]	320 [Vcc]
Frecuencia de conmutación	[Fc]	50 [KHz]
Potencia de salida	[Psal]	400 [W]
Densidad de corriente	[Dc]	400 [A/m]

Tabla 1: Datos para el diseño del transformador.

Mediante el empleo del software de la empresa Ferroxcube (SFDT, 2010) se ingresan los datos de potencia y frecuencia en la ventana de selección de núcleos para transformadores, el programa entrega una tabla con distintos tipos de núcleos y un gráfico con las curvas Bpeak y Pthr en función de la frecuencia. La figura 2 presenta capturas de pantalla de estas ventanas.

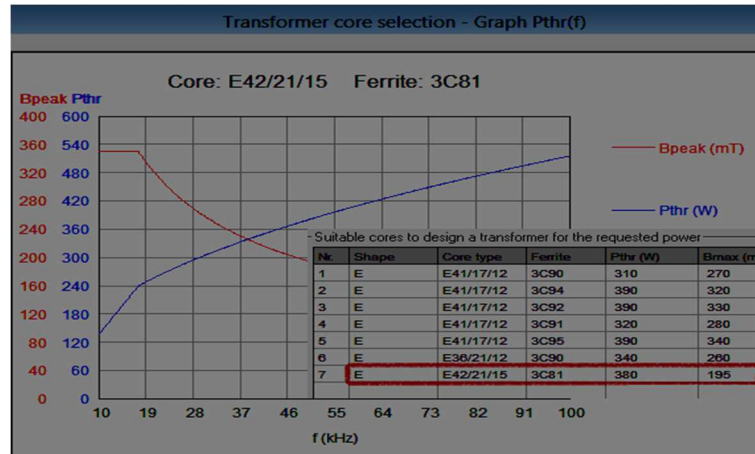


Figura 2. Curvas  $B_{peak}(f)$  y  $P_{thr}(f)$  del software Ferroxcube

Ingresando los valores requeridos por la ecuación 1 se obtuvo un valor de producto de áreas ( $A_c * A_e$ ) igual a  $1,15 \text{ cm}^4$ .

$$A_c * A_e = \frac{0,68 * P_{sat} * D_c * 10^3}{f_s * B_{nom}} \quad (1)$$

La hoja de datos del fabricante del núcleo, entrega para el producto de áreas,  $A_c * A_e = 3,17 \text{ cm}^4$ . Contrastando ambos resultados se observa que el valor calculado es menor que el valor del fabricante, por lo tanto se puede inferir que la elección del núcleo es la adecuada. Esta iteración entre ambos valores es necesaria para asegurar una buena selección. Con las demás fórmulas proporcionadas en la bibliografía, se determinan el calibre y número de vueltas para el primario y secundario.

## SIMULACIÓN DEL TRANSFORMADOR

Para contrastar los resultados obtenidos con respecto a la relación de transformación entre el bobinado primario y el secundario se utilizó el software de simulación PSIM. (PSIM, 2010) Se ingresó como elemento a simular, un transformador ideal monofásico conectado a un puente H formado por transistores IGBT, cada compuerta se alimenta con una fuente de onda rectangular de 50KHz. En la figura 3 se observa el esquemático del circuito utilizado y en la figura 4 se presentan las señales del bobinado primario y secundario. Como se puede comprobar la tensión del secundario da un valor aproximado a los 315V que está bastante próximo con lo esperado.

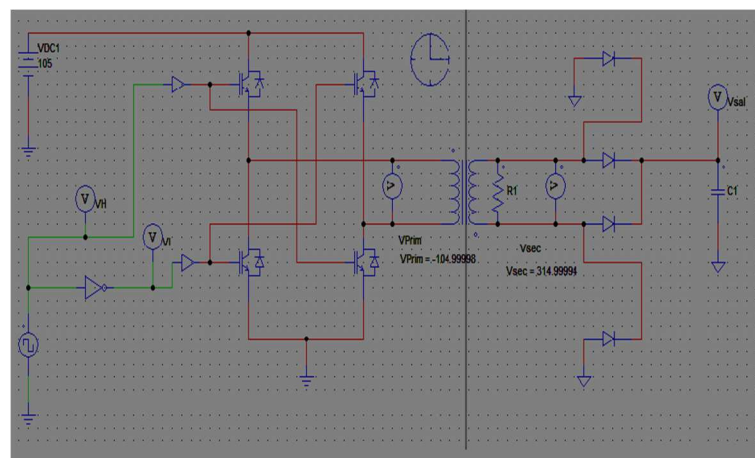


Figura 3. Esquemático en PSIM para comprobar la relación de transformación

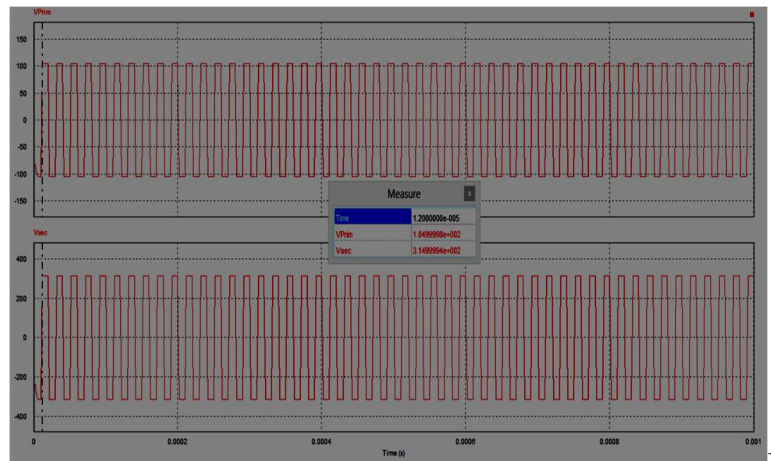


Figura 4. Tensión del primario  $V_{prim} = 105V$ . Tensión del secundario  $V_{sec}=315V$

### PUENTE H.

Para controlar el transformador se seleccionó la topología Puente H porque entrega una tensión de salida que toma valores positivos y negativos a partir de una única fuente de alimentación, esta característica contribuye a que el núcleo no se sature. La topología se conforma con cuatro llaves electrónicas que bien pueden ser transistores bipolares, transistores de efecto de campo o MOSFET's (Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor) o transistores IGBT. Las llaves se conectan en dos ramas con dos transistores en cada una, el funcionamiento consiste en activar, en un intervalo de tiempo  $t_1$ , un transistor de cada rama permitiendo la circulación de corriente en un sentido por la carga. En el intervalo  $t_2$ , se activa el otro par de transistores, haciendo que la corriente circule por la carga en el sentido contrario al primer intervalo. (Mohan, 1995)

### TRANSISTORES IGBT.

Los transistores utilizados son G4PC30UD (International Rectifier-G4PC30UD, 2000), es un dispositivo que tiene las características del transistor bipolar en cuanto al manejo de alta tensión y corriente entre los terminales de colector y emisor, con una baja pérdida de potencia. (Sattar; AN401, 2012) El control se realiza por tensión a través del terminal de compuerta, esta característica pertenece al transistor MOS y permite elevadas frecuencias de conmutación. Los parámetros de los transistores utilizados en este proyecto se detallan a continuación:  $V_{CES} = 600V$ ,  $V_{CE(on) typ.} = 1.95V$ ,  $V_{GE} = 15V$ ,  $I_C = 12A$ .

### DRIVER IR2110.

El circuito integrado IR2110 reduce la sensibilidad al ruido y el tiempo de conmutación del transistor IGBT. Esta diseñado para excitar a dos transistores conectados en medio puente como se observa en la figura 5.

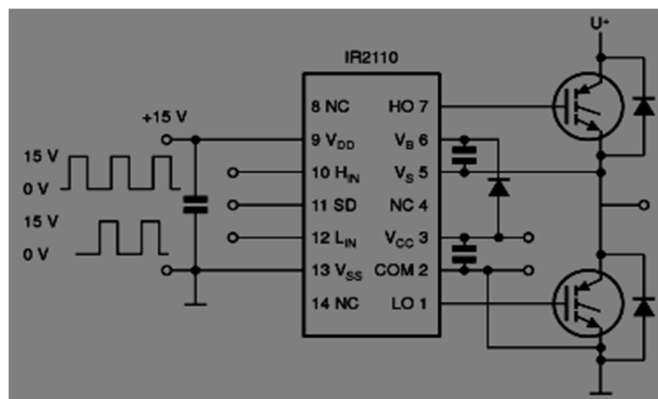


Figura 5. IR2110 controlando a dos IGBT conectados en medio puente.

Para un circuito puente completo se utilizan dos circuitos integrados IR2110. Para encender el transistor de potencia del lado alto se necesita una tensión de compuerta mayor que la tensión de drenaje, que es igual a la tensión de alimentación.

El circuito utiliza la técnica “bootstrap” que requiere un capacitor y un diodo. El valor del capacitor depende de la carga, la frecuencia de conmutación y el ciclo de trabajo. El valor mínimo se obtiene de la nota de aplicación AN978 (AN978, 2007) del fabricante “International Rectifier”. La ecuación 2 es la que propone el mencionado fabricante para calcular el capacitor bootstrap.

$$C \geq \frac{2[2Q_g + \frac{I_{qbs}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs}}{f}]}{V_{cc} - V_f - V_{Ls} - V_{min}} \quad (2)$$

### SG3525A

El C.I. SG3525A entrega señales rectangulares en contra-fase, que se controlan con la técnica de modulación por ancho de pulso o PWM (Pulse Width Modulation). La frecuencia del PWM depende del capacitor CT conectado entre el Pin 5 y masa, además de la resistencia RT conectada entre el Pin 6 y masa. La resistencia RD conectada entre los Pines 5 y 7 determina el “deadtime”. Con el empleo de la ecuación 3, se obtiene la frecuencia en función de CT, RT y RD.

$$f = \frac{1}{C_T(0.7R_T + 3R_D)} \quad (3)$$

La figura 6 muestra la frecuencia y señal que entrega un canal del C.I. SG3525A.



Figura 6. Frecuencia del C.I. SG3525A

El Pin 1 y el Pin 2 son las entradas inversora y no-inversora del amplificador de error que controla el ciclo de trabajo del SG3525A. Cuando la tensión en el Pin 1 es mayor que la tensión del Pin 2, el ciclo de trabajo decrece.

### OPTO-ACOPLADOR

El dispositivo utilizado es el Opto-Acoplador <sup>08.117</sup> 4N25 (Vishay Semiconductors-4N25, 2012). El mismo provee aislación galvánica entre el neutro de la etapa de salida; que se conectara a la red eléctrica y el

neutro del generador fotovoltaico y etapa de control. Su funcionamiento es el siguiente: cuando circula corriente por el diodo conectado entre los terminales 1 y 2, este comienza a emitir radiación infrarroja que excita a la base del transistor de salida llevando al mismo al estado de conducción.

## DIODOS ZENER

Los diodos zener son los BZY97–C110 (Vishay Semiconductors- BZY97–C110, 2002) tienen una tensión de ruptura de 110V.

## FUNCIONAMIENTO DE LA ETAPA DE CONTROL

Para el diseño implementado en este trabajo el funcionamiento es el siguiente: Cuando la tensión de salida supera el nivel de 330V, se activan los diodos Zener y comienza a circular corriente por el diodo emisor del opto-acoplador, este emite radiación que excita la base del foto-transistor, de este modo comienza a circular corriente desde el Pin 16 (Vref) del SG3525A hacia la resistencia conectada en el Pin 1 del mismo, en esta resistencia se tiene una tensión que se compara con la tensión del pin 2. De acuerdo a los valores obtenidos el ciclo de trabajo se incrementa o decrece.

El cálculo de la resistencia limitadora para el diodo emisor del opto-acoplador se observa en la ecuación (4).

$$R_{Limit} = \frac{3*V_z - V_{sal} - V_{Diodo}}{I_F} = 500ohm \quad (4)$$

Los datos para el cálculo y el valor obtenido se presentan en la tabla 2.

DATOS	Valor	Unidad
Tensión de zener [Vz]	110	[V]
Tensión de salida [Vsal]	320	[V]
Tensión diodo opto-acoplador [VDiodo]	5	[V]
Corriente diodo opto-acoplador [IF]	50	[mA]
Corriente colector opto-acoplador [ICE] de la Fig 6 de hoja de datos Vishay	8	[mA]
Resistencia limitador [RLim]	500	[ohm]

Tabla 2. Datos para calcular  $R_{Lim}$  del diodo del opto-acoplador

Con la corriente de colector del opto-acoplador ICE, se obtiene una tensión de aproximadamente 8V en el Pin 1 del SG3525A, con esto se garantiza el correcto funcionamiento del circuito comparador.

## RECTIFICADORES

Al secundario del transformador se conecta un puente rectificador formado por cuatro diodos UF5408 (Vishay General Semiconductor-UF5408, 2012), cuya característica principal es la de ser diodos de recuperación ultra rápida, es decir, son aptos para trabajar a la frecuencia de conmutación sin perturbar la señal de salida, ni elevar su temperatura que podría llevar a la destrucción de los mismos. Los parámetros de funcionamiento de este diodo son: corriente directa promedio ( $I_F(AV)$ ) = 3.0 A y Tensión de pico inversa repetitiva ( $V_{RRM}$ ) = 1000 V.

Dichos diodos cumplen la función de convertir la señal alterna en una señal continua, esta señal tiene una forma de una onda pulsante lo cual implica que tiene componentes armónicos que se deben suprimir.

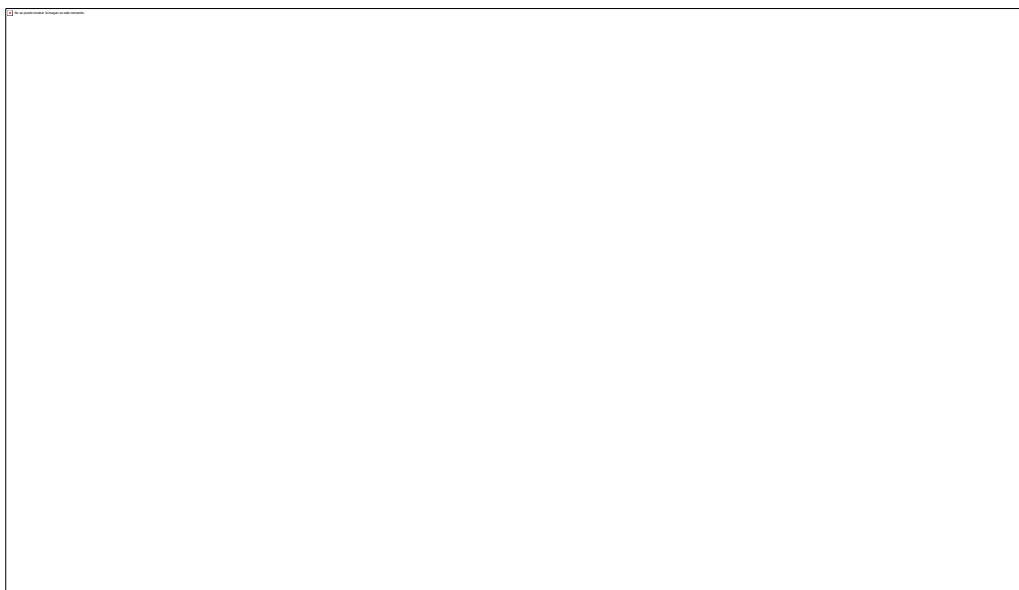
Para esto se utiliza un filtro pasabajo LC que se calcula e implementa de acuerdo a la bibliografía existente.

## **IMPLEMENTACION DEL PROTOTIPO**

El diseño del convertidor se realizó utilizando el programa KiCad. (KiCad). Este software es libre y multi-plataforma (se puede ejecutar en distintos sistemas operativos) incluye una amplia librería de componentes que se utilizan en electrónica de potencia. Además, permite al usuario implementar módulos propios para completar el diseño. El software consta de cuatro entornos de trabajo:

- 1) Editor de esquema: en el cual se dibuja el diseño a implementar, se enumeran los componentes, posteriormente se realiza una comprobación de reglas eléctricas y se genera un lista de conexiones (Net List).
- 2) Asociación de componentes: se asocia el elemento eléctrico a utilizar con el encapsulado propiamente dicho que provee el fabricante: dimensiones y números de pines.
- 3) Editor de PCB: En este entorno se dibujan las pistas de conexión entre elementos, se deben respetar las reglas de diseño como ser ancho de pistas, distancia entre las mismas, separación entre zonas de baja y alta tensión, dimensión de las isletas y también se determina el tamaño final de la placa.
- 4) Visualizador: en él, se puede observar el diseño final de la placa y se genera el “Gerber” que será usado en la fabricación de la placa, ya sea por métodos artesanales o bien, en una casa especializada.

La figura 7 presenta una captura de pantalla de la ejecución de KiCad en su entorno de Edición de esquema, en el cual se puede apreciar el diseño llevado adelante en el presente trabajo.



*Figura 7. Esquema desarrollado en KiCad del convertidor CC-CC*

## **MONTAJE DEL CONVERTIDOR**

Una vez completado el diseño del convertidor, se procedió a implementar el mismo: colocar y soldar los componentes, verificar que no existan pistas cortadas o presenten cortocircuito entre pistas adyacentes o con la masa. También se bobinó el transformador de acuerdo a los cálculos realizados previamente. En la figura 8 se puede observar el prototipo terminado.

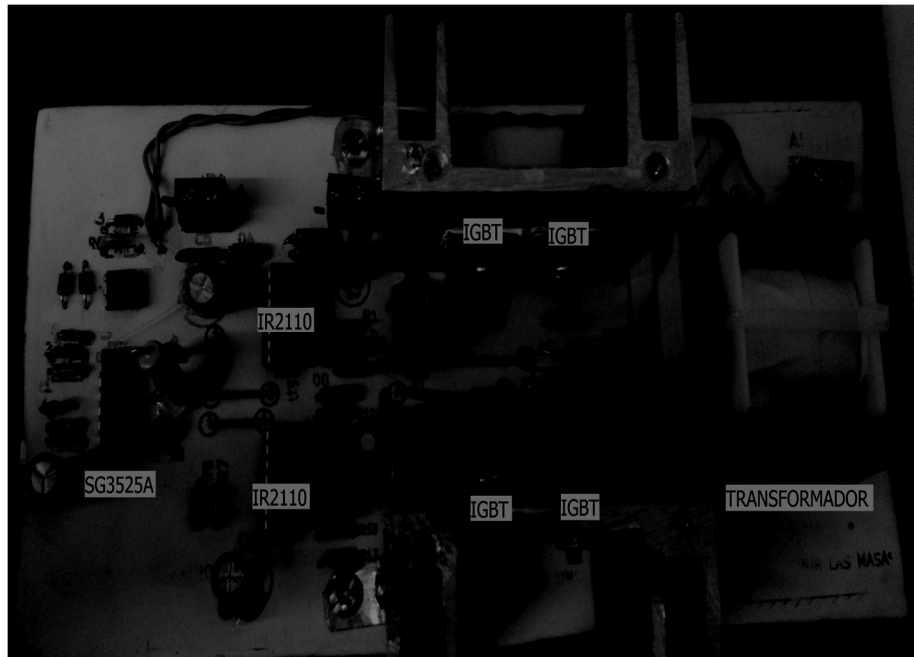


Figura 8. Implementación del Convertidor CC-CC

## MEDICIONES

Para la prueba de laboratorio se conectó la alimentación de 15V para el C.I. SG3525A y para las dos entradas del C.I. Driver IR2110: la alimentación  $V_{DD}$  del Pin 9 y la  $V_{CC}$  del Pin 3. La etapa de potencia se conectó a una fuente de 105V. Como carga se conectó una lámpara halógena de 150W, optando elevar el consumo hasta los 400W, propuestos inicialmente para trabajos futuros de acuerdo a los resultados obtenidos en este primer prototipo. En la tabla 3 se exponen los parámetros medidos en el laboratorio.

PARÁMETROS MEDIDOS	Valor	Unidad
Frecuencia de conmutación	48,35	[KHz]
Tensión de entrada SG3525A/IR2110	15,00	[V]
Corriente de entrada para 15V	23,12	[mA]
Potencia de entrada para 15V	346,80	[mW]
Tensión de entrada (etapa de potencia)	95,00	[V]
Corriente de entrada (etapa de potencia)	1,56	[A]
Potencia de entrada ( etapa de potencia)	148,2 0	[W]

Tabla 3. Parámetros de entrada del convertidor CC-CC

## POTENCIA

La potencia total de entrada se determina con la suma de las potencias del C.I. regulador y driver, más la potencia entregada al transformador.

$$P_{ent} = V_{15V} * I_{15V} + V_{pot} * I_{pot} = 148,55[W] \quad (4)$$

La potencia de salida se determina mediante la ecuación:

08.120



$$P_{sal} = V_{sal} * I_{sal} = 138,49[W] \quad (5)$$

## RENDIMIENTO

El rendimiento ( $\eta$ ) del convertido CC-CC se obtiene realizando el cociente entre la potencia de salida y la potencia de entrada. Al resultado se lo multiplica por 100 para obtener el valor porcentual.

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} * 100\% = 93,2 \quad (6)$$

PARÁMETROS MEDIDOS	Valor	Unidad
Frecuencia de conmutación	48,35	[KHz]
Tensión salida	266,34	[V]
Corriente de salida	0,52	[A]
Potencia de salida	138,49	[W]
Rendimiento ( $\eta$ )	93,2	%

*T abla 4. Parámetros salida del convertidor CC-CC.*

## CONCLUSIONES

El prototipo desarrollado en este trabajo permitió investigar, conocer e interconectar los diferentes componentes utilizados en la implementación del convertidor CC-CC. Estos componentes tienen características propias y requieren de cálculos adecuados para su correcto ensayo. El diseño de la placa del circuito impreso, presentó un desafío que se pudo concretar con éxito, ya que la misma respondió en forma satisfactoria a la frecuencia de trabajo.

El estudio del transformador de alta frecuencia, como pieza fundamental de las aplicaciones en electrónica de potencia, condujo a la consulta de una amplia bibliografía disponible sobre este tema, se optó, entre todos los métodos disponibles, aquel que presentaba un ejemplo completo de cálculo y aplicación. La adquisición del núcleo del transformador fue una barrera a vencer, puesto que, una vez calculadas sus características: tamaño, material y potencia, hubo que recurrir a comercios especializados para su compra.

Con los resultados obtenidos en el laboratorio, que en principio difieren de las estimaciones iniciales, llevan al compromiso de revisar: el método adoptado para calcular el transformador, los cálculos propiamente dichos o bien la técnica utilizada en el bobinado.

El correcto funcionamiento del convertidor permite concluir que el objetivo de diseño e implementación del mismo fue cumplido de manera satisfactoria.

## REFERENCIAS

Kjær S. (2005), Design and Control of an Inverter for Photovoltaic Applications. Aalborg University Institute of Energy Technology.

Serrano V., Hoyos D., Villena M. (2014). Análisis, simulación e implementación de la etapa de potencia de un inversor monofásico conectado a red. XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente y VI Conferencia Regional Latinoamericana del ISES. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 18, pp.08.97-08.104, 2014. ISSN 2314-1433

Hassaine L. (2010), Implementación de un Control Digital de Potencia Activa y Reactiva para Inversores. Aplicación a Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red. Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad Carlos III de Madrid, Capítulo 2.

Díaz C. (2004), Diseño de elementos magnéticos de alta frecuencia. Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico.

Sánchez R. (2012), Diseño e implementación de un transformador de potencia a alta frecuencia. Universidad Industrial de Santander.

Vázquez Blanco A. (2010), Acondicionador de Potencia para Sistemas de Alimentación basados en Celdas de Combustible. Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico.

Molina Coronel J. (2006), Estudio del convertidor puente completo aislado con sujetador activo aplicado a celdas de combustible. Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico.

SFDT, (2010). Disponible en <http://www.ferroxcube.com/FerroxcubeCorporateReception/design>.

PSIM User's Guide. (2010). Version 9.0. Release 2. March 2010.

Mohan N., Undeland T. y Robbins W. (1995). Power electronics. Converters, applications and design, 2a edición, pp 162-163. John Wiley & Sons, inc. New York.

Sattar A. , Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Basics. IXYS Corporation.

AN401, (2012). MOSFET/IGBT Drivers Theory and Applications. IXYS Integrated Circuits Division.

International Rectifier, (2005). IR2110. Data Sheet No. PD60147 rev.U. International Rectifier. 2005.

AN-978, (2007). HV Floating MOS-Gate Driver Ics. International Rectifier.

SG3525A, (2005). Pulse Width Modulator Control Circuit. Literature Distribution Center for ON Semiconductor.

KiCad. Disponible en <http://www.kicad-pcb.org>

International Rectifier-G4PC30UD. PD 91462B. 2000. International Rectifier. Disponible en <http://www.farnell.com/datasheets/237165.pdf>.

Vishay General Semiconductor-UF5408. Disponible: <http://www.vishay.com/docs/88756/uf5400.pdf>

Vishay Semiconductors-4N25. Disponible: <http://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf>. 2012

Vishay Semiconductors- BZY97-C110. Disponible: <http://www.datasheets360.com/pdf/-8514688217523837974>. 2002

## ABSTRACT

This paper presents the design of a boost converter DC to DC which aims to feed the power stage of a two-stage photovoltaic inverter. To raise the voltage, a high frequency transformer was designed, simulated and fabricated; this transformer is controlled by four IGBT transistors connected in full-bridge topology. The high frequency signal is generated by an integrated circuit which uses the technique of pulse width modulation. The equations used in the project and the measurements obtained in the laboratory are presented. We conclude that the objective was met successfully.

**Keywords:** DC-DC converter, boost converter. High frequency transformer.