

DISEÑO DE UN INVERSOR MONÓFASICO ALIMENTADO CON PANEL SOLAR

Juan Carlos Pérez Merlos

Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería
Toluca - Estado de México

Mireya Salgado Gallegos

Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería
Toluca - Estado de México

Silvia Edith Albarrán Trujillo

Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería
Toluca - Estado de México

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: Debido a problemas de calentamiento global muchos países están invirtiendo en energía verde o energía limpia, todas las variantes de este tipo de generadores de energía requieren el uso de convertidores de corriente directa a corriente directa y otros de convertidores de corriente directa a corriente alterna. Dichos convertidores e inversores son controlados a través de algoritmos que realizan una modulación de ancho de pulso (PWM) implementados con microprocesadores y procesadores digitales de señales. En este trabajo se presenta el diseño de un inversor monofásico alimentado con panel solar y controlado con FPGA. Los resultados muestran que es factible obtener energía eléctrica para alimentar dispositivos de corriente alterna.

Palabras clave: Inversor monofásico, celdas solares, VHDL, FPGA, Fuente Buck.

INTRODUCCIÓN

El efecto fotovoltaico fue descubierto por Becquerel en 1839 y consiste en la generación de la fuerza electromotriz en un dispositivo semiconductor, debido a la absorción de la radiación luminosa mediante las células fotovoltaicas que convierten la energía luminosa del sol en energía eléctrica (Santamarta, 2006).

Por un lado, hoy en día, el uso de la energía eléctrica ya sea monofásica o trifásica es indispensable en la vida cotidiana en cualquier ciudad, ésta se ha vuelto motor de desarrollo en las actividades diarias del hombre. Existe gran cantidad de equipos eléctricos o electrónicos que permiten al ser humano facilitar una tarea o usarlos como elementos de distracción y diversión. Actualmente, la energía se aplica desde el encendido de una lámpara hasta alimentar grandes máquinas industriales que permiten la transformación de las materias primas como productos elaborados (Guerra & Reyes, 2008).

Por otro, el crecimiento de la población mundial ha sido insólito, de ser en 1930 aproximadamente 2,000 millones de personas, se estima que en 2030 alcance los 8,000 millones. Este crecimiento poblacional está estrechamente relacionado con el crecimiento en la demanda de energía eléctrica mundial (Gasca, 2013).

Gasca (2013) de acuerdo con Raugei (2010), afirma que las fuentes primarias de energía que dominan en el mundo son los hidrocarburos y corresponden al 81.2% de toda la energía primaria producida y consumida. En México, la dependencia es mayor; en el 2011, el 91.2% de la producción de energía primaria correspondió a combustibles fósiles (64.1% petróleo, 24% gas y 3.1% carbón) (Gasca, 2013).

En la actualidad, Campos (2015) menciona que el más grande consumo energético mundial está en Norteamérica con un 29.8% debido al índice de industrialización de EEUU y Canadá, seguido por el gran continente Asiático con un 19.3%, la Unión Europea con un 17.3%, Europa Oriental con un 13.3%, Sudamérica está apenas con un poco más del 5% y el complemento 15.3% el resto del mundo (Campos, 2015).

Gasca (2013) opina que los países emergentes (China, India, Brasil, México, etc.) y los países menos desarrollados necesitan para su desenvolvimiento tener acceso pleno a las fuentes de energía modernas, entendidas éstas como electricidad y carburantes. De ahí que la demanda energética mundial está en continuo aumento a un ritmo de crecimiento anual del 2.47% (Gasca, 2013).

De estas fuentes, la relacionada a las celdas fotovoltaicas es una de las más prometedoras debido a la reducción del costo constante desde 1980, esperando que su precio sea muy competitivo entre el 2020 y 2030. De acuerdo a un panorama optimista se piensa que las celdas fotovoltaicas aporten el 35% de

la producción eléctrica mundial en el 2050 (Raugei, 2010).

Rafeeq et al. (2012), comentan que, debido al impacto negativo sobre el ambiente por los combustibles fósiles, las nuevas fuentes de energía serán necesariamente fuentes de energía renovables. Señalan que se estima un crecimiento de ellas del 19% en 2010 al 32% en el 2030, tratando de reducir consecuentemente las emisiones de CO₂ [6]. También enfatizan que para utilizar todas las formas de energía renovables se necesita el uso de un inversor de corriente directa a corriente alterna, ya que la mayoría de estas fuentes generan corriente directa (Rafeeq, Rehman-ur-Atta, & Bital, 2012).

Actualmente las energías renovables se han establecido en todo el mundo como una importante fuente de energía. Su rápido crecimiento, particularmente en el sector eléctrico, es impulsado por diversos factores incluyendo el aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables, iniciativas de política aplicada, un mejor acceso al financiamiento, seguridad energética y cuestiones de medio ambiente, demanda creciente de energía en economías en desarrollo y emergentes (REN21, 2016).

En el 2014, la energía renovable generó un estimado del 19.2% en el consumo final mundial de energía, mientras que en el 2015 continuó creciendo en la capacidad de generación (ver Figura 1). Durante el 2015, se añadió un estimado de 50 Gigavatios (GW) de capacidad de energía renovable sumando 227 Gigavatios, el mayor incremento anual jamás registrado (REN21, 2016).

En paralelo con el crecimiento en mercados e inversiones, el 2015, vislumbró avances continuos en: tecnología de energías renovables, la mejora de eficiencia energética en curso, un incremento en el uso de las tecnologías en redes inteligentes y avances significativos en hardware y software de

apoyo para la integración de las energías renovables. A finales de este año, la capacidad de estas energías es suficiente para abastecer aproximadamente el 23.7% de la electricidad mundial. Una vez más China, Alemania, Japón, y Estados Unidos reportaron la mayor parte de la capacidad añadida, como se muestra en la Figura 2, sin embargo, las economías emergentes están aportando significativamente al crecimiento mundial en gran medida por el aumento de competitividad de los costos de energía fotovoltaica (REN21, 2016).

De acuerdo a De la Cruz et al. (2014), una fuente de energía fotovoltaica requiere de los sistemas que muestran la Figura 3, un banco de capacitores, otro de baterías y varias fuentes de conversión tanto de corriente directa a corriente directa (CD/CD) como de corriente directa a corriente alterna (CA/CA) para que pueda alimentar una carga o a la red principal de energía eléctrica (De la Cruz, Lema, del Toro García, & Roncero, 2014).

En este contexto, Mekhilev y Rahim (2002), desarrollaron una modulación PWM aplicado a un inversor trifásico con IGBTs usando un FPGA de Xilinx XC4008E. Utilizan la técnica de una onda senoidal generada a través de una tabla de búsqueda o datos almacenados en una memoria programable de sólo lectura (Erasable Programmable Read Only Memory, EPROM), la resolución depende de los datos que representan a la onda. Asimismo, la onda triangular fue realizada por un contador arriba abajo, la relación del conteo determina la frecuencia portadora y la precisión del proceso de muestreo. Para este caso usaron una frecuencia portadora de 18 KHz, la frecuencia de salida del inversor se estableció en 50Hz, este inversor se utilizó con una fuente fotovoltaica conectada a la red (Melkhilev & Rahim, 2002).

Sandoval et al. (2006), desarrollaron un inversor didáctico monofásico de onda

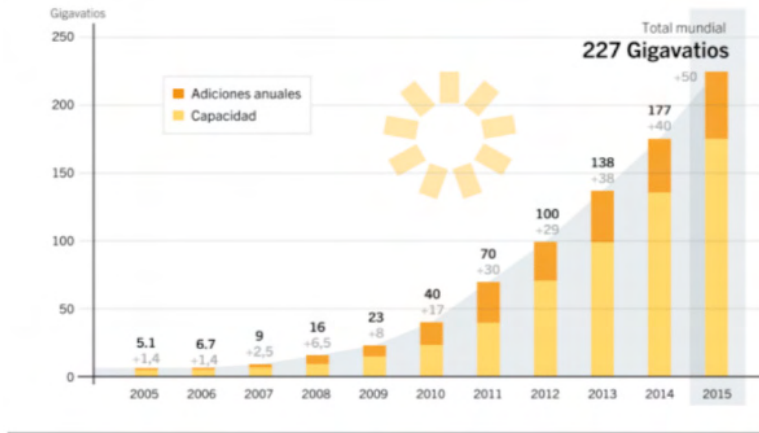


Figura 1. Capacidad y adiciones anuales de energía solar fotovoltaica, 2005-2015.

Fuente: (REN21, 2016)

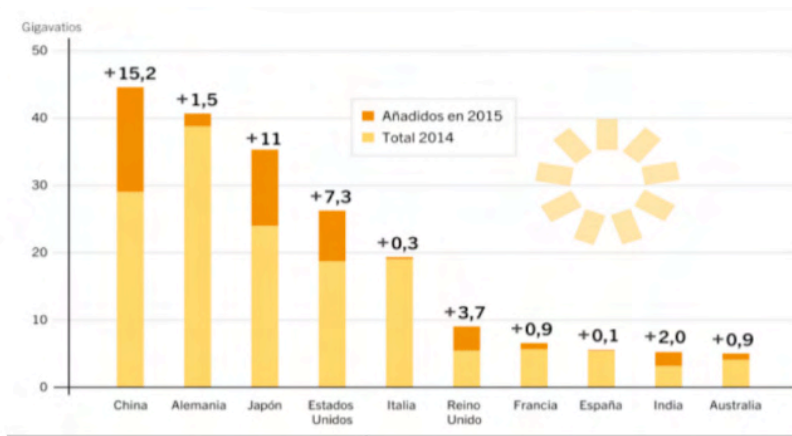


Figura 2. Capacidad y adiciones de energía solar fotovoltaica, diez países líderes, 2015.

Fuente: (REN21, 2016)

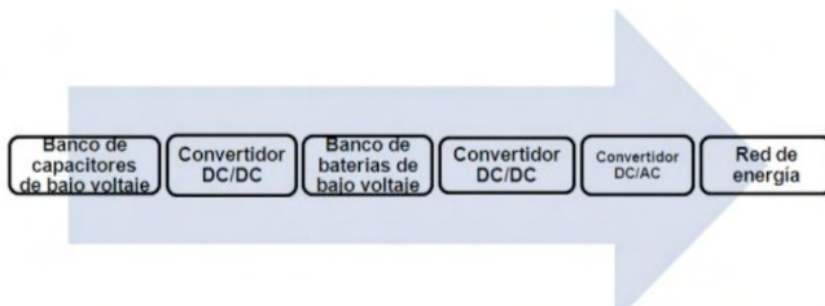


Figura 3. Sistema general de un generador de energía eléctrica fotovoltaico.

Fuente: (De la Cruz et al., 2014)

cuadrada con transistores IGBT conectados en configuración puente de 200 VA y frecuencia variable de 50 a 120 Hz en intervalos de 10Hz. El inversor utiliza una entrada de 24 V y provee una señal cuadrada de 115 V rms. El control de disparo de los transistores se hizo a través de una modulación PWM programado en un microcontrolador de Motorola MC68hc908jk3 (Sandoval, Cardozo, Cárdenas, Duarte, & Morales, 2006).

Zope et al. (2012), diseñaron y simularon en Simulink de MatLabMR un inversor monofásico de puente completo. Se realizó una modulación SPWM en un microcontrolador, con un índice de modulación de 0.6, las pruebas se hicieron con diferentes valores de carga obteniendo una máxima eficiencia de 80W (Zope, Bhangale, Sonare, & Suralkar, 2012).

Hanumanth et al. (2013), proponen un inversor monofásico para sistemas de energía renovables bajo el concepto de generación de energía distribuida, utilizando un algoritmo de control de corriente con lógica difusa y otro para generar un PWM con la plataforma de procesadores digitales de señales dSpace basado en el procesador DS1005, especialmente para el PWM se utilizó el DS5101. La frecuencia fundamental de salida del inversor fue de 50Hz y la frecuencia de conmutación de 10KHz. El inversor conectado tiene compensación de armónicos y genera 2 Kilovatios (Hanumanth, Rajassekhar, & Hari, 2013).

Usama y Bilal (2015), presentan un inversor monofásico controlado con una modulación ancho de pulso senoidal, la frecuencia de salida para el inversor fue de 5 a 50Hz, se simuló inicialmente en el software ProteusMR e implementando el algoritmo de SPWM en un microcontrolador para controlar un inversor con transistores IGBT. En sus conclusiones describen que se puede mejorar utilizando tecnologías emergentes como los FPGA y los

nuevos DSP, algoritmos genéticos y lógica difusa (Usama & Bilal, 2015)-.

También, se ha mencionado que la demanda de energía eléctrica crece en relación a la población y a la industrialización, esto a su vez implica mejores prácticas para el ahorro de energía eléctrica en cualquier punto, como puede ser en la generación, distribución o en el consumo de ésta.

Adicionalmente, debido al aumento del consumo de energía y los problemas ambientales como el cambio climático, residuos reactivos, lluvias ácidas y la contaminación atmosférica se ha optado por alternar la generación de energía tradicional con fuentes renovables o fuentes de energía alternativas, las cuales generan energía limpia, pero requieren también de dispositivos electrónicos para que esa energía sea aprovechada, de hecho, el crecimiento en la generación de las diferentes formas de energías renovables favorecen al crecimiento de dispositivos semiconductores, como lo muestra la información antes mencionada.

Con base en lo anterior, este trabajo de investigación tiene como objetivo diseñar un inversor monofásico de puente completo alimentado con paneles solares y controlado con un FPGA con la finalidad de obtener energía eléctrica para alimentar dispositivos de corriente alterna.

DESARROLLO

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Para el desarrollo del inversor monofásico se siguió la siguiente metodología:

- Investigación documental
- Obtención de parámetros del panel solar
- Propuesta del diseño a bloques
- Simulación y construcción de la fuente reductora y el inversor

- Pruebas y resultados
- Conclusiones

IMPLEMENTACIÓN

Se trabajó con base en el esquema mostrado en la Figura 4. La alimentación puede ser con fuente de corriente alterna con su rectificador correspondiente o con una celda solar, esta alimentación sirve de entrada para una fuente reductora que regula el voltaje de alimentación de corriente directa para el inversor monofásico de puente completo o incluso puede ser uno trifásico.

El panel solar usado para alimentar al inversor es el modelo ERDM 225P6 y tiene las siguientes características; es policristalino con 60 celdas (6*10), de dimensiones 1640 mm * 990mm, proporciona un voltaje en circuito abierto Voc 37.02 Voltios, voltaje óptimo Vmp 30 Voltios, corriente en corto circuito Isc de 8.25 Amp., corriente óptima Imp 7.5 Amp., potencia máxima Pmax 225 Vatios. Se colocaron dos en serie para duplicar el voltaje con la misma corriente. Las curvas características de corriente y potencia máxima contra el voltaje de los dos paneles en serie se pueden observar en la Figura 5. La corriente se muestra que es la misma de 8.25 en corto circuito, la potencia máxima de 450 vatios en 74 voltios en circuito abierto.

Para el diseño de los elementos de la fuente reductora o Buck se utilizaron las fórmulas de las Ecs. 1 y 2. Para la inductancia L y para el capacitor C respectivamente, se propusieron algunos parámetros; variación de corriente en el inductor de .3Amp., variación de voltaje en el capacitor de 100 mVoltios y una frecuencia de conmutación de 25KHz. Voltaje máximo y mínimo 60 y 30 Voltios respectivamente. Obteniendo un valor de inductancia de 2.3 mH, un capacitor de 15 uF, este último se ajustó a 22 uF.

$$L = \frac{V_a(V_s - V_a)}{fV_c\Delta I} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$C = \frac{\Delta I}{8f\Delta V_c} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde

L: Inductancia en Henry

C: Capacitancia en Farad

F: Frecuencia de conmutación

Vs: Voltaje máximo deseado en voltios

Va: Voltaje mínimo deseado en voltios

ΔI : Variación de corriente en el inductor

ΔV : Variación de voltaje en el capacitor

En la Figura 6, se presenta el sistema completo, el panel solar (dos paneles solares), la fuente Buck, y el inversor de puente completo; asimismo, la salida de la fuente reductora con una modulación de ancho de pulso del 100% se presenta en la Figura 7, la cual muestra la salida en 60 voltios que es la alimentación del panel solar.

En la Figura 8 se puede observar la salida del inversor y su espectro de frecuencia, la fundamental está en 60 Hz., la cual puede ser utilizada para alimentar sistemas de corriente alterna de 120 voltios.

En la Figura 9 se muestra el modelo de panel solar usado. Para la fuente Buck y para el inversor se utilizó el transistor Mosfet IRF640, y para dispararlo el IR2184 con las protecciones adecuadas sobre variaciones de corriente y voltaje di/dt y dv/dt respectivamente. Este circuito integrado tiene salida propia para acoplar la compuerta de un transistor y una salida complementaria para el otro. En la Figura 10 se muestra la fuente Buck y en la 11 el inversor de puente completo construidos.

Para la modulación ancho de pulso que controla a la fuente Buck y a los transistores del inversor se generó un algoritmo en lenguaje de descripción de Hardware (VHDL) implementado en la tarjeta Nexys 2 de Digilent que trae el FPGA Spartan 3E con la plataforma en Project Navigator de Xilinx.

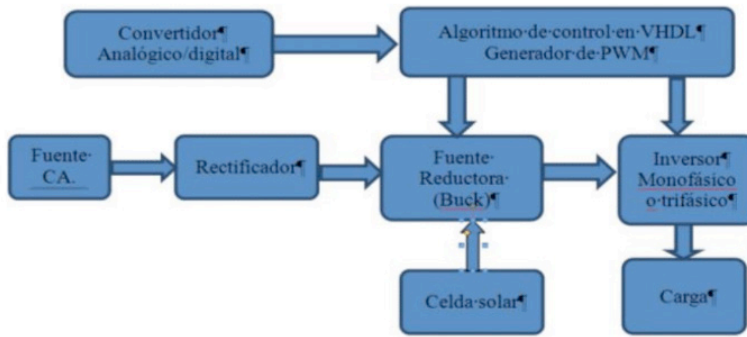


Figura 4. Diagrama a bloques del inversor.

Fuente: Propia

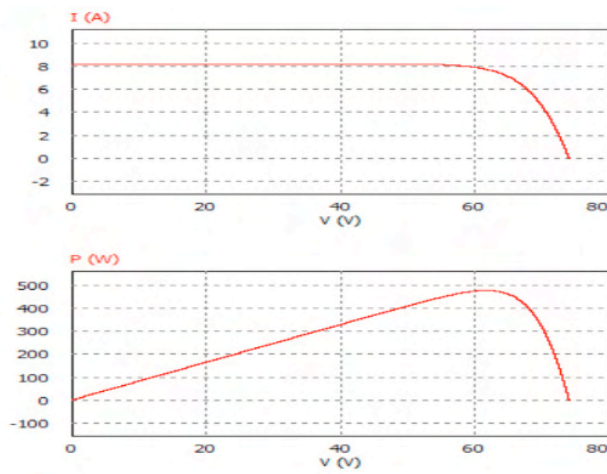


Figura 5. Gráficas de corriente máxima y potencia máxima de los dos paneles solares.

Fuente: Propia

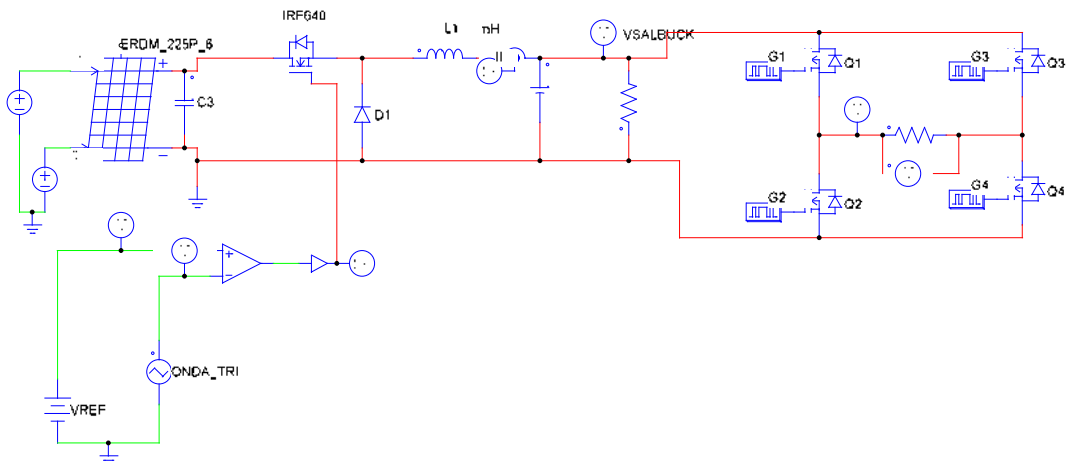


Figura 6. Circuito con alimentación de panel solar, fuente Buck e inversor de puente completo.

Fuente: Propia

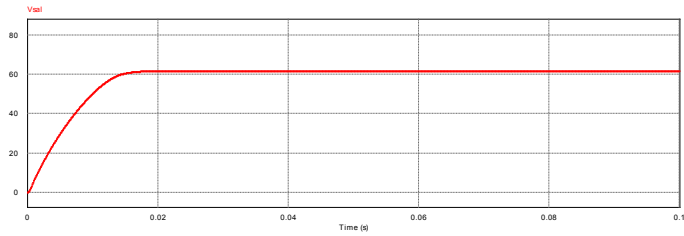


Figura 7. Voltaje de salida de la fuente Buck.

Fuente: Propia

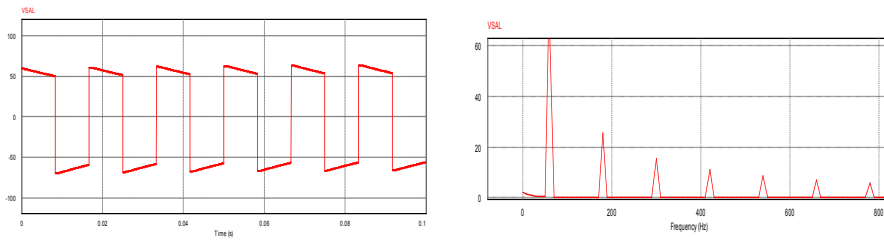


Figura 8. Salida de voltaje del inversor y su espectro de frecuencia.

Fuente: Propia

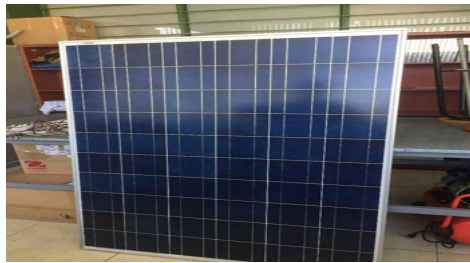


Figura 9. Panel ERDM225P6.

Fuente: Propia

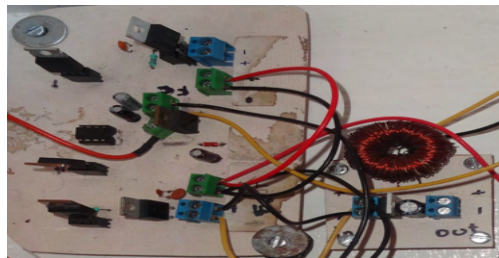


Figura 10. Fuente Buck.

Fuente: Propia

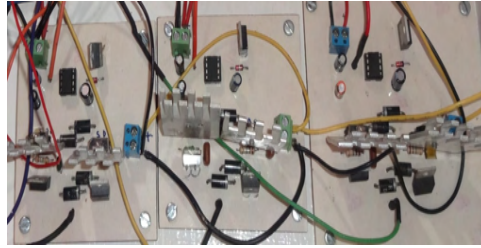


Figura 11. Inversor puente completo.

Fuente: Propia



Figura 12. Tiempo muerto de 440 nseg. entre transistores de la misma rama.

Fuente: Propia

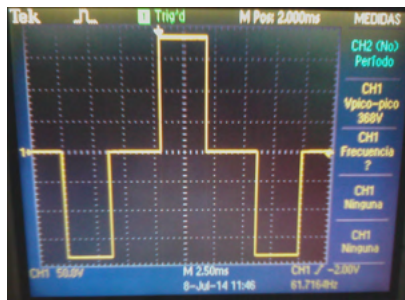


Figura 13. Salida del inversor monofásico.

Fuente: Propia

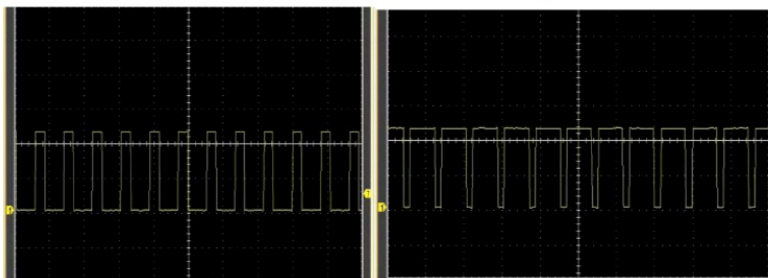


Figura 14. Modulación ancho de pulso a 25Khz.

Fuente: Propia

PRUEBAS Y RESULTADOS

Se realizó la prueba de cada una de las placas impresas, además de analizar sus funciones individuales para su posterior conexión. Se midió el tiempo muerto entre los transistores de la misma rama el cual fue de 440 nseg., como se muestra en la Figura 12.

El inversor diseñado no es uno de señal completamente sinusoidal, es de señal cuasi-cuadrada. Esto quiere decir que la forma de onda resultante es cuadrada o escalonada, pero cumple con la condición de ser alterna. Como se observa en la Figura 13.

El FPGA permitió generar la modulación de ancho de pulso para disparar los transistores del inversor y de la fuente Buck. En la Figura 14 se muestra la modulación ancho de pulso que se acopla al IR2184 para disparar los Mosfet IRF640.

CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un inversor monofásico de puente completo, cuyo voltaje máximo de salida es de 120 voltios de corriente alterna y es controlador por una fuente reductora o Buck.

Se utilizaron dos paneles solares para alimentar a la fuente Buck, y éste regulará el voltaje del inversor de puente completo.

El disparar a los transistores con el IR2184, evita que los dos transistores de una rama se disparen al mismo tiempo.

El tiempo muerto entre dos transistores de una misma rama es de 440 nseg.

Aunque el proyecto está avanzado posteriormente se pretende conectar en lugar de baterías supercapacitores.

REFERENCIAS

- Campos, M. A. (2015). *La eficiencia de los motores* (Informe especial URE ed., Vol. 14). Campeche, México: Universidad de Campeche.
- De la Cruz, C., Lema, M. B., del Toro García, X., & Roncero, S., Pedro. (2014). *Energy storage integration with renewable energies: The case of concentration photovoltaic systems Environment, Energy and Climate Change II* (pp. 73-94): Springer.
- Gasca, C. A. E. (2013). *Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia*. *Revista Mexicana de Física*, 59(2), 75-84.
- Guerra, A. O. M., & Reyes, D. M. (2008). *Inversor trifásico por modulación PWM senoidal para prueba de equipos trifásicos*. (Ingeniería), Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca.
- Hanumanth, R. R., Rajassekhar, P., & Hari, B. M. (2013). *Improved fuzzy control strategy for power quality in distributed generation's single phase inverters*. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 6(2), 38-49.
- Melkhilev, S., & Rahim, N. A. (2002). *Xilinx FPGA based three-phase PWM inverter and its application for utility connected system*. *Proceeding of IEEE TENCON*, 2079-2082.
- Rafeeq, A., Rehman-ur-Atta, & Bitai, M. (2012). *Pure sinusoidal PWM signal generation technique for three phase voltage source inverter with simulation of PWM inverter*.
- Raugei, M. (2010). *La electricidad fotovoltaica (PV) y su papel en el presupuesto energético actual y futuro*. *Ecología política*(39), 65-72.
- REN21 (Ed.). (2016). *Energías renovables 2016, reporte de situación mundial*.
- Sandoval, J. L., Cardozo, W. A. S., Cárdenas, V. M. C., Duarte, J. E., & Morales, F. H. F. (2006). *Desarrollo de un inversor monofásico didáctico*. *Revista Tecnura*, 9(18), 36-46.

Santamarta, J. (2006). *Las energías renovables son el futuro*: World Watch.

Usama, H. S., & Bilal, A. H. (2015). *Speed and frequency control of AC induction motor using variable frequency drive*. Paper presented at the Student Research paper Conference.

Zope, P. H., Bhangale, P. G., Sonare, P., & Suralkar, S. R. (2012). *Design and Implementation of carrier based Sinusoidal PWM Inverter*. *International Journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation engineering*, 1(4), 230-236.