



Modulador por anchura de pulso sinusoidal SPWM para un inversor monofásico de 60Hz de bajo costo

SPWM sine pulse width modulator for a low cost 60Hz single phase inverter

Modulador de largura de pulso senoidal SPWM para um inversor monofásico de 60 Hz de baixo custo

Wohler Gonzales-Saenz ^I

wohler.gonzales@unh.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0003-0728-9479>

Richard Corasma-Quispe ^{II}

richicq@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4247-5018>

Correspondencia: wohler.gonzales@unh.edu.pe

Ciencias técnicas y aplicadas

Artículo de revisión

***Recibido:** 16 de marzo de 2021 ***Aceptado:** 25 de abril de 2021 * **Publicado:** 05 de mayo de 2021

- I. Universidad Nacional de Huancavelica, Investigador Independiente, Perú.
- II. Universidad Nacional de Huancavelica, Investigador Independiente, Perú.

Resumen

El inversor monofásico es ampliamente utilizado en la conversión DC/AC de fuentes de energía de corriente continua en alterna en aplicaciones como los sistemas fotovoltaicos aislados; su conocimiento y comprensión es muy importante en la formación técnica y profesional del estudiantado en ingeniería electrónica, eléctrica o afines. Por ello, en este trabajo se ha desarrollado un modulador por anchura de pulso sinusoidal (SPWM) para un inversor monofásico, con el propósito de reproducir por etapas el proceso de conversión DC/AC sinusoidal en favor del estudiantado, ya que comúnmente la enseñanza de la conversión DC/AC están limitadas a los inversores de onda cuadrada debido a que los inversores de onda pura (sinusoidal) son costosos y vienen en equipos terminados o cajas negras que imposibilitan a los estudiantes observar las etapas del proceso, limitándolos solo a ver las entradas y salidas del sistema. En tal sentido, el desarrollo del modulador SPWM ha contemplado tres etapas: La primera, el desarrollo del conformador de pulsos del modulador SPWM para el control del inversor monofásico, la segunda, corresponde al acoplo del modulador SPWM con el inversor, finalmente, el filtrado de la señal de salida del inversor monofásico modulado con SPWM. El experimento, evidencia el proceso de conversión DC/AC sinusoidal utilizando un Atmega 328P, L298N, batería (6V) y filtro RC, la frecuencia de la sinusoide obtenida del inversor es 60 Hz con una distorsión armónica total (THD) del 8.98% que es inferior al 47.30% de THD de la onda cuadrada del inversor monofásico sin modulador SPWM.

Palabras clave: Convertidores electrónicos; Convertidores DC/AC; modulación SPWM; inversor monofásico conmutado.

Abstract

The single-phase inverter is widely used in the DC/AC conversion of direct current to alternating current energy sources in applications such as isolated photovoltaic systems; Their knowledge and understanding is very important in the technical and professional training of students in electronic, electrical or related engineering. For this reason, in this work a sinusoidal pulse width modulator (SPWM) has been developed for a single-phase inverter, with the purpose of reproducing the sinusoidal DC/AC conversion process in stages in favor of the student body, since commonly the teaching of DC/AC conversion are limited to square wave inverters because pure wave (sine)

inverters are expensive and come in finished kits or black boxes that make it impossible for students to observe the process stages, limiting them only to seeing the inputs and outputs of the system. In this sense, the development of the SPWM modulator has contemplated three stages: The first, the development of the pulse shaper of the SPWM modulator for the control of the single-phase inverter, the second corresponds to the coupling of the SPWM modulator with the inverter, finally, the filtering of the output signal of the single-phase inverter modulated with SPWM. The experiment shows the sinusoidal DC/AC conversion process using an Atmega 328P, L298N, battery (6V) and RC filter, the frequency of the sinusoid obtained from the inverter is 60 Hz with a total harmonic distortion (THD) of 8.98% which is less than 47.30% THD of the square wave of the single-phase inverter without SPWM modulator.

Keywords: Electronic converters; DC / AC converters; SPWM modulation; single-phase switched inverter.

Resumo

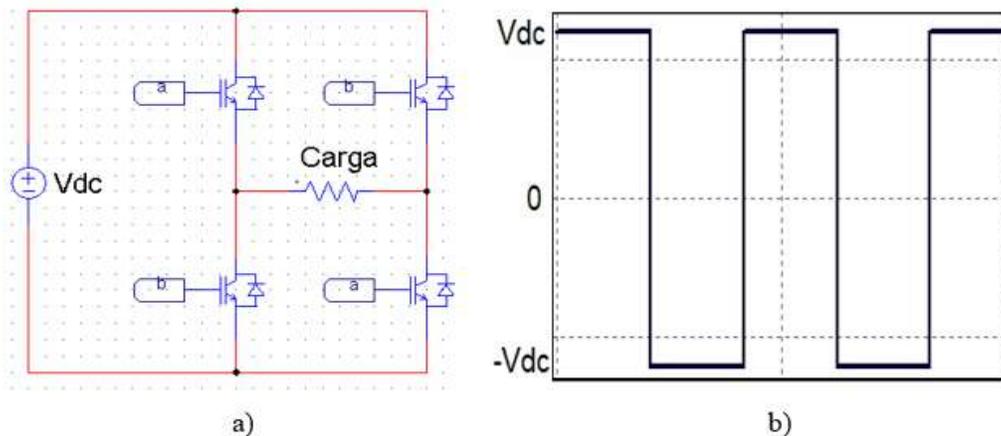
O inversor monofásico é amplamente utilizado na conversão DC / AC de fontes de energia de corrente contínua em corrente alternada em aplicações como sistemas fotovoltaicos isolados; Seu conhecimento e compreensão são muito importantes na formação técnica e profissional de alunos em engenharia eletrônica, elétrica ou afins. Por este motivo, neste trabalho foi desenvolvido um modulador de largura de pulso senoidal (SPWM) para um inversor monofásico, com o objetivo de reproduzir o processo de conversão CC / CA senoidal em etapas a favor do corpo discente, como comumente o ensino de conversão DC / AC são limitados a inversores de onda quadrada porque inversores de onda pura (seno) são caros e vêm em kits acabados ou caixas pretas que tornam impossível para os alunos observar as etapas do processo, limitando-os apenas a ver as entradas e saídas de o sistema. Nesse sentido, o desenvolvimento do modulador SPWM contemplou três etapas: A primeira, o desenvolvimento do formador de pulso do modulador SPWM para o controle do inversor monofásico, a segunda corresponde ao acoplamento do modulador SPWM com o inversor, por fim, a filtragem do sinal de saída do inversor monofásico modulado com SPWM. O experimento mostra o processo de conversão senoidal DC / AC usando um Atmega 328P, L298N, bateria (6V) e filtro RC, a frequência da sinusóide obtida do inversor é 60 Hz com uma distorção harmônica total (THD) de 8,98% que é menos de 47,30% THD da onda quadrada do inversor monofásico sem modulador SPWM.

Palavras-chave: Conversores eletrônicos; Conversores DC / AC; Modulação SPWM; inversor monofásico comutado.

Introducción

El inversor monofásico, se utiliza ampliamente en la conversión de energía eléctrica de corriente continua en corriente alterna en las diversas instalaciones fotovoltaicas aisladas como es el caso de las de las zonas rurales de la sierra y selva del Perú que son implementadas a través de diversos proyectos del “Plan nacional de electrificación rural” (Minem M. d., 2015) (Minem M. d., 2020) con la finalidad de suministrar energía eléctrica no convencional en los hogares aislados; su conocimiento y comprensión del proceso de conversión de energía eléctrica, son muy fundamentales dentro de la formación técnica y profesional del estudiantado de las carreras como la ingeniería electrónica, eléctrica u otras afines (Mohan, 2012), (Gimeno, Seguí, & Orts, 2011); por lo mismo, se busca que los estudiantes conozcan de forma teórica y práctica el funcionamiento del inversor según sus métodos de conversión DC/AC en modo conmutado.

En ese contexto, por lo general en la enseñanza práctica de los convertidores DC/AC, usualmente se utilizan inversores de fuente de voltaje (VSI) en modo conmutado con configuraciones en puente H o medio puente que en sus terminales solo se obtienen ondas cuadradas alternadas con semiciclo de 180° como se observa en la figura 1, los mismos que además, tienen el problema de estar asociadas a componentes armónicos según el análisis de Fourier del 3rd, 5th, 7th, 9th, 11th, 13th, 15th, ...n orden, que crean perturbaciones en la red eléctrica y dañan a los aparatos eléctricos debidos a sus amplitudes de voltaje del 33%, 20%, 14.3%, 11.1%, 9.1%, 7.7%, 6.7%, ...n% en comparación con la amplitud de la componente fundamental (Mohan, 2012) (Bhattacharya, Roychowdhury, Mitra, & Ghosh, 2019). Por lo tanto, es muy importante que los estudiantes conozcan y experimenten la conversión DC/AC con otros métodos que eliminen dichas perturbaciones y se logren obtener ondas sinusoidales en su salida como las que se obtienen con los inversores de onda pura cuyos costos son elevados para el estudiantado y en especial porque éstos equipos vienen en formato de caja negra y donde el estudiante solo se limita a observar la entrada y la salida del proceso de conversión DC/AC sinusoidal y se omiten otras etapas del proceso.

Figura 1: Inversor de onda cuadrada en puente H. a) Circuito, b) Señal de salida en la carga.

Frente a tal situación, en esta investigación se ha desarrollado un modulador por anchura de pulso sinusoidal SPWM para un inversor monofásico aislado de 60 Hz con componentes electrónicos de bajo costo que permitan reproducir por etapas el proceso de conversión DC/AC sinusoidal a fin de obtener en la salida de la carga una senoide de 60 Hz a diferencia de una onda cuadrada.

Materiales y métodos

Para el desarrollo del trabajo se utilizaron diversos materiales como son: 01 microcontrolador ATmega328P con frecuencia de reloj de 16 MHz y embebido en una tarjeta arduino uno, un circuito integrado L298N que cumple la función de puente H, una batería de 6V 4Ah, un filtro paso bajo RC ($R=26.5k\ \text{ohm}$, $C = 10\ \text{nF}$), 01 osciloscopio de marca Hantek DSO5102P de 02 canales de 100 MHz, software Matlab y PSIM.

Los métodos empleados para el desarrollo del modulador SPWM fueron el analítico-sintético y experimental (Hernández León, 2011) (Rodríguez & Perez, 2017); en el análisis se identificó las características del proceso de conformación de los pulsos por modulación SPWM, las características de las señales eléctricas de la portadora y la moduladora, los índices de modulación de amplitud y frecuencia, el tipo de sincronización, la configuración del circuito inversor y las especificaciones del filtro paso bajo; en la síntesis, se ha diseñado la unidad conformadora de los pulsos del modulador SPWM con ciclo de conducción variable, asimismo el filtro paso bajo para la obtención de la señal sinusoidal a la salida del inversor. En cuanto al método experimental, se utilizó fundamentalmente para verificar el funcionamiento del modulador SPWM con todas sus etapas y a la vez contrastar su operatividad con respecto al inversor conmutado de onda cuadrada.

Etapas del estudio

Etapa 1: Conformación de pulsos del modulador SPWM para el control del inversor monofásico
 Se ha realizado a partir de la comparación de dos funciones periódicas de amplitud unitaria que cumplen los roles de señal de referencia (onda sinusoidal) y de portadora (onda triangular) que oscilan con frecuencias de 60 Hz y 2.46 kHz respectivamente y tienen un índice de modulación de la amplitud (m_a) igual a 1 y de la frecuencia (m_f) igual a 41 según las ecuaciones (1), (2).

$$m_a = \frac{\text{Amplitud onda sinusoidal}}{\text{Amplitud onda triangular}} \quad (1)$$

$$m_f = \frac{\text{Frecuencia onda triangular}}{\text{Frecuencia onda sinusoidal}} \quad (2)$$

En la figura 2, se representa el proceso de la conformación de los pulsos del modulador SPWM donde se obtienen un total de 21 pulsos PWM variable para cada uno de los semiciclos de la señal de referencia sinusoidal. La secuencia y el periodo de conducción de los pulsos SPWM para el semiciclo positivo se presentan en la tabla 1 de acuerdo a los datos muestreados en el View Data Points del Simview del software PSIM.

Figura 2: Conformación de pulsos del modulador SPWM para el control del inversor monofásico

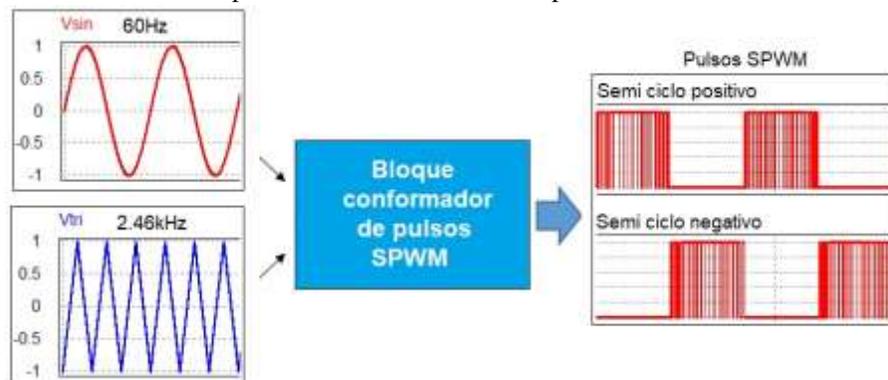


Tabla 1: Secuencia y ancho de pulso de la señal conformada SPWM (semi ciclo positivo)

Nº Pulso	Tiempo de conducción, us	Estado de conducción	Tiempo de no conducción, us	Estado de no conducción
1	162	ON	143	OFF
2	242	ON	165	OFF
3	272	ON	135	OFF
4	300	ON	107	OFF
5	327	ON	80	OFF
6	350	ON	57	OFF
7	369	ON	38	OFF
8	385	ON	22	OFF

9	396	ON	9	OFF
10	396	ON	6	OFF
11	397	ON	0	OFF
12	396	ON	7	OFF
13	396	ON	9	OFF
14	385	ON	22	OFF
15	369	ON	38	OFF
16	349	ON	57	OFF
17	326	ON	80	OFF
18	301	ON	107	OFF
19	272	ON	135	OFF
20	242	ON	165	OFF
21	163	ON	143	OFF
Total semi ciclo positivo	6795		1525	
Total de tiempo = 8320us				

De forma similar, la secuencia y el periodo de conducción de los pulsos SPWM de la tabla 1, se han replicado para el semiciclo negativo debido al índice de modulación de frecuencia impar entre la portadora y la señal de referencia (Gimeno, Seguí, & Orts, 2011) (Kazmierkowski, Krishnan, & Blaabjerg, 2002).

Durante la implementación, se ha programado en el microcontrolador ATmega 328P los 21 ciclos del modulador SPWM tanto para el semiciclo positivo y negativo, asimismo se ha configurado con 6350 el registro de captura de entradas (ICR1) para determinar el valor máximo de conteo del temporizador del módulo PWM del ATmega 328P con una frecuencia de oscilador de 16 MHz (Microchip, 2020). La configuración del ICR1 se ha calculado con (3); donde, F_{clk} es la frecuencia de reloj del oscilador para el Atmega 328P, f_{ref} es la frecuencia de la señal de referencia y $\#pulsos_{semiciclo}$ es el total de pulsos por semi ciclo según la tabla 01.

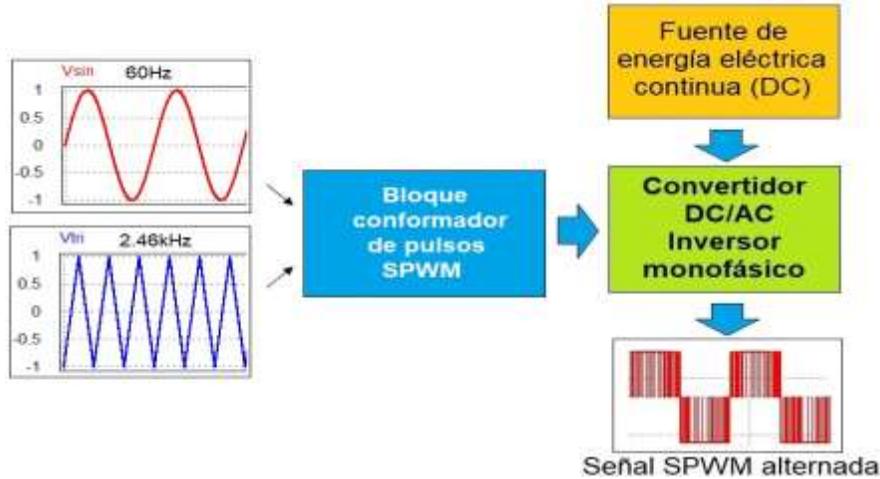
$$ICR1 = \frac{F_{clk}}{2 * f_{ref} * \#pulsos_{semiciclo}} \quad (3)$$

Etapa 2: Acoplo del modulador SPWM al inversor monofásico (Convertidor DC/AC)

Los pulsos conformados por modulación SPWM, se han acoplado al circuito inversor (convertidor DC/AC) monofásico en configuración puente H con el L298N con la finalidad de obtener las señales moduladas SPWM en amplitud alternada (STMicroelectronics, 2000). En la figura 3, se representa esquemáticamente al inversor monofásico acoplado al modulador SPWM; el periodo de conducción de los pulsos SPWM para cada semiciclo positivo y negativo, se desarrollan en

8325 microsegundos haciendo un total para toda la onda completa de 16650 microsegundos que en frecuencia corresponde a los 60.06 Hz (≈ 60 Hz).

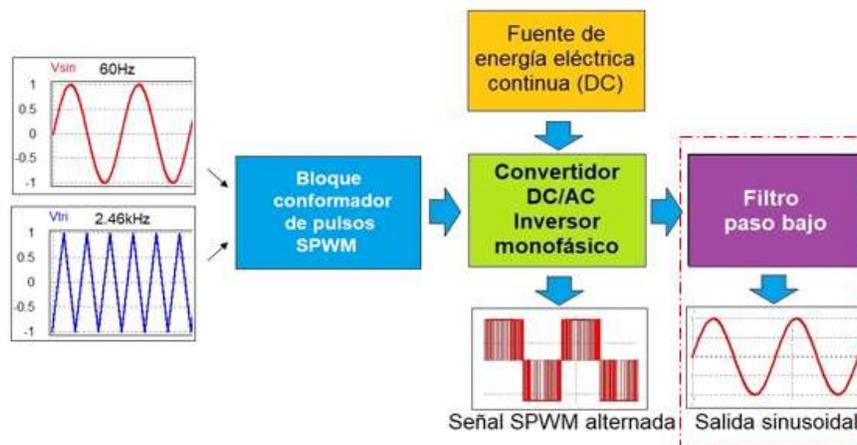
Figura 3: Inversor monofásico (Convertidor DC/AC) con modulador SPWM



Etapa 3: Filtrado de la señal del inversor acoplado al modulador SPWM.

En la figura 4 marcada con líneas, se observa la etapa del filtrado de la señal de salida del inversor monofásico acoplado al modulador SPWM de donde se obtienen la senoide esperada a partir de una fuente de energía continua. El filtrado se realiza con un filtro paso bajo tipo RC con una frecuencia de corte de 60Hz; los valores de la resistencia R y el capacitor C son: R=26.5 kilo Ohm y C=100 nanofaradios. El filtro paso bajo tiene una ganancia de -20dB/década para los armónicos por encima de 60 Hz y un desfase por debajo -45° para la señal sinusoidal filtrada.

Figura 4: Filtrado de la señal del inversor acoplado al modulador SPWM



Resultados y discusión

Se ha usado el osciloscopio Hantek DSO5102P para medir los resultados del experimento. El experimento se realizó para un índice de modulación de amplitud $m_a=1$, y de frecuencia $m_f=41$; el total de pulsos conformados por cada semi ciclo positivo y negativo corresponde a 21 pulsos SPWM con ciclos de trabajo o conducción variable de acuerdo a la tabla 1. En las figuras 5 y 6, se demuestra experimentalmente el funcionamiento de las etapas 1 y 2 del proceso de conversión DC/AC sinusoidal que corresponden a la conformación de los pulsos con modulación SPWM y la señal alterna conformada a la salida del inversor monofásico. Por otro lado, en la figura 7 se presenta la señal alterna sinusoidal de 60 Hz a la salida del inversor monofásico después del filtrado (etapa 3); por lo tanto, se evidencia experimentalmente la conversión DC/AC sinusoidal con un modulador SPWM.

Figura 5: Conformación de pulsos con modulación SPWM para semiciclo positivo y negativo

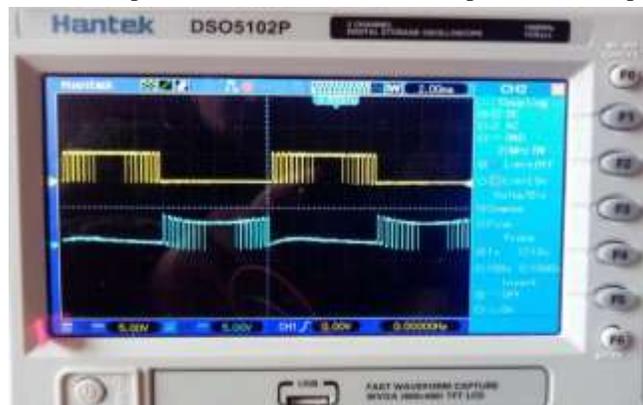
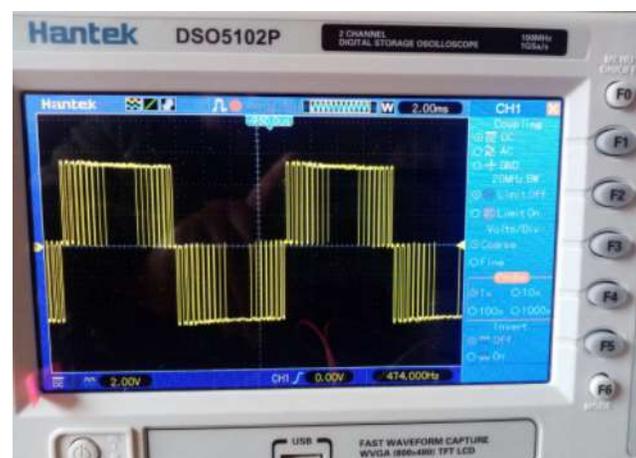


Figura 6: Señal alterna conformada con modulación SPWM a la salida del inversor monofásico



Los detalles de la amplitud y frecuencia del espectro de frecuencias de la figura 8 se observan en la tabla 2.

Tabla 2: Amplitud y frecuencia del espectro de frecuencias de las señales del inversor

N° de componente frecuencial	Frecuencia	Amplitud del espectro de frecuencia de la onda cuadrada (sin SPWM)	Amplitud del espectro de frecuencia de la onda sinusoidal (con SPWM)
1	60	7.64	5.01
3	180	2.55	0.40
5	300	1.53	0.16
7	420	1.09	0.09
9	540	0.85	0.05
11	660	0.69	0.04
13	780	0.59	0.03
15	900	0.51	0.02
17	1020	0.45	0.02
19	1140	0.40	0.01
21	1260	0.36	0.01
23	1380	0.33	0.01
25	1500	0.31	0.01
27	1620	0.28	0.01
29	1740	0.26	0.01
31	1860	0.25	0.01
33	1980	0.23	0.01
35	2100	0.22	0.01
37	2220	0.21	0.01
39	2340	0.20	0.03
41	2460	0.19	0.05
43	2580	0.18	0.03
45	2700	0.17	0.00
47	2820	0.16	0.00
49	2940	0.16	0.00

La distorsión armónica total THD de las señales del inversor monofásico de onda cuadrada sin modulador SPWM es 47.3% (2) y de la senoide obtenida del inversor con modulador SPWM es THD= 8.98% (3).

$$\text{Inversor monofásico de onda cuadrada, } THD_v = \frac{3.6132}{7.64} * 100\% = 47.3\% \text{ (2)}$$

$$\text{Inversor monofásico con modulador SPWM, } THD_v = \frac{0.45}{5.01} * 100\% = 8.98\% \text{ (3)}$$

Los materiales del circuito electrónico tienen los siguientes costos aproximados en USD: Microcontrolador ATmega 328P en la placa Arduino UNO (costo \approx 10 USD), puente H del L298N (costo \approx 3.5 USD), batería de corriente continua 6V (costo \approx 4 USD) y filtro paso bajo RC (costo \approx 0.25 USD). El costo total aproximado corresponde a USD 17.75.

Al finalizar la investigación, se ha obtenido un modulador por anchura de pulso sinusoidal (SPWM) para un inversor monofásico que presenta por etapas el proceso de conversión DC/AC hasta obtener una salida tipo sinusoidal de 60 Hz con diferencia de una onda cuadrada; el resultado es similar a los trabajos de (Birbir, Yurtbasi, & Kanburoglu, 2019), (Abdel, Thomas, & Mostafa, 2017) y (De la Barrera, Arellano, Reséndiz, & Sanchez, 2015) que desarrollaron moduladores SPWM con microcontroladores de gama media y alta con frecuencias de 50 Hz y 60 Hz cuyos costos son mayores al ATmega 328P.

El espectro de frecuencias de la senoide obtenida del inversor con modulador SPWM tiene la componente fundamental en la frecuencia de 60 Hz y se evidencia la existencia de los armónicos 3rd, 5th, 7th con amplitudes no significativas con relación a los armónicos de la onda cuadrada cuyas componentes 3rd, 5th, 7th, 9th, 11th, 13th tienen amplitudes de ganancia significativa que generan perturbaciones en el suministro eléctrico. Los resultados obtenidos del espectro de frecuencias de la senoide, guardan similitud con el trabajo de (Colak & Kabalci, 2013) donde se evidencia la existencia del 3rd, 5th, 7th armónicos con amplitudes muy pequeñas y no relevantes. La distorsión armónica total THD de la senoide obtenida a la salida del inversor monofásico con modulador SPWM es 8.98%, valor que se ubica dentro del rango de 1.7% y 9.3% obtenido por (Colak & Kabalci, 2013) en su diseño de modulador SPWM. Por lo tanto, el THD obtenido del modulador SPWM desarrollado, es menor en 38.32% al THD de un inversor de onda cuadrada.

Referencias

1. Abdel, S., Thomas, J., & Mostafa, R. (2017). Design and Implementation of a Single Phase SPWM Inverter Based Microcontroller for Wind Energy Conversion Systems. *International journal of systems applications, engineering & development.*, 291-296. doi:10.19026/rjaset.14.3994
2. Bhattacharya, A., Roychowdhury, S., Mitra, S., & Ghosh, G. (2019). Six Lower Order Harmonics Elimination From Output Voltage Waveform Of Single Phase Full Bridge Conventional Inverter

- With Adjustable Output. IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), 561-568. doi:10.1109/CCWC.2019.8666510
3. Birbir, Y., Yurtbasi, K., & Kanburoglu, V. (2019). Design of a single-phase SPWM inverter application with PIC micro controller. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 592-599. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.11.014>
 4. Colak, I., & Kabalci, E. (2013). Developing a novel sinusoidal pulse width modulation (SPWM) technique to eliminate side band harmonics. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 861-871. doi:doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.08.024
 5. Gimeno, Seguí, & Orts. (2011). *Convertidores electrónicos: Energía solar fotovoltaica, aplicaciones y diseño*. Valencia-España: Universitat Politècnica de València.
 6. Gonzáles, A. D., Sánchez, A. A., Maldonado, I. R., & Sanchez, M. J. (2015). Análisis de PWM sinusoidal (SPWM) utilizando Matlab para generar el código de conmutación digital. *IEEE ROC&C*, Ponencia 21.
 7. Hernández León, R. (2011). *El proceso de la investigación científica*. La habana Cuba: Editorial universitaria. Obtenido de <https://elibro.net/es/lc/bibliounh/titulos/71435>
 8. Kazmierkowski, Krishnan, & Blaabjerg. (2002). *Control in Power Electronics Selected problems*. California USA: Academic Press.
 9. Microchip. (2020). *MegaAVR® Data Sheet, ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P*. USA: Microchip Technology Incorporated. Obtenido de <http://www.microchip.com/support>
 10. Minem, M. d. (2015). *Plan nacional de electrificación rural (PNER) periodo 2016-2025*. Lima Perú: Ministerio de Energía y Minas del Perú.
 11. Minem, M. d. (2020). *Reglamento de la Ley N° 28749, Ley General de electrificación rural*. Lima-Perú: Normas Legales. El Peruano.
 12. Mohan, N. (2012). *Electrónica de potencia: convertidores, aplicaciones y diseño (3a. ed.)*. España: McGraw-Hill. Obtenido de <https://elibro.net/es/lc/bibliounh/titulos/36572>
 13. Rodriguez, A., & Perez, A. O. (2017). Métodos científicos de indagación y construcción del conocimiento. *EAN*, 179-200. doi:10.21158/01208160.n82.2017.1647
 14. STMicroelectronics. (2000). *Dual full-bridge driver. Datasheet L298N*, 1-13.

© 2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons

Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>