

CONVERTIDOR DC-AC DE ALTA EFICIENCIA BASADO EN EL MODULADOR EG8010 PARA IMPLEMENTAR EN SISTEMAS ENERGÉTICOS ALTERNATIVOS

HIGH-EFFICIENCY DC-AC CONVERTER BASED ON EG8010 MODULATOR TO IMPLEMENT IN ALTERNATIVE ENERGY SYSTEMS



¹Jairo Gutiérrez

²Luz Flórez

³Daniel Serrano

^{1,2,3}Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería,
Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Bogotá, Colombia.

Recibido: 10/10/2018 • Aprobado: 06/11/2018

RESUMEN

Este documento presenta los resultados del diseño y la implementación de un convertidor DC-AC con salida sinusoidal de baja distorsión armónica y pérdida de potencia eléctrica por conmutación. La investigación se encaminó al logro de altos niveles de rendimiento a bajo costo, creando un equipo competitivo en el mercado. El convertidor DC-AC es el procesador de la energía captada; es así como las mejoras en la eficiencia apuntan a elevar la viabilidad y sostenibilidad de sistemas energéticos alternativos por la disminución en costos de producción e impactar positivamente sobre la crisis energética - ambiental de la actualidad, debido al agotamiento de los combustibles fósiles y a las emisiones descontroladas de gases producidos por los sistemas tradicionales de energía eléctrica.

Palabras clave: armónicos, eficiencia, energía, inversor, SPWM, potencia.

ABSTRACT

This document shows a design and implementation of a DC-AC converter with sinusoidal output of low harmonic distortion and loss of electrical power by switching. The main goal of this research was achieving high levels of performance at low cost, being a competitive product on the market. The DC-AC converter is the captured-energy processor. That is why the efficiency improvements aims to increase the viability and sustainability of alternative energy systems, because of decreasing production costs and positively impacting on actual energetic and environmental crisis, due to depletion of fossil fuels and uncontrolled greenhouse gas emissions produced by traditional systems of energy generation.

Keywords: efficiency, energy, harmonic, inverter, power. spwm.

¹Jairol.gutierrez@unad.edu.co, orcid.org/0000-0002-3369-28-03

²luz.florez@unad.edu.co, orcid.org/0000-0002-4460-2316

³Daniel.serrano@unad.edu.co, orcid.org/0000-0001-9438-3361

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se han propuesto y desarrollado sistemas alternativos para la generación de energía eléctrica, por el agotamiento, dependencia y constante incremento en el costo de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) (Arango & Arroyave 2016; Valles, Acosta & Pérez 2014). El uso de estos combustibles, por ejemplo en termoeléctricas, provoca un impacto negativo sobre el medio ambiente debido a los gases como el dióxido de azufre (SO₂) y el dióxido de carbono (CO₂) originados en las combustiones (Oswald 2017 & Aguilera 2016).

La emisión de estos gases de manera descontrolada ha provocado daños medioambientales como la lluvia ácida y el calentamiento global (Maldonado & Torres 2011). Los sistemas energéticos alternativos basados en energías renovables como la solar, eólica, mareomotriz, biomasa, entre otras son la respuesta a la crisis energética que afecta al planeta. Destacando que la energía solar y eólica son las más limpias en su uso porque no contaminan el medio ambiente.

Los sistemas de producción de energía basados en energías renovables son inagotables, no emiten gases de efecto invernadero ni gases contaminantes (Hidalgo 2015). Pero no todo es fácil con la implementación de estos sistemas, pues se presenta siempre el reto de obtener la mayor eficiencia en la captación, procesamiento y consumo de la electricidad; lo anterior ha despertado el interés de gobiernos, empresas y en específico de ingenieros e investigadores.

Al hablar de eficiencia en sistemas energéticos alternativos es inevitable no pensar en el módulo principal, el "Convertidor DC-AC". Estos son dispositivos que permiten transformar la energía de corriente directa (DC) captada, por ejemplo, de paneles solares o la entrega por circuitos rectificadores de aerogeneradores en corriente alterna (AC) (Conde 2013), que es la forma de energía útil para ser transportada y utilizada en la alimentación de la mayoría de equipos eléctricos y electrónicos tanto en el hogar como en la industria.

El precio de los convertidores, en el mercado actual, depende de factores como la eficiencia los algoritmos y materiales usados en su fabricación y de la calidad de la energía procesada, por lo general los más económicos no entregan el tipo de señal adecuada para el buen funcionamiento de electrodomésticos y equipos industriales, sino un tipo de señal con mucha distorsión armónica que deteriora la vida útil de estos.

Los convertidores más económicos son los de onda cuadrada y onda modificada, sin embargo, en términos de eficiencia lo cual se traduce en realizar la conversión de energía DC – AC con nulas o mínimas pérdidas, la respuesta de estos inversores es bastante baja debido a la alta distorsión armónica que los caracteriza. Es necesario mencionar que los armónicos distorsionan la forma de onda de salida, elevan la temperatura de los dispositivos semiconductores y generan pérdidas de potencia en la conmutación (Petropol & Petropol 2016). Las altas frecuencias de los armónicos en señales distorsionadas producen interferencias electromagnéticas que afectan negativamente el funcionamiento de los sistemas de telecomunicaciones, en transformadores calientan el bobinado, aumentan la impedancia de fuente y producen pérdidas debidas a las corrientes de Foucault. La circulación de corrientes armónicas por los devanados de motores provoca calentamientos en los mismos y daños en el aislamiento térmico de sus arrollamientos (Magallán, De Angelo & García 2009).

Es una premisa entonces, afirmar que la presencia elevada de distorsión armónica en la señal de salida de un convertidor DC – AC, es el principal motivo que lo hace ineficiente por estar alejado del criterio ideal de funcionamiento, que es transformar una entrada DC en una salida AC pura sin pérdidas de energía en el proceso, y es lo que justifica que los inversores más costosos sean los de onda sinusoidal pura, pues estos entregan mayor eficiencia en el manejo de la potencia y bajos niveles de distorsión armónica, alargando la vida útil de las máquinas eléctricas mayormente utilizadas en la industria.

Por todo lo anterior, El objetivo del proyecto fue el diseño e implementación de un convertidor DC-AC de alta eficiencia y bajo costo empleando una técnica moderna de modulación y transistores de potencia Mosfet de alta velocidad para lograr mínimas pérdidas de potencia eléctrica por conmutación y bajos niveles de distorsión armónica en la onda sinusoidal de salida (Haider et al. 2012).

2. DESARROLLO DE CONTENIDO

Los convertidores DC-AC se llaman inversores. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada DC a un voltaje simétrico de salida AC, con la magnitud y frecuencias deseadas (Aguilar, Vázquez & Gordillo 2017). En la siguiente Fig. 1 se observa el diagrama de bloques de un inversor modulado.

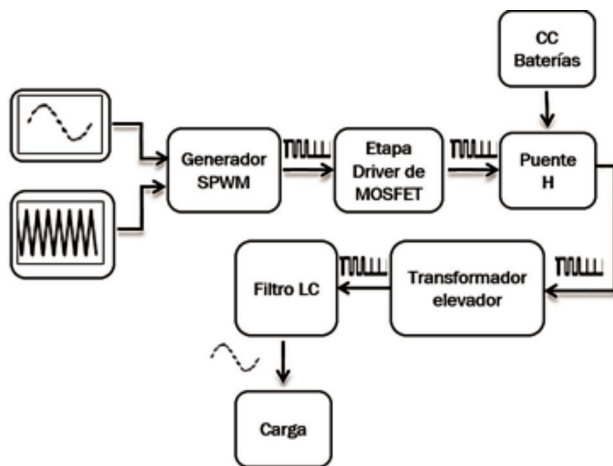


Fig. 1 Diagrama de bloques de un convertidor DC-AC.
Fuente: autores

El bloque principal de un inversor modulado es el generador Spwm. En este se compara una onda sinusoidal de 60Hz (señal de referencia) con una forma de onda triangular de frecuencia más alta (portadora), de tal manera que el ciclo de trabajo de la señal resultante, cambie con respecto a la variación de la amplitud de la señal de referencia conservando la frecuencia de la portadora. A este tipo de señal se le conoce como modulación de ancho de pulso sinusoidal (Spwm). En la práctica se utilizan circuitos analógicos o digitales como lo son amplificadores operacionales y microcontroladores

para lograr tal fin. La señal Spwm en primera instancia es de baja intensidad y es necesario amplificarla, por ello se utiliza la etapa driver cuya función es adecuar los niveles de tensión y corriente necesarios para controlar la etapa de potencia, siendo en esta última donde se lleva a cabo la transformación de la energía de corriente directa DC almacenada en bancos de baterías o captada directamente por módulos fotovoltaicos a corriente alterna AC, usando una topología de puente H con semiconductores de estado sólido (Mosfet o Igbt) especiales para manipular elevados niveles de tensión o corriente, presentar mínima resistencia en estado ON, elevada en estado OFF, soporte de alta velocidad de suicheo y temperaturas en el que el control de la conmutación se realiza gracias a la señal modulada (Rashid 2004).

La energía de salida de la etapa de potencia no es sinusoidal puesto que contiene un elevado nivel de distorsión armónica, sin embargo, esta señal ya es útil para alimentar el transformador en el cual se puede elevar el nivel de la tensión de entrada a una de salida entre 120 o 220 VAC rms. Finalmente, es necesario extraer la onda sinusoidal que fue modulada y eliminar toda la distorsión armónica generada en el proceso de conversión y para ello se utiliza un filtro pasabaja LC resonante a una frecuencia calculada para mantener la señal de referencia y suprimir cualquier contenido de alta frecuencia.

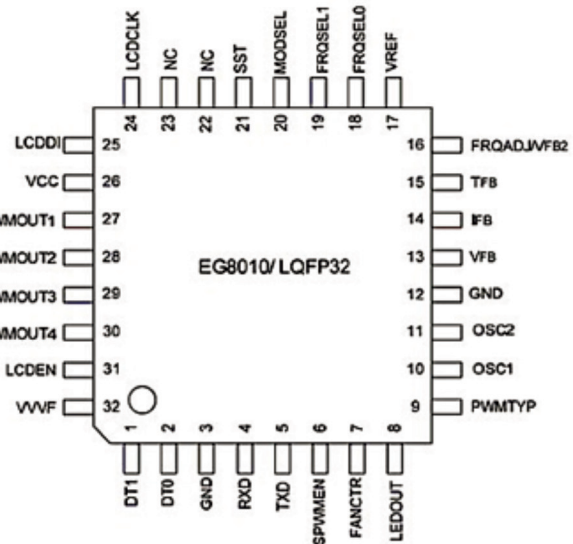


Fig. 2 Distribución de pines del IC EG8010 (Petropol, G & Petropol, 2016)

3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Al considerar el diseño de un convertidor eficiente se debe tener como referente en la investigación sus características ideales y en este caso en particular, se define un inversor ideal como aquel que realiza la conversión de energía DC-AC sin pérdidas de potencia entregando a la salida una onda seno pura (sin distorsión armónica). Sin embargo, en la práctica no existe el convertidor ideal y siempre se presentarán pérdidas al realizar la conversión de energía (Fazal et al. 2017). Las investigaciones en el área de los convertidores en general, se encaminan al logro de altos niveles de eficiencia siendo lo anterior el propósito de esta investigación.

Se presentan a continuación las características técnicas de cada bloque que conforma el sistema en contraste con las propiedades ideales.

3.1. Generador Spwm

La forma de onda de salida de un inversor ideal debe ser sinusoidal. Hoy en día con la disponibilidad de los dispositivos semiconductores de potencia de alta velocidad, se pueden minimizar los contenidos de armónicas y regular el voltaje de salida mediante técnicas de conmutación (Muñoz et al. 2016). La técnica Spwm hace variar el ancho de cada pulso en proporción con la amplitud de una onda sinusoidal

evaluada en el centro del mismo punto. El generador Spwm define la forma, calidad, y regulación de la onda de salida. Como generador Spwm se utilizó el modulador digital EG8010, el cual es un circuito integrado de propósito específico que se encuentra en el mercado a bajo costo brindando soporte para los siguientes ajustes:

- Tipo de modulación
- Tiempo muerto
- Frecuencia fundamental (onda sinusoidal)

El EG8010 cuenta con una frecuencia fija de conmutación de 23.5 KHz, acción de regulación de tensión y corriente de salida, protección contra alta temperatura, alto y bajo voltaje y contra cortocircuito (López et al. 2007).

Luego del estudio de los tipos de modulación Spwm, se determinó que la modulación unipolar era la adecuada para obtener altos niveles de eficiencia en el convertidor, en contraste con la modulación bipolar que contiene más componentes de energía no deseada distribuidas en el espectro. Como se puede observar en Fig. 3 no hay técnica de modulación perfecta y siempre se presentará algún porcentaje de distorsión armónica, sin embargo, este puede llegar a ser casi nulo usando la técnica de modulación seleccionada.

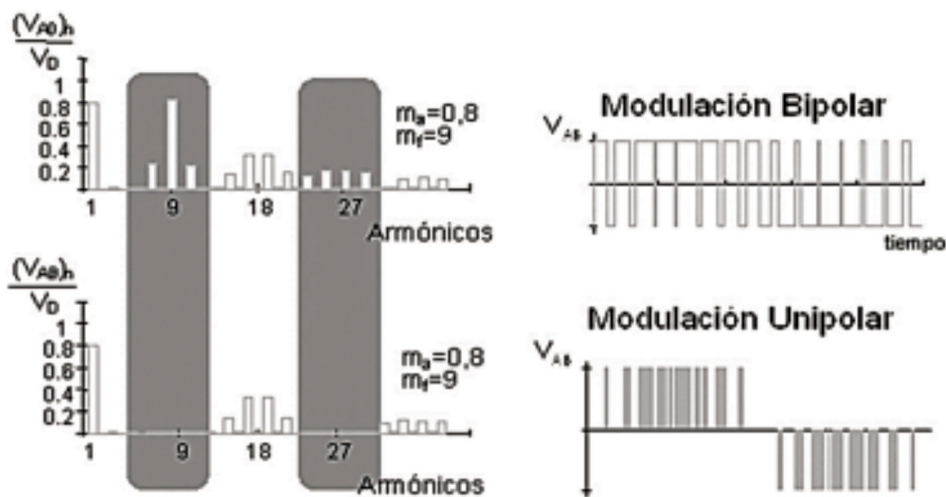


Fig. 3 Contraste modulación Spwm bipolar y unipolar (Díaz 2015)

Con la técnica de conmutación unipolar el contenido de componentes armónicas es óptimo bajo dos condiciones:

- Que el índice de modulación de frecuencia (mf) sea un valor entero par.
- La modulación sea sinusoidal sincrónica (Sun et al. 2016).

Ajustando el diseño a las anteriores condiciones y con un índice de modulación de amplitud entre 0,5 y 0,8 se experimentó el logro de bajos niveles en la carga de distorsión armónica total DTH normalizada a un 3%.

En Fig. 4 se puede apreciar el resultado de la simulación que fue realizada utilizando Proteus con el cual se emulo un generador SPWM conformado por 2 ondas sinusoidales desfasadas 180° y una onda triangular las cuales fueron comparadas con un circuito amplificador operacional. Se realizaron pruebas utilizando los ajustes mencionados donde la corriente se aproxima a una onda sinusoidal aun cuando no se ha filtrado.

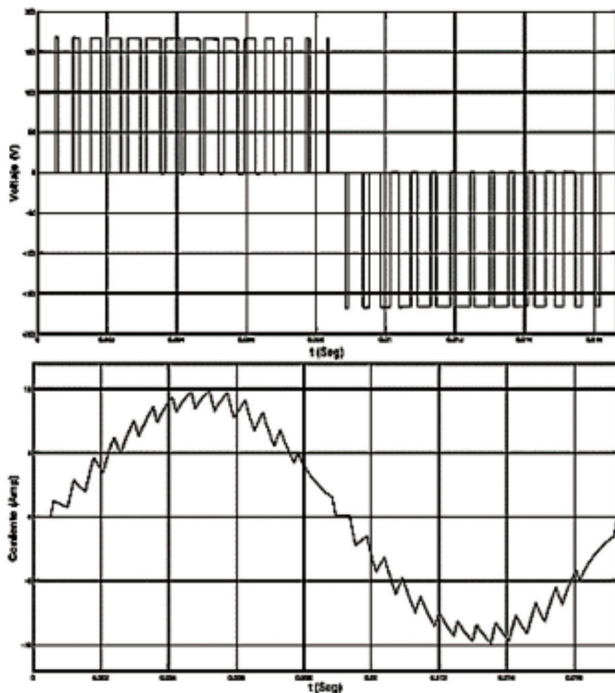


Fig. 4 Formas de ondas de tensión y corriente modulación unipolar

Fuente: autores

3.2. Etapa driver

Para la correcta activación y desactivación de un semiconductor de potencia, es necesario diseñar un circuito capaz de garantizar los niveles adecuados de tensión y corriente de disparo en periodos de tiempo del orden de los microsegundos, dicha exigencia la satisface el circuito integrado driver IR2110, de la compañía International Rectifier (IR). Las entradas lógicas del IR2110 son compatibles con señales Cmos o Lsttl (Ballester & Piqué 2001) y cuenta con fuente flotante necesaria para polarizar los semiconductores de potencia del lado alto en la topología H, a tensiones de hasta 500 V y tensiones de disparo entre 10 y 20V.

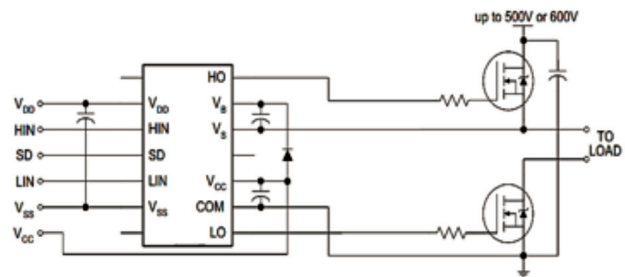


Fig. 5 Conexión típica del driver IR2110

Fuente: ("IR2110 Datasheets"2005)

3.3. Etapa de Potencia

Para la etapa de potencia se utilizó una topología de puente completo H con el Mosfet de última generación Irfp2907 capaz de soportar corrientes de hasta $IDSS = 209A$ y tensión máxima $VDS = 75V$ presentando una resistencia en el canal de tan solo $4,5 m\Omega$ en estado de conducción.

La topología puente completo emplea cuatro interruptores como se observa en la Fig. 6. La dinámica de disparo se ha dispuesto de la siguiente manera, la rama izquierda del puente conmutará a una frecuencia de 60Hz (S1 y S2), es decir, la frecuencia de la señal moduladora; mientras que la rama de la parte derecha (S3 y S4) lo hará a una frecuencia de 23.5 KHz que es la frecuencia de la portadora y así obtener un balance que propenda a la eficiencia considerando la premisa «A mayor frecuencia de conmutación mayores pérdidas pero más pequeño y económico es el filtro para eliminar los armónicos».

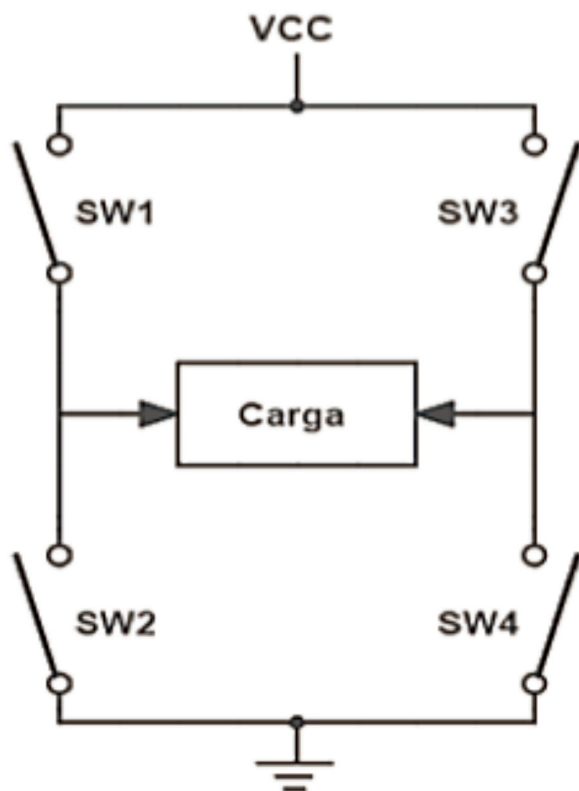


Fig. 6 Topología de puente completo H
Fuente: autores

3.4. Transformador elevador

Un transformador relaciona dos circuitos con tensiones diferentes permitiendo aislamiento galvánico y la transmisión de energía a una potencia constante.

El principio ideal de funcionamiento de un transformador es la inducción de voltaje entre dos bobinados acoplados magnéticamente sin que se presenten pérdidas, sin embargo, ninguna máquina eléctrica es ideal y siempre se presentarán pérdidas al realizar un trabajo. En esta etapa se estudió el rendimiento de los tipos de transformadores y se encontró que el transformador toroidal era el componente adecuado para este sistema. En este transformador el núcleo magnético tiene forma de disco, lo que favorece el rendimiento del circuito magnético al evitar el salto de los electrones de lámina en lámina, produciendo así bajo nivel de ruido por magneto-fricción y de calentamiento debido a las corrientes de Foucault (Xianjun, Lingshun & Shutuan 2012). Esta etapa fue de mucha importancia

en la investigación debido a que un transformador mal diseñado ocasiona grandes pérdidas y a su vez, un inversor poco eficiente. Es posible, entonces pensar en evitar usar un transformador, sin embargo, la ventaja que ofrece su uso es la robustez que brinda frente a cargas pesadas elevando así la vida útil de los componentes del sistema.

El transformador diseñado e implementado contó con las siguientes características:

- Potencia pico 1.5KW
- Potencia nominal 1KW
- Voltaje primario: $48\text{VDC}/1.414 = 34\text{VAC}$
- Voltajes secundarios: 34VAC y 120 VAC
- Medidas del núcleo (diámetro externo 17.2cm, diámetro interno 8cm, altura 6.5cm y área 30cm²)
- Corriente de saturación del núcleo 80A

3.5. Filtro LC

La aplicación de un filtro responde a la atenuación de armónicos para obtener una tensión muy cercana a la sinusoidal pura (Xianjun, Lingshun, & Shutuan 2005).

Finalmente, esta etapa filtra los pulsos de tensión y corriente para obtener como salida una onda sinusoidal pura apta para alimentar motores, electrodomésticos, equipos biomédicos e industriales, entre otros. Un dato importante para diseñar un filtro pasa-bajas LC eficiente Fig.7, es que la reactancia inductiva del filtro a una frecuencia de 60 Hz sea muy baja y a la vez sea muy alta al valor de la frecuencia de la portadora de 23.5 KHz. Por otro lado, lo contrario debe suceder en el capacitor, en él debe existir una alta reactancia capacitiva a 60 Hz para que no se vaya a tierra la señal sinusoidal y con mínimas pérdidas alimente la carga, pero a la vez, presente una baja reactancia capacitiva al valor de la portadora. También se debe tener en cuenta que la frecuencia de corte del filtro debe ser 10 veces mayor a la frecuencia de 60Hz y 10 veces menor a la de la portadora para luego promediar y obtener el valor óptimo de f_c para lograr que la curva de atenuación del filtro esté lo suficientemente lejos de la frecuencia fundamental para evitar pérdidas.

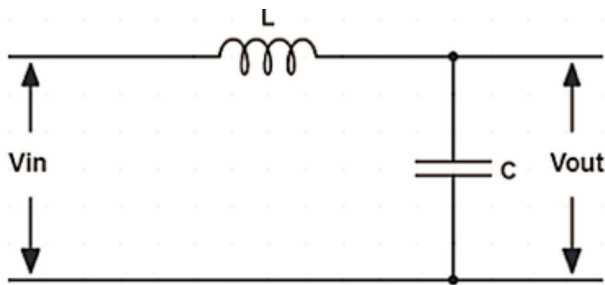


Fig. 7 Filtro LC pasa-bajas
Fuente: autores

El diseño de la figura 7 cuenta con las siguientes especificaciones:

- $L = 1.8\text{mH}$
- $X_L = 700\Omega$ a 60Hz
- $C = 6.3\ \mu\text{F}$
- $X_C = 1.1\Omega$ a 23.5KHz
- $f_c = 1475\text{Hz}$

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Luego del diseño y la implementación del convertidor DC-AC se procedió a realizar pruebas y verificaciones del funcionamiento en contraste con los objetivos de la investigación. Se realizaron pruebas utilizando un banco de baterías de 48VDC alimentando a través del convertidor, una carga resistiva de 70W con el objetivo de conocer la eficiencia real. Para ello se midió el flujo de corriente saliente desde las baterías (1.604A), para conocer de este modo la potencia de entrada (77W), la eficiencia que es la potencia de salida sobre la de entrada fue del 90.9%, también se calculó el ángulo de desfase tensión-corriente (0.193°) y el factor de potencia (0.999) (Salvatierra et al. 2007).

Las pruebas con carga inductiva usando un taladro de 600W demostraron la efectividad del filtro LC manteniendo la forma de onda sinusoidal pese a la gran inyección de armónicos por este tipo de carga. Finalmente, se realizaron pruebas con cargas no lineales (computadoras, televisores, entre otras), las cuales fueron energizadas satisfactoriamente por el convertidor durante 2 horas mostrando así la consistencia del sistema. En las figuras 8 y 9 se puede apreciar la onda de salida sinusoidal medida en el osciloscopio y el aspecto físico del convertidor.

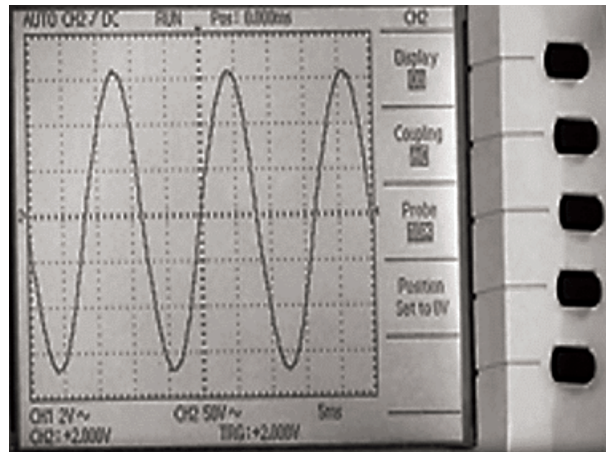


Fig. 8 Salida Sinusoidal del convertidor DC-AC
Fuente: autores



Fig. 9 Aspecto físico del Convertidor DC-AC
Fuente: autores

El convertidor cuenta además con mecanismos de protección a fallos, entre ellos un arrancador suave para protección de sus componentes y un LED color rojo para el diagnóstico Fig. 10.

NORMAL	●●●●●●●●●●●●●●●●
SOBRE CORRIENTE	●○●○●○●○●○●○●○●○
SOBRE VOLTAJE	●○●○●○●○●○●○●○●○
POR DEBAJO DEL VOLTAJE	●○●○●○●○●○●○●○●○
EXCESO DE TEMPERATURA	●○●○●○●○●○●○●○●○

Fig. 10 Secuencia de parpadeos LED para diagnósticos.
Fuente: autores

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El equipo convertidor DC-AC diseñado, cuenta con características como: onda de salida seno pura, voltaje nominal de salida de 120VAC y una variación menor al 5%, frecuencia de 60 Hz y una variación de $\pm 1\%$, voltaje máximo de entrada 48 VDC, rendimiento sobre el 90%, distorsión armónica total menor al 3% y potencia nominal de 1.5KW. Por sus características el convertidor se puede usar en sistemas energéticos alternativos y fuentes de alimentación ininterrumpida ofreciendo alta confiabilidad y robustez, haciéndolo competitivo en el mercado actual (Gallego, Cano & Muñoz 2015).

Como trabajos futuros, se puede implementar una etapa de potencia con mayor número de Mosfet para incrementar la potencia nominal soportada a 3KW e implementar aislamiento fotoeléctrico con el objetivo de proteger la etapa de control contra sobrecargas. Otra mejora a futuro es el uso de circuitos Snubbers para corregir los picos transitorios dados en la conmutación y evitar pérdidas por el calor que ellos producen en la etapa de potencia.

En síntesis, este proyecto contribuye a mitigar la contaminación ambiental, generar fuentes de alimentación seguras que alarguen la vida útil de equipos eléctricos y electrónicos y disminuir los altos costos de energía eléctrica mediante la implementación de sistemas energéticos alternativos eficientes (Gutiérrez, Castillo & Ramírez, 2016).

REFERENCIAS

Aguilar, C, Vazquez, A & Gordillo, J 2017, 'Integrated DC - AC converter as power conditioner for fuel cell based system', Ieee Latin America Transactions, 14 (5), 2107-2112.

Aguilera, J (2016), Ambiente y pobreza: una mirada interdisciplinaria, Eucasa, Argentina.

Arango, M & Arroyave, S 2016, 'Análisis de combustibles fósiles en el mercado de generación de energía eléctrica en Colombia: un contraste entre modelos de volatilidad', Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa, 22, 190-215.

Ballester, E & Piqué, R 2001, 'Convertidores continua-alterna', en E Ballester & R Piqué, Electrónica de potencia. Principios fundamentales y estructuras básicas. Marcombo, Barcelona.

Conde, L 2013, 'Pronóstico de generación eléctrica en sistemas fotovoltaicos conectados a la red', Revista Técnica de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A, 10, 39-48.

Díaz, J 2015. Inversores PWM [en línea], Universidad de Oviedo, España, consultado, <http://ieee-pels-ies.es/Pels/Pdf/Leccion%20Inversores%20Juan%20Diaz.pdf>

EGmicro Corp 2014, EG8010 Datasheets, EGmicro Corp, China.

Fazal, A, Cha, H, Khan, A & Kim, H 2017, 'A Highly reliable and efficient differential type buck-boost DC-AC converter', 2017 Ieee 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (Ifeec 2017 - Ecce Asia), Ieee Conference Publications, Taiwan, Kaohsiung, pp. 1781-1796.

Gallego, J, Cano J & Muñoz N 2015, 'Deducción de Pérdidas de Potencia por Conducción en Inversores Modulación Senoidal de Ancho de Pulso, Spwm', Información Tecnológica, 26 (3), 111-1225.

Gutiérrez, J, Castillo R & Ramírez M 2016, 'Diseño e implementación de un inversor SPWM con ondas de salida seno pura de alta eficiencia', Revista Publicaciones e Investigación, 10.

Haider, R, Alam, R, Binte, N & Salim., K 2012, 'Design and construction of single phase pure sine wave inverter for photovoltaic application', 2012 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (Iciev), Ieee Conference Publications, Bangladesh, Dhaka, pp. 190-194.

Hidalgo, E 2015, 'Las energías limpias comienzan a minar el imperio del petróleo', Debates Iesa, 20, 67-69.

International Rectifier 2005, IR2110 Datasheets, International Rectifier, California.

López, D, Camacho, G, Díaz, J & Gaviria, C 2007, 'Modulación PWM aplicada a inversores trifásicos dentro del esquema de accionamientos eléctricos AC', pp.1-24, consultado: http://www.unicauca.edu.co/ai/publicaciones/ISAShow_Diaz.pdf

Magallán, G, De Angelo, C & García, G 2009, 'eliminación de interferencia armónica para la detección de fallas en motores eléctrico', Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 6, 89-97.

Maldonado, M & Torres, J 2011, 'Evaluación del plan de manejo ambiental para una planta de producción de biodiesel', Revista Publicaciones e Investigación, 5, 59- 70.

Muñoz, N, Cano, J, Cano, B & López, J 2016, 'Control de un convertidor elevador de voltaje AC/DC utilizando balance de potencias', Información Tecnológica, 27(2), 3-4.

Oswald, U 2017, 'Seguridad, disponibilidad y sustentabilidad energética en México', Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales, 62, 155-195.

- Petropol, G & Petropol, I 2016, 'Study of the harmonics of current and voltage for a synchronous generator in the context of railway constraints', International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (Speedam), Ieee, Italia, Anacapri, pp. 1149-1154.
- Rashid, M 2004, 'Inversores modulados por ancho de pulso', en M Rashid, *Electrónica de Potencia*, Pearson Educación, Ciudad de México.
- Salvatierra, B, Coyago, K, Chacón D & Inga, J 2017, 'Inverter resonant control by modified SPWM and trapezoidal modulation for induction cooking', 2016 Ieee International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (Ropec 2016), Ieeel, Ixtapa, México, pp. 1-6.
- Sun, F, Hu, C, Li, S, Li, J & Hu, X 2016, 'Design and experiment on driving power supply for drip irrigation piezoelectric pump', Paiguan Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 34(9), 761-766.
- Valles, A, Acosta, L & Pérez, A 2014, 'Evaluación energética de los generadores de vapor F1-2 y BH-109 de una refinería cubana de petróleo', *Revista Publicaciones e Investigación, UNAD*, pp. 8, 89-96.
- Xianjun, S, Lingshun, I & Shutuan, H 2012, 'Research for digital DC PWM controlling system', 2012 International Conference on Future Energy, Environment, and Materials, *Energy Procedia*, Hong Kong, vol. 16, pp. 1547-155.
- Xianjun, S, Lingshun I & Shutuan, H 2005, *Redes Eléctricas de Kirchoff con 400 problemas resueltos*, Revides, Salamanca.

