

ESTUDIO DE LA DISTORSION ARMONICA TOTAL EN MATLAB/SIMULINK DEL INVERSOR TRIFÁSICO PWM

*MATLAB/SIMULINK STUDY OF TOTAL HARMONIC
DISTORTION OF PWM THREE-PHASE INVERTER*

Esteban Osvaldo Guerrero Ramírez

Universidad Tecnológica de la Mixteca, México
egerrero@mixteco.utm.mx

Alberto Martínez Barbosa

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, México
alberto.mtba@gmail.com

Marco Antonio Contreras Ordaz

Universidad Tecnológica de la Mixteca, México
marco.contreras@mixteco.utm.mx

German Cruz Martínez

Universidad Tecnológica de la Mixteca, México
cumg991105@gs.utm.mx

Recepción: 14/febrero/2023

Aceptación: 14/marzo/2023

Resumen

El inversor trifásico es un módulo electrónico muy importante, utilizado en la industria moderna. En este artículo, se presenta un estudio de la distorsión armónica total (THD) con en el ambiente Matlab/Simulink, para hacer comprensibles a los estudiantes los conceptos de los esquemas modernos de conversión de potencia. Se presentan los resultados de simulación de un inversor trifásico con carga balanceada RL y con filtro LC de salida, empleando la técnica de modulación de ancho de pulso sinusoidal. Se utiliza el bloque de la transformada rápida de Fourier FFT, para la evaluación de la THD de la corriente y voltaje de fase, variando el índice de modulación en amplitud (m_a) y el índice de modulación en frecuencia (m_f). Como resultado, la THD se reduce por el uso del filtro LC de salida y por el incremento de m_a y m_f . Matlab/Simulink es útil como herramienta didáctica.

Palabras Clave: Distorsión armónica total, inversores trifásicos, Matlab/Simulink.

Abstract

Three-phase inverter is a very important electronic module, used in modern industry. In this paper, a study of the total harmonic distortion (THD) with the Matlab/Simulink environment is presented, to make the concepts of modern power conversion schemes understandable to students. The simulation results of a three-phase inverter with a balanced load RL and with an LC output filter are presented, using the sinusoidal pulse width modulation technique. The fast Fourier transform FFT block is used for the evaluation of the THD of the phase current and voltage, varying the amplitude modulation index (m_a) and the frequency modulation index (m_f). As a result, the THD is reduced using the output LC filter and by the increase in m_a and m_f . Matlab/Simulink is useful as a teaching tool.

Keywords: *Three-phase inverters, total harmonic distortion, Matlab / Simulink.*

1. Introducción

Se denomina inversor al dispositivo que convierte corriente directa (CD) en corriente alterna (CA) a voltaje y frecuencia de salida deseada. Los inversores trifásicos son utilizados normalmente en aplicaciones de alta potencia. Las aplicaciones de los inversores incluyen fuentes de energía ininterrumpida (UPS) y el control de motores de corriente alterna. Los inversores se clasifican a grandes rasgos en dos tipos: inversores de fuente de voltaje (VSI, por sus siglas en inglés) y de fuente de corriente (CSI, por sus siglas en inglés) [Kishor, 2014]. Generalmente, un VSI tiene un capacitor conectado a través de la fuente de alimentación de corriente directa, para mantener el voltaje de entrada constante [Ghosh, 2019]. El amplio uso de este tipo de inversores se debe a la alta frecuencia de conmutación de los dispositivos semiconductores y el uso de controladores de velocidad PWM. La manera de obtener la forma de onda deseada es mediante la adecuada conmutación de los interruptores. En este sentido, la modulación por ancho de pulsos sinusoidal (SPWM, por sus siglas en inglés), es el método más eficiente utilizado para variar tanto el voltaje como la frecuencia dentro de un inversor trifásico. La modulación SPWM se utiliza tanto para los inversores trifásicos como para los inversores monofásicos, en donde las ventajas de esta modulación son las

siguientes: pocos requisitos de filtrado para la reducción de armónicos y el control de la amplitud a la frecuencia fundamental.

En el inversor se utilizan interruptores semiconductores para convertir la señal de CD en CA. Cuando este fenómeno ocurre, la señal contiene algunos armónicos que afectan su rendimiento. El principal parámetro de rendimiento de un inversor es la distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés), ya que un valor menor de THD en la salida de un inversor significa una mayor eficiencia, o un alto factor de potencia. Por lo tanto, la THD juega un papel importante en los sistemas electrónicos de potencia [Mahbub, 2021]. La distorsión armónica es causada por dispositivos no lineales en los sistemas de potencia. Un dispositivo no lineal es aquel en el que la corriente no es proporcional al voltaje aplicado. La norma IEEE 519 1992 recomienda los requisitos para el control de armónicos en los sistemas eléctricos de potencia. La calidad del voltaje de salida del inversor está muy relacionada con la distorsión armónica total THD. La THD es la medida del valor efectivo de los componentes armónicos de una señal distorsionada, ecuación 1. La ecuación 2 define la distorsión armónica de corriente.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h,máx} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h,máx} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

h : Orden del armónico característico

V_h y I_h : Armónico de voltaje y corriente.

V_1 y I_1 : Voltaje y corriente fundamental

La transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) se utiliza para hacer en análisis espectral de los voltajes y corrientes de fase de salida del inversor y se utiliza como herramienta útil para los cálculos de la THD. El algoritmo requiere una gran cantidad de cálculos, pero con el software de simulación Matlab los cálculos se realizan fácilmente [Mohd, 2017].

La modulación SPWM, es una de las técnicas de modulación más populares para reducir los armónicos y, por lo tanto, disminuir la THD. Esto se logra al elegir una frecuencia de portadora igual a un múltiplo impar de tres veces la frecuencia de referencia; generalmente tres, nueve, o quince veces [Hart, 2010]. Esta técnica de conmutación se ha utilizado efectivamente en el control de motores, convertidores electrónicos de potencia y amplificadores de audio por su simple principio de funcionamiento [Kumar, 2014]. Además, se ha utilizado el inversor, por la facilidad de controlar directamente el voltaje y la frecuencia de salida de acuerdo con la función sinusoidal, se caracteriza por los pulsos de amplitud constante con diferentes ciclos de trabajo para cada periodo [Raju, 2013].

En este trabajo se estudia el funcionamiento del inversor trifásico, basado en la técnica de conmutación SPWM. El estudio del funcionamiento del inversor se lleva a cabo mediante simulaciones bajo las siguientes consideraciones: variaciones del índice de modulación en amplitud de las señales de referencia y variaciones de frecuencia de la portadora.

Dentro de las características importantes del inversor, en este documento se destacan la distorsión armónica total de corriente (THD_i) y la distorsión armónica total de voltaje (THD_v). Los resultados de simulación se presentan mediante gráficas.

2. Métodos

Descripción del inversor trifásico

En la figura 1 se muestra el diagrama general de un inversor trifásico, el cual consiste en una fuente de alimentación de CD, una carga trifásica y seis interruptores distribuidos en tres ramas, en donde cada rama consta de dos interruptores [Verma, 2017].

Descripción de la técnica de disparo

La modulación de ancho de pulso sinusoidal es el método más utilizado en el control de motores y de inversores. En esta técnica se utilizan tres ondas sinusoidales y una onda portadora triangular para generar la señal PWM.

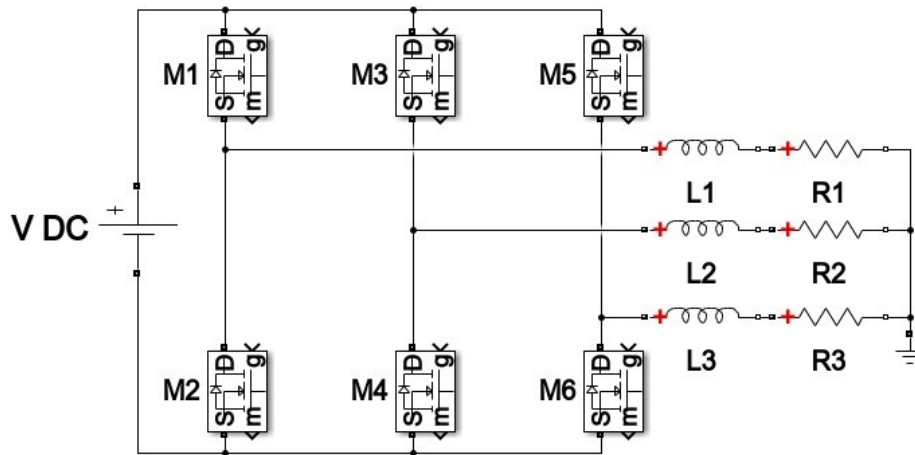


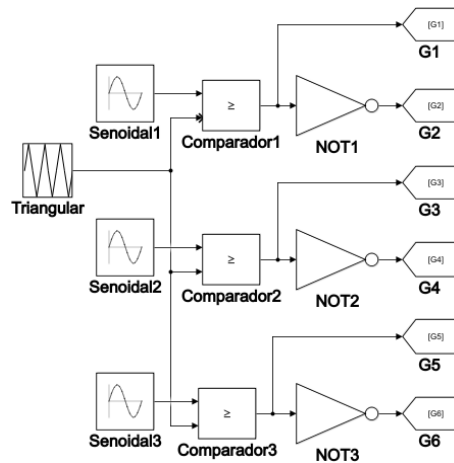
Figura 1 Inversor trifásico PWM.

Las ondas sinusoidales se denominan señales de referencia y tienen 120° de diferencia de fase entre sí. La frecuencia de estas ondas sinusoidales se elige en función de la frecuencia de salida del inversor (50/60 Hz).

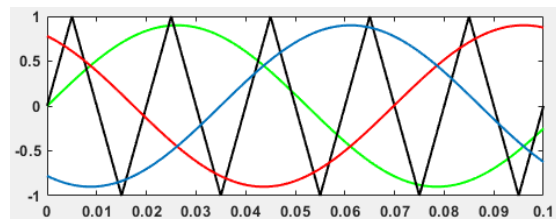
La onda triangular portadora suele ser una onda de alta frecuencia (en kHz). La señal de conmutación se genera comparando las ondas sinusoidales con la onda triangular. El comparador emite un pulso cuando el voltaje sinusoidal es mayor que la señal triangular y este impulso se utiliza para activar los respectivos interruptores del inversor.

Además, los interruptores se controlan por parejas (M₁, M₂), (M₃, M₄) y (M₅, M₆). Cuando uno de los interruptores de la pareja está cerrado, el otro está abierto. Cada pareja de interruptores requiere una onda sinusoidal de referencia separada. Las tres ondas sinusoidales de referencia están desfasadas 120° para producir una salida trifásica equilibrada. Los armónicos se minimizan si se elige una frecuencia de portadora igual a un múltiplo impar de tres veces la frecuencia de la señal de referencia. La señal portadora debe estar sincronizada con la señal de referencia de la fase A.

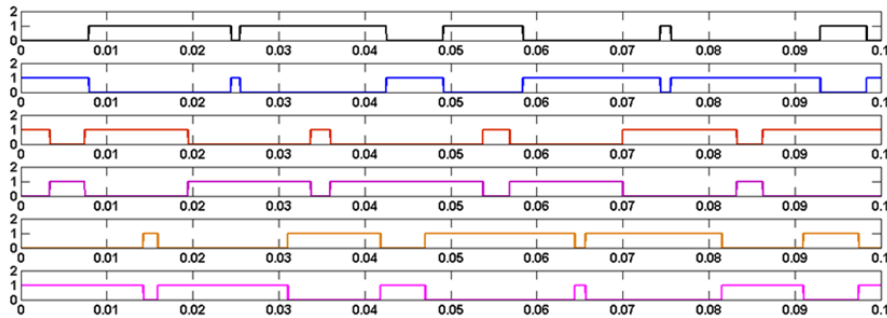
La figura 2 muestra el diagrama a bloques de la técnica PWM sinusoidal, las señales de referencia sinusoidales desfasadas 120° entre sí y la señal portadora triangular, así como el resultado de la comparación entre las ondas de referencia y la triangular que generan los pulsos de los interruptores de puerta [Hendawi, 2014], [Mahbub,2021].



a) Modulación de ancho de pulso trifásico



b) Señal portadora (triangular) y señales moduladoras (sinusoidales)



c) Pulsos de disparo generados

Figura 2 SPWM trifásico.

3. Resultados

El rendimiento del inversor trifásico basados en la modulación PWM se verifica mediante el uso de Matlab/Simulink. La figura 3 muestra el modelo Simulink de un inversor trifásico PWM. El circuito es alimentado mediante fuente voltaje de corriente directa y la carga corresponde a una carga R-L equilibrada conectada en estrella. En este circuito un generador de ondas sinusoidales y un generador de onda triangular se utilizan para operar los interruptores. Los parámetros de rendimiento utilizados para el estudio del inversor son la distorsión armónica total de corriente y de voltaje. La variación del índice de modulación en amplitud se produce por el

cambio de la amplitud de la señal de referencia sinusoidal. Mientras que la variación de la frecuencia de la señal portadora se establece cambiando el índice de modulación en frecuencia.

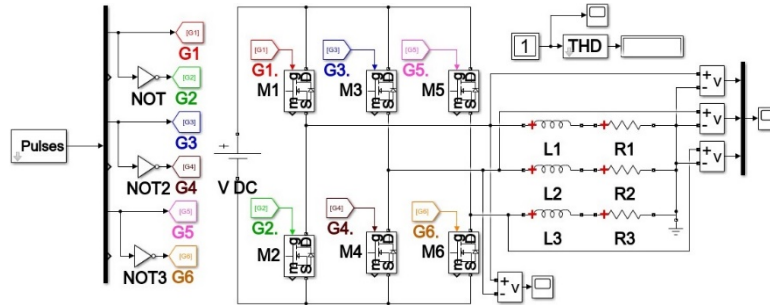


Figura 3 Inversor trifásico PWM.

Resultados de simulación del inversor trifásico PWM con carga R-L

En la tabla 1, se muestran los parámetros de diseño utilizados para realizar las simulaciones correspondientes.

Tabla 1 Parámetros del inversor.

Parámetros	Valor
Voltaje de entrada	100 V
Frecuencia fundamental	60 Hz
Frecuencia de la portadora	900 Hz
Inductancia	20 mH
Resistencia	10 Ω

En figura 4, se muestra la señal de corriente de fase, considerando un índice de modulación en amplitud $m_a = 0.9$ y un índice de modulación en frecuencia $m_f = 15$, resultando en una frecuencia de portadora de 900 Hz.

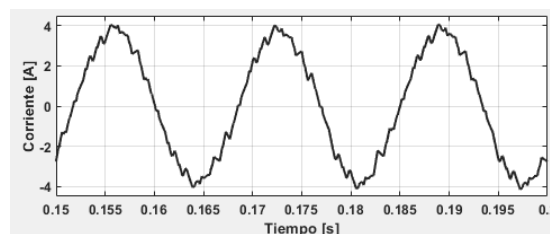


Figura 4 Corriente de fase con $m_a = 0.9$ y $m_f = 15$.

Mientras que en las figuras 5 y 6 se muestran los voltajes de fase y de línea bajo las mismas condiciones de operación. Las figuras 7 y 8, muestran los análisis FFT de la corriente de fase y del voltaje de fase respectivamente.

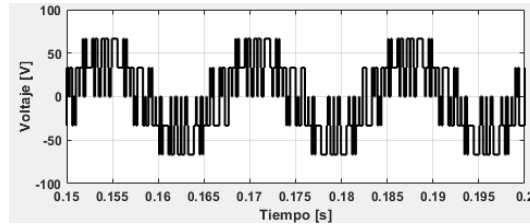


Figura 5 Voltaje de fase con $m_a = 0.9$ y $m_f = 15$.

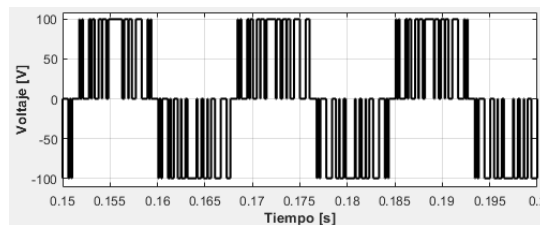


Figura 6 Voltaje de línea con $m_a = 0.9$ y $m_f = 15$.

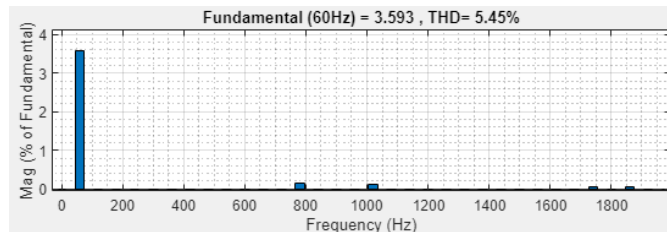


Figura 7 FFT de la corriente de fase con $m_a = 0.9$ y $m_f = 15$.

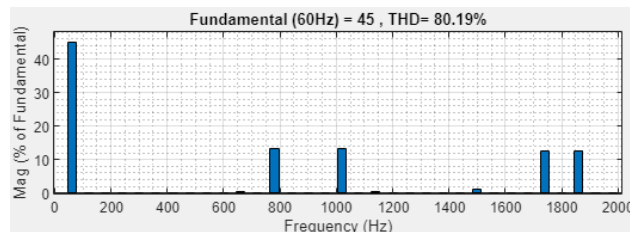


Figura 8 FFT del voltaje de fase con $m_a = 0.9$ y $m_f = 15$.

La distorsión armónica total de la corriente $THD_i = 5.45\%$ representa un valor relativamente bajo, sin embargo, la distorsión armónica total del voltaje $THD_v =$

80.19 %, representa un valor relativamente alto debido a la naturaleza pulsante del voltaje de fase. La variación del índice de modulación en amplitud m_a se produce por el cambio de la amplitud de la señal de modulación sinusoidal. El efecto de m_a en la THD del inversor trifásico PWM se ilustra en la figura 9, en donde se nota la variación del THD en función del índice de modulación, se observa que la distorsión disminuye conforme se incrementa m_a . Es importante mencionar que los valores utilizados en la figura 9 se obtuvieron considerando un índice de modulación en frecuencia constante $m_f = 15$. Para calcular la amplitud de los voltajes de línea se hace uso de la tabla 2 [Hart, 2010], [Sohaib, 2020].

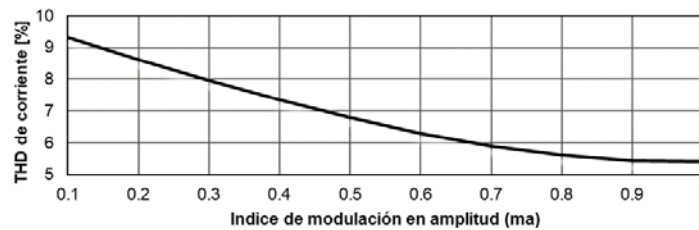


Figura 9 Variación de la THD en función de m_a , con $m_f = 15$.

Tabla 2 Amplitudes normalizadas V_n/V_{CCc} para los voltajes de línea trifásicos.

	$m_a = 1$	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
$n = 1$	0.866	0.779	0.693	0.606	0.520	0.433	0.346	0.260	0.173	0.087
$m_f \pm 2$	0.275	0.232	0.190	0.150	0.114	0.801	0.053	0.030	0.013	0.003
$2m_f \pm 1$	0.157	0.221	0.272	0.307	0.321	0.313	0.282	0.232	0.165	0.086

En este caso, para un $m_a = 0.9$ la amplitud de la componente fundamental del voltaje de línea se calcula como se muestra en la ecuación 3.

$$V_{L1} = (0.779)(100) = 77.9 \text{ V} \quad (3)$$

Mientras que en la ecuación 4, se muestra la amplitud del voltaje de fase.

$$V_{f1} = \frac{V_{L1}}{\sqrt{3}} = \frac{77.9}{\sqrt{3}} = 45 \text{ V} \quad (4)$$

En la ecuación 5, se presenta el primer grupo de armónicos de bandas laterales.

$$m_f \pm 2 = 15 \pm 2 = \begin{cases} 17 \times 60 = 1020 \text{ Hz} \\ 13 \times 60 = 780 \text{ Hz} \end{cases} \quad (5)$$

La ecuación 6 muestra la amplitud de voltaje de línea y la ecuación 7 muestra el voltaje de fase de estos armónicos.

$$V_{L13,17} = (0.232)(100) = 23.2 \text{ V} \quad (6)$$

$$V_{f13,17} = \frac{23.2}{\sqrt{3}} = 13.39 \text{ V} \quad (7)$$

En la ecuación 8, se presenta el segundo grupo de armónicos de bandas laterales.

$$2m_f \pm 1 = 2(15) \pm 1 = 30 \pm 1 = \begin{cases} 31 \times 60 = 1860 \text{ Hz} \\ 29 \times 60 = 1740 \text{ Hz} \end{cases} \quad (8)$$

La ecuación 9 muestra la amplitud de voltaje de línea y la ecuación 10 muestra el voltaje de fase de estos armónicos.

$$V_{L29,31} = (0.221)(100) = 22.1 \text{ V} \quad (9)$$

$$V_{f29,31} = \frac{22.1}{\sqrt{3}} = 12.75 \text{ V} \quad (10)$$

Los voltajes calculados para la señal fundamental y bandas laterales concuerdan con los resultados de simulación mostrados en la figura 9. Un resultado similar al anterior, pero, ahora se considera la variación del índice de modulación en frecuencia, para un índice de modulación en amplitud fijo. La figura 10, muestra la variación del THD en función del índice de modulación en frecuencia, se observa que la distorsión disminuye conforme se incrementa m_f . Es importante mencionar que el índice de modulación en amplitud es constante $m_a = 0.9$.

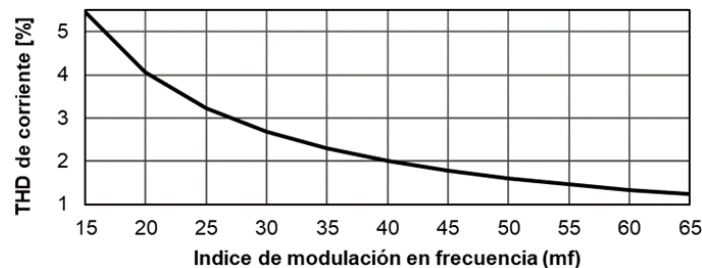


Figura 10 Variación de la THD en función de m_f , con $m_a = 0.9$.

Resultados de simulación del inversor trifásico PWM con filtro LC de salida

Una manera de disminuir la distorsión armónica total de corriente y de voltaje es insertando un filtro LC trifásico, tal y como se muestra en la figura 11.

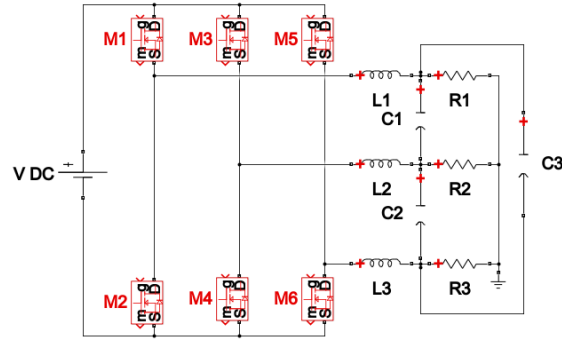


Figura 11 Inversor trifásico PWM con filtro LC.

La señal de voltaje producida por el inversor presenta una forma PWM, la cual tiene una componente de alta frecuencia debido a la conmutación de los interruptores de potencia. Para atenuar esta componente y suavizar la forma de onda de salida, se utiliza un filtro pasabajas de segundo orden. Por lo tanto, la función principal de este filtro es disminuir al máximo los armónicos de alto orden, sin afectar a la componente fundamental de salida del inversor. Una estructura usualmente empleada en aplicaciones de inversores de potencia es el filtro LC. La ecuación 11, define la función de transferencia de este filtro. Donde ω_0 es la frecuencia de resonancia y Q el actor de calidad.

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (11)$$

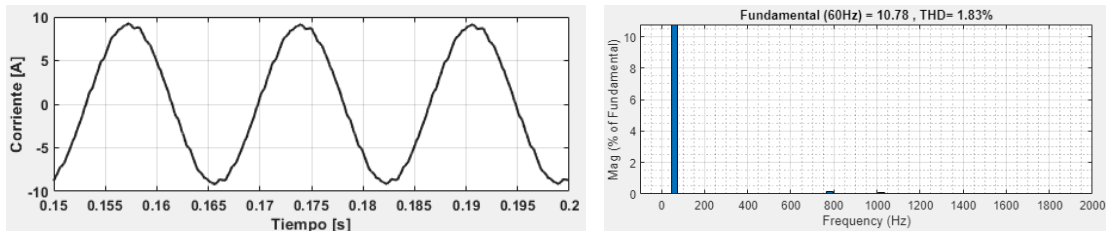
La ecuación 12 define la frecuencia de resonancia. Donde L es la inductancia y C la capacitancia. La ecuación 13 define el factor de calidad [Sanabria, 2004]. Donde R es la resistencia. En este trabajo de simulación se utilizan los siguientes elementos reactivos $L = 20 \text{ mH}$ y $C = 200 \mu\text{F}$.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (12)$$

$$Q = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (13)$$

Los resultados de simulación del inversor trifásico PWM con filtro LC a la salida se muestran a continuación. La figura 12 muestra la señal de corriente de fase y la

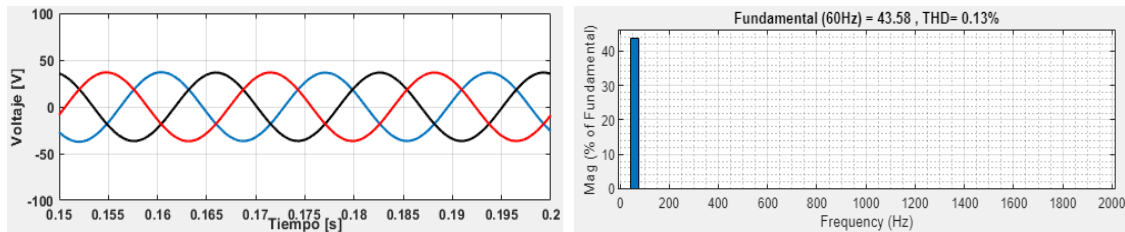
distorsión armónica total de la misma, para un índice de modulación en amplitud $m_a = 0.9$, y un índice de modulación en frecuencia $m_f = 15$ con filtro LC de salida. Cabe mencionar que se observa una mejor calidad de la corriente y como consecuencia una más baja distorsión. Mientras que la figura 13 muestra los voltajes de fase y la distorsión armónica total de los mismos. En figura 14 se observan señales completamente sinusoidales, producto del filtro LC utilizado, resultado que se observa en la disminución del THD. En figura 15 se muestran los resultados *THD* con diferentes índices de modulación en amplitud. Como se puede observar, al agregar un filtro LC se obtienen mejores resultados ya que disminuye la *THD* de la corriente con respecto a los resultados anteriores. De igual forma, al incrementar el índice de modulación en frecuencia, hace que disminuya el *THD*, tal como se muestra en figura 16.



a) Corriente de fase.

b) FFT de la corriente de fase.

Figura 12 Corriente de fase y THD de corriente con filtro LC.



a) Voltajes de fase.

b) FFT del voltaje de fase.

Figura 13 Voltajes de fase y THD de voltaje con filtro LC.

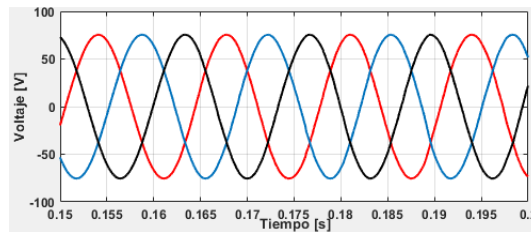


Figura 14 Voltajes de línea.

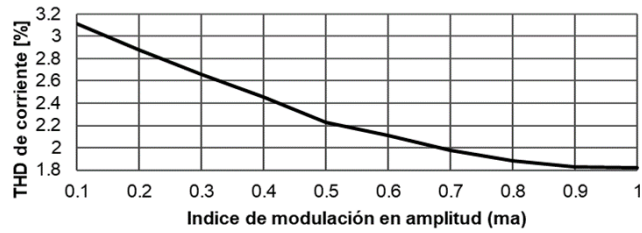


Figura 15 Variación de la THD en función de m_a , con $m_f = 15$, con filtro LC.

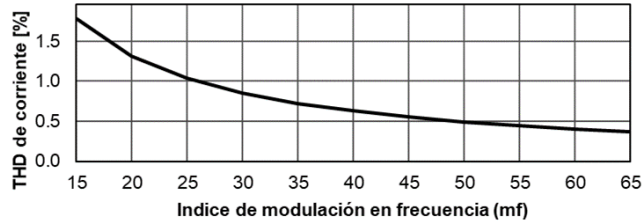


Figura 16 Variación de la THD en función de m_f , con $m_a = 0.9$, con filtro LC.

4. Discusión

Actualmente, los inversores PWM trifásicos se emplean principalmente en el control de motores de CA y en sistemas de energía renovable. Con la finalidad de reducir el contenido de armónicos en este tipo de sistemas, se utilizó la técnica PWM sinusoidal para el control de los interruptores. Los resultados obtenidos mediante simulación muestran que la distorsión armónica total de corriente disminuye en gran medida con el incremento de m_a y m_f , cuando se alimentan cargas RL trifásicas balanceadas.

Es importante mencionar que los voltajes de fase presentan un gran contenido de armónicos para este tipo de cargas gracias a la naturaleza pulsante de estas señales. Sin embargo, el uso de un filtro LC genera señales sinusoidales de voltajes de fase en terminales de la carga, disminuyendo de esta manera la distorsión armónica total de dichas señales, el mínimo valor obtenido de este trabajo es de $THD_v = 0.13\%$, para un índice de modulación en amplitud $m_a = 0.9$ y un índice de modulación en frecuencia $m_f = 15$ (Figura 13). Bajo estas mismas condiciones $THD_i = 1.83\%$ para $m_a = 0.9$ y $m_f = 15$, disminuyendo hasta $THD_i = 0.4\%$ se incrementa la frecuencia de la portadora hasta $f_c = 3780 \text{ Hz}$ con un $m_f = 63$.

5. Conclusiones

En este artículo se presentó el estudio de la distorsión armónica total del inversor trifásico PWM sinusoidal, con carga RL y con filtro de salida LC. Los parámetros de rendimiento utilizados fueron principalmente la distorsión armónica total de corriente y de voltaje de fase. El estudio de la distorsión armónica total del inversor se lleva a cabo bajo las siguientes consideraciones: variaciones del índice de modulación en amplitud de las señales de referencia y variaciones de frecuencia de la portadora. Los resultados de simulación se obtienen utilizando el bloque de la transformada rápida de Fourier FFT en el ambiente Matlab/Simulink. Los resultados obtenidos muestran, que tanto la distorsión armónica total de corriente, como la de voltaje varían de forma inversa con el incremento de los índices de modulación en amplitud y en frecuencia. Así mismo, los resultados de simulación obtenidos en el entorno Matlab/Simulink resultan ser de gran utilidad para entender los conceptos de los esquemas modernos de conversión de potencia y sin duda alguna se puede utilizar como herramienta educativa para analizar este tipo de sistemas.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ghosh, S., Swarnkar, P. & Deshpande, D. M. Comparative Analysis Based on Simulation and Design Aspects of Three-Phase Four Switch Inverter for Industrial Applications. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. Vol. 4, No. 9, 1325-1340, 2019.
- [2] Hart, D. W. *Electrónica de potencia*. México, Prentice Hall. 2010.
- [3] Kishor, Y. & Thakur, C. Analysis and Simulation of Three phase Inverter. *International Journal of Software and Hardware Research in Engineering*, Vol. 2, No. 9, 32-35, 2014.
- [4] Hendawi, E. & Bedir, I. Analysis and Simulation of Three phase Inverter Fed by PV Array. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol. 5, No. 6, 945-949, 2014.
- [5] Kumar R. & Kumar, A. Analysis Design and Control of Sinusoidal PWM Three-Phase Voltage Source Inverter Feeding Balanced Loads at Different Carrier Frequencies using Matlab. *International Journal of Advanced*

- Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol. 3, No. 5, 9557-9563, 2014.
- [6] Mahbub, M. Comparative analysis of Five Different PWM Techniques on Three-Phase Voltage Source Inverter fed Induction Motor drive. 2nd International conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (Icrest'21). IEEE. February, 2021.
- [7] Mahbub M. & Hossain M. A., Design, Simulation and Comparison of Three-phase Symmetrical Hybrid Sinusoidal PWM fed Inverter with Different PWM Techniques, 2021 2nd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICREST51555.2021.9331086.
- [8] Mohd, E., Mohd, A. M. N. THD analysis of SPWM & THPWM Controlled Three Phase Voltage Source Inverter. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol. 4, No. 10, 391-398, 2017.
- [9] Raju, N.I., Islam, M. S., Ali T. & Karim, S. A. Study of SPWM technique & simulation of designed analog circuit (Op-Amp) controlled three phase PWM inverter with harmonic reduction, 2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV), 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICIEV.2013.6572580.
- [10] Sohaib, H. M., Bilal, M., Malik, N., Muhammad A. & Amin, A. Design of Three Phase Inverter System with LC filter, 2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/INMIC50486.2020.9318075.
- [11] Verma, S., Bansod, R., Walke, S., Ganvir, S., Harinkhede, P., Khobragade, P. & Meshram S. Design of Three Phase Inverter using SPWM Technique in Matlab. International Journal of Engineering Technology Science and Research, Vol. 4, No. 4, 348-350, 2017.
- [12] Sanabria, C. A. Estrategia PWM Implementada en un FPGA para Aplicación en Inversores Multinivel. Tesis de maestría. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Cuernavaca Morelos 2004.