

Induction motor powered by a multilevel inverter with optimization of harmonics

Luis David Pabón Fernández, Ms.¹, Jorge Luis Díaz Rodríguez, Ms.¹, and Edison A. Caicedo, Eng.¹ ¹University of Pamplona, Colombia, davidpabon@hotmail.es, jdiazcu@gmail.com, yega1028@gmail.com

Abstract *This article shows the implementation of a common source three-phase multilevel converter of 15 steps per line, which adopts an optimized modulation in the first 50 harmonics. The optimization algorithm is developed in MATLAB, and the converter is controlled through FPGA Virtex5. The converter is used to power an induction motor; the simulations and the experimental tests performed herein allow us to validate the benefits of this type of induction motor power in terms of power quality in both voltage and current.*

Keywords– *Induction motor, multi-level inverter, THD, optimization, generic algorithms.*

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.10>

ISBN: 978-0-9993443-0-9

ISSN: 2414-6390

Motor de inducción alimentado mediante inversor multinivel con optimización de armónicos

Luis David Pabón Fernández, Ms.¹, Jorge Luis Díaz Rodríguez, Ms.¹, and Edison A. Caicedo, Eng.¹

¹University of Pamplona, Colombia, davidpabon@hotmail.es, jdiazcu@gmail.com, yega1028@gmail.com

Abstract– En este artículo se muestra la implementación de un convertidor multinivel trifásico de fuente común de 15 escalones por línea, que adopta una modulación optimizada en los primeros 50 armónicos, el algoritmo de optimización es desarrollado en Matlab y el control del convertidor se hace mediante la FPGA virtex5. El convertidor se utiliza para alimentar un motor de inducción, la simulación y la las pruebas experimentales mostradas en el trabajo permiten validar los beneficios que tiene este tipo de alimentación del motor de inducción en cuanto a calidad de la energía tanto en el voltaje como en la corriente.

Keywords– Motor de inducción, inversor multinivel, THD, optimización, algoritmos genéticos.

I. INTRODUCCIÓN

El control de velocidad de motores de inducción por lo general utiliza como elemento final de control un convertidor de potencia que permite variar la frecuencia y la tensión de alimentación de la máquina, con el fin de variar la velocidad de sincronismo y por ende la velocidad de la máquina [1].

Los convertidores utilizados en estas aplicaciones, por lo general son inversores convencionales que utilizan técnicas de modulación de ancho de pulso (PWM) y son controlados en dependencia de los requerimientos la técnica control aplicada, como el control escalar (V/Hz), el control vectorial, Control Directo del Par, etc. [2]. Sin embargo, estos convertidores presentan un problema en cuanto a la calidad de la energía se refiere [3], ya que por sus formas de onda cuadrada, generan gran cantidad de contenido armónico que provoca problemas como calentamiento de los devanados y generación de pares parásitos opuestos [4].

En los controles de velocidad de las máquinas de inducción los convertidores deben además de variar la frecuencia, controlar el valor de la magnitud de la tensión eficaz, con el fin de que en bajas velocidades la máquina no se sature y no provoque corrientes excesivas [1], este control el variador lo realiza mediante el aumento o disminución de la duración de los pulsos (SPWM) [5].

Esto hace que la forma de onda del convertidor dependa de la frecuencia y el valor de la tensión que se desea, de esta manera el THD estará en dependencia de la tensión y frecuencia de la salida del variador de frecuencia, es decir el THD será una función THD (V, f) [6].

En la actualidad la implementación de convertidores multinivel de potencia es una alternativa para la reducción del contenido armónico a la salida de las etapas de inversión DC/AC en aplicaciones eléctricas, como las energías alternativas ó en el control de velocidad de motores; esto

debido a que el THD que presentan es mucho menor que el de los convertidores convencionales [7], sin embargo a la hora de ser aplicados en el control de velocidad, las técnicas de modulación presentan el THD como función de la frecuencia deseada y la tensión [8], no llegándose a presentar un óptimo nivel de armónicos para todas las frecuencias.

Este trabajo tiene como motivación la implementación de un convertidor de potencia multinivel de 9 niveles por fase y 15 niveles de línea, que permita tener una óptima calidad de energía tanto en voltaje como en las corrientes de entrada del motor, presentando un espectro casi sinusoidal puro en los primeros 50 armónicos.

II. CONVERTIDOR MULTINIVEL

La topología de inversor multinivel seleccionada para este trabajo es el convertidor de puente H en cascada asimétrico de fuente común con relación 1:3 de 2 etapas, el cual genera 9 niveles de tensión a la salida de cada fase, la diferencia de potencial de las tensiones de fase genera un voltaje de línea con 15 escalones, esta topología se muestra en la figura 1 [9].

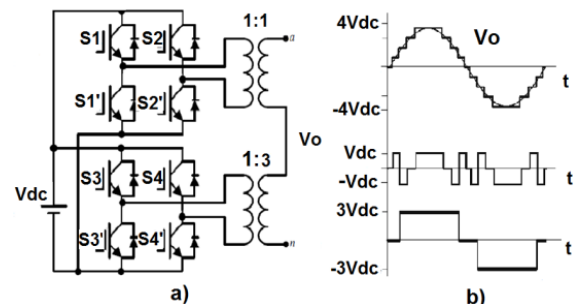


Fig. 1. Inversor en Cascada Asimétrico fuente común de dos Etapa con 9 niveles a la salida, asimetría 1:3 a) topología. b) Salida.

En la figura 2. Se muestra la topología trifásica que no es más que el triplicado de la fase presentada en la figura 1. Como se puede observar las tres fases comparten el bus de DC [10].

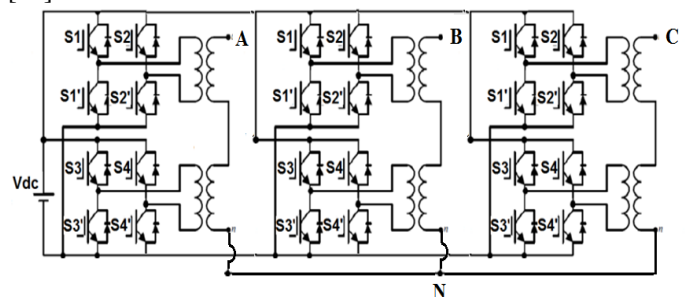


Fig. 2. Topología del convertidor.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.10>

ISBN: 978-0-9993443-0-9

ISSN: 2414-6390

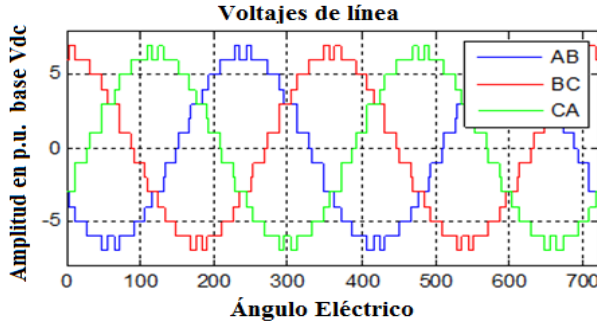


Fig. 3. Voltajes de línea.

III. OPTIMIZACIÓN

Para calcular la serie de Fourier en las tensiones de línea se parte de la diferencia de las series de Fourier de las tensiones de fase, según se muestra en la ecuación (1):

$$v_{AB}(t) = v_A(t) - v_B(t) \quad (1)$$

Realizando las respectivas diferencias de en términos de las series de Fourier de las Fases A y B, se obtiene la serie de Fourier para la tensión de línea V_{AB} , de la cual en el artículo solo se presenta la amplitud de los armónicos presentes, esta serie de Fourier es tomada de un trabajo previo de los autores [10], ya que el objetivo es minimizar el THD y para esto no se requieren los desfases de los armónicos, por tanto las amplitudes de los armónicos de las tensiones de línea quedarán expresadas mediante (2) [10]:

$$h_n = \begin{cases} 0 & \text{Para } n \text{ par} \\ 0 & \text{Para } n \text{ impar múltiplo de 3} \\ \frac{4\sqrt{3}V_{dc}}{\pi n} \left[\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{L_i} (-1)^{j-1} \cos \alpha_{ij} \right] & \text{Para } n \text{ impar no múltiplo de 3} \end{cases} \quad (2)$$

A. THD de la tensión de línea

El estándar IEEE 519 de 1992, define la distorsión armónica total como (3) [11]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} h_n^2}}{h_1} \cdot 100 \quad (3)$$

Donde el armónico h_1 es la componente fundamental y h_n el pico de la armónica n . Remplazando (2) en (3):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{L_i} (-1)^{j-1} \cos n \alpha_{ij} \right)^2 \right]}}{\left[\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{L_i} (-1)^{j-1} \cos \alpha_{ij} \right]} \cdot 100 \quad (4)$$

Donde n toma valores impares no triples, es decir 5, 7, 11, 13, 17, ... etc. y L_i son los componentes del vector $L = [a \ b \ c \ d]$. De esta manera en (4) se define la función objetivo a minimizar mediante el algoritmo de optimización [10].

B. Algoritmo de optimización

El algoritmo de optimización realizado en Matlab® mediante el comando *ga* (*Genetic Algorithm*) se tomó de un trabajo previo realizado por los autores [10]. El tamaño de la población para el algoritmo se toma de 20 individuos, cada individuo (X) conformado por el total de ángulos de disparo en el primer cuarto de onda:

$$X = [\alpha_{11} \alpha_{12} \dots \alpha_{1x} \alpha_{21} \alpha_{22} \dots \alpha_{2y} \alpha_{31} \dots \alpha_{3z} \alpha_{11} \dots \alpha_{1w}] \quad (5)$$

Acompañado del vector L , que indica al programa encargado de evaluar la función objetivo (*fitness*) los ángulos que corresponden a cada escalón. El diagrama de flujo del algoritmo se muestra en la Fig. 5.

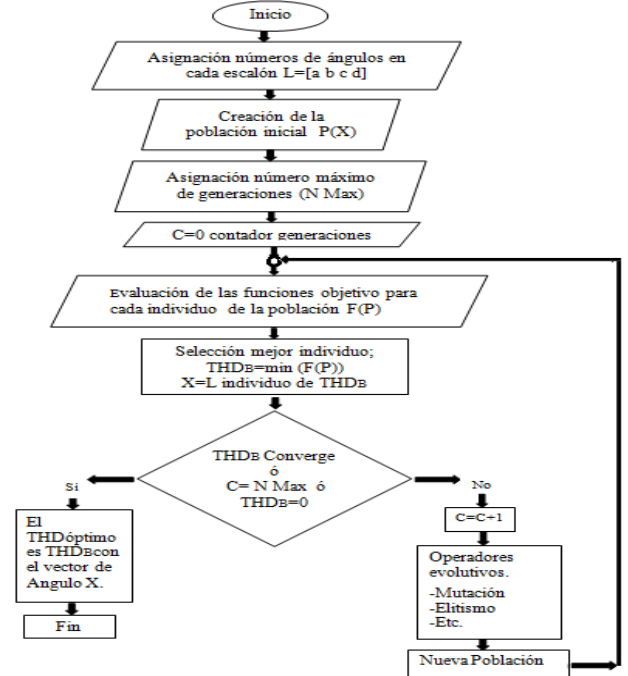


Fig. 5 Diagrama de flujo del algoritmo de optimización (GA) [10]

C. Resultados

El vector que define el número de ángulos de disparo en cada escalón es $L = [3 \ 3 \ 5 \ 15]$ lo que indica que en el primer y segundo escalón tendrá un pulso y medio, en el tercer escalón dos pulsos y medio, en el último escalón 7 pulsos y medio en el primer cuarto de onda de la tensión de fase. Los ángulos de disparo de la fase se resumen en la tabla I.

TABLA I:
ÁNGULOS EN GRADOS DEL MEJOR INDIVIDUO.

a=3	b=3	c=5	d=15		
4.49773775	13.1168297	25.7364969	41.6568196	55.96756	75.7506585
6.14367192	17.363004	25.7641888	43.6562008	60.3632193	77.3202818
6.89004623	20.3926027	33.8913355	46.6078223	64.1169061	78.8484826
		38.6503769	49.4147055	67.7818288	83.3440474
		41.3523091	53.2510282	70.5161107	85.5559006

El THDv de las tensiones de línea, de un sistema trifásico equilibrado, que utilice una modulación de fase de 9 niveles con los anteriores ángulos de disparo, teóricamente será de 0.0003262%.

IV. SIMULACIÓN

Para la realización de la simulación se utilizó un algoritmo de control igual al implementado en la FPGA para las pruebas experimentales, programado en Matlab/Simulink, la programación de este código se realizó a través de bloques “Matlab function” y se compila directamente en C.

En la figura 6 se muestra el esquema de simulación, en el cual se observan cuatro etapas fundamentales, como primera fase el convertidor de potencia, demarcado en un cuadro azul, en donde se muestran los seis puentes H junto con los transformadores a la salida de cada puente; en un segundo recuadro de color verde se observa la etapa de generación de las señales de control; en el recuadro naranja se demarcan los medidores de calidad de la energía y de valores RMS, por último en color morado se muestra e recuadro correspondiente al motor de inducción.

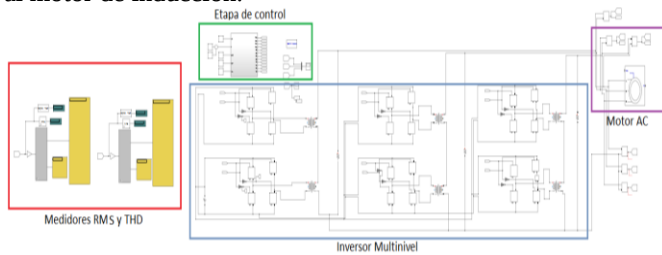


Fig. 6. Esquema de simulación

Los parámetros del motor de inducción seleccionado son: $P_{out}=746$ W, $V_1=220$ V, $f_n=60$ Hz, $R_1=5\ \Omega$, $L_1=3.18$ mH, $R_2'=5\ \Omega$, $L_2'=3.18$ mH; este motor fue seleccionado por tener parámetros similares al motor utilizado en la parte experimental.

A. Simulación en vacío

Para verificar el buen funcionamiento del convertidor a frecuencia nominal, se realizó la prueba de vacío. La forma de onda de la tensión de fase se muestra en la figura 7.

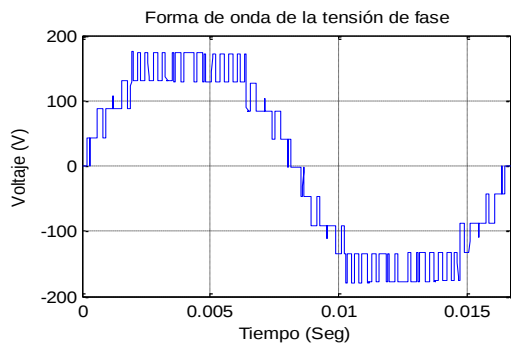


Fig. 7 Forma de onda de la tensión de fase

Como se observa en la anterior figura, la tensión de fase presenta 9 escalones, la forma de onda presenta un contenido armónico alto, debido a que la optimización se realiza directamente en las tensiones de línea. El THD de la tensión de fase es cercano al 11%.

El espectro armónico de la tensión de fase se muestra en la figura 7. En este se muestra que la presencia de armónicos triples (armónicos con orden múltiplos de 3) es notoria, sin embargo debido a la sustracción de las tensiones de fase, los armónicos triples al ser homopolares desaparecen de las tensiones de línea.

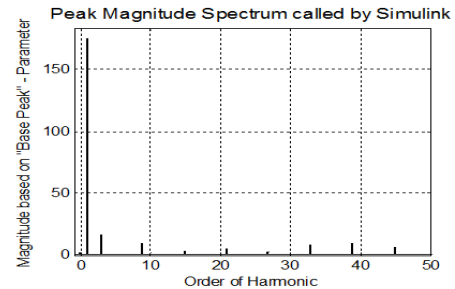


Fig. 7. Espectro armónico de la tensión de fase.

La forma de onda de la tensión de línea se muestra en la figura 8, en ella se percibe la presencia de 15 escalones en la modulación 6 escalones más que la modulación de fase.

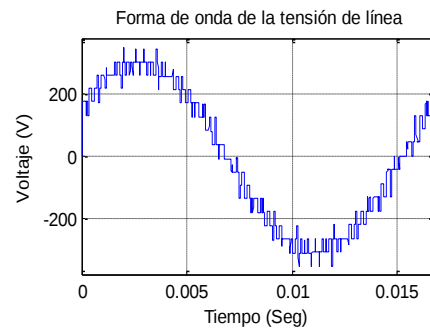


Fig. 8 Forma de onda de la tensión de línea.

El espectro armónico de la modulación de línea se muestra en la figura 9. Este espectro es prácticamente nulo debido a la optimización realizada; como era de esperarse los armónicos triples desaparecen.

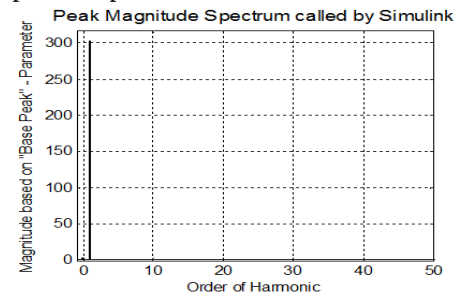


Fig. 9. Espectro armónico de la tensión de fase.

La tensión de línea presenta un THD de 0.273% y un valor RMS de 215.6 Voltios, aunque el THD es superior al 0.0003262% calculado por el algoritmo de optimización, (debido a la perturbación en la forma de onda que ejercen los transformadores a la salida del convertidor), el THD de línea presenta un valor muy cercano al cero por ciento, cumpliendo a cabalidad con la norma IEEE 519 [11] y el límite de 5% para redes de baja tensión.

Las formas de onda de las tres tensiones de línea se muestran en la figura 10, en esta se observa que el sistema trifásico es equilibrado y que las tres tensiones de línea poseen la misma forma de onda.

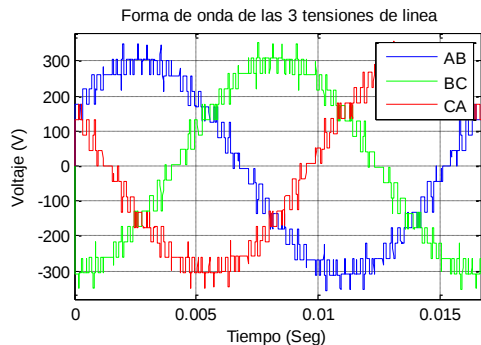


Fig. 10 Forma de onda de las tres tensiones de línea

B. Simulación con el motor

Al realizar el arranque a plena tensión con el convertidor multinivel, se observaron las corrientes estáticas de línea como se muestran en la figura 11, estas corrientes en el transitorio de arranque son bastante elevadas, debido a que el arranque es a plena tensión, sin embargo se observa que las formas de onda son sinusoidales, la corriente de estado estacionario se muestra en la figura 12, se observa que esta tiene una forma cercana a la sinusoidal, sin embargo, presenta algunas perturbaciones en la forma de onda.

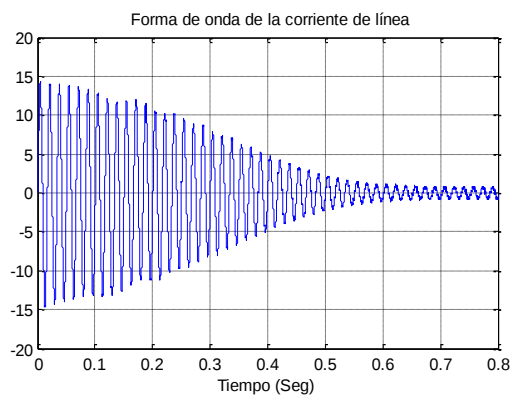


Fig. 11. Corrientes estáticas en el transitorio de arranque.

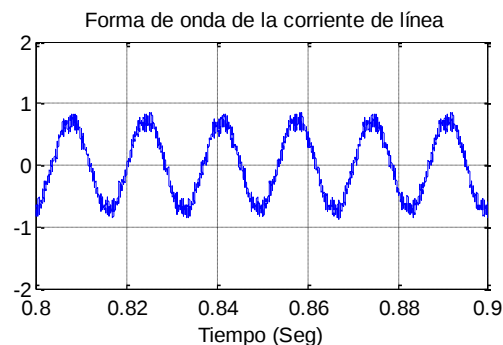


Fig 12. Forma de onda de la corriente de línea de estado estacionario.

En la figura 13 se muestra el contenido espectral de la forma de onda de la corriente cuando tiene un valor cercano a los 10 amperios RMS en el estado transitorio, se observa que el espectro es prácticamente nulo, sin embargo se percibe una pequeña presencia de armónicos de bajo orden que llevan a que el THD de corriente tenga un valor de 1.4%.

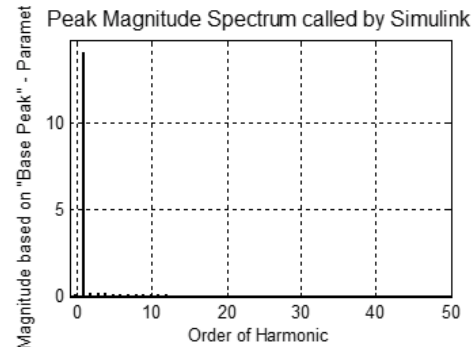


Fig. 13. Espectro armónico de la corriente con valor cercano a 10 A.

De igual forma, se muestra en la figura 14 el espectro armónico de la onda de corriente cuando tiene un valor de 0.5 A, que es el valor de estado estacionario.

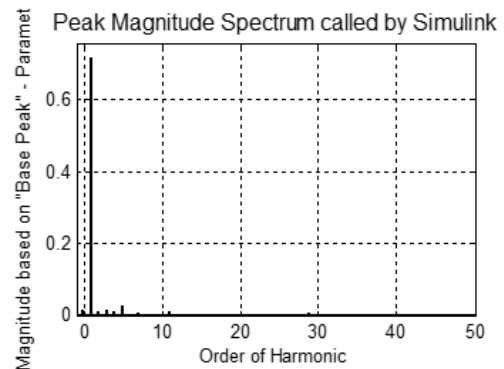


Fig. 14. Espectro armónico de la corriente en estado estacionario.

En ella observa una presencia de armónicos de bajo orden con magnitudes más apreciables que las de la corriente de estado transitorio, esto deduce que a mayor corriente el filtrado que se genera en los devanados de los transformadores y el motor sobre la forma de corriente es mayor.

El THD de la forma de onda de la corriente de estado estacionario es de 4.88%, un valor bastante alto para lo que se quiere realizar en este trabajo, sin embargo los resultados mejoran en las pruebas experimentales, debido a que los transformadores utilizados en el convertidor se diseñaron bajo una nueva metodología [12]

En la figura 15 se muestra la forma de onda de la corriente rotórica, se ve que en los momentos de gran inducción, la corriente tiene un valor alto, en esos intervalos de tiempo la forma de onda es prácticamente sinusoidal.

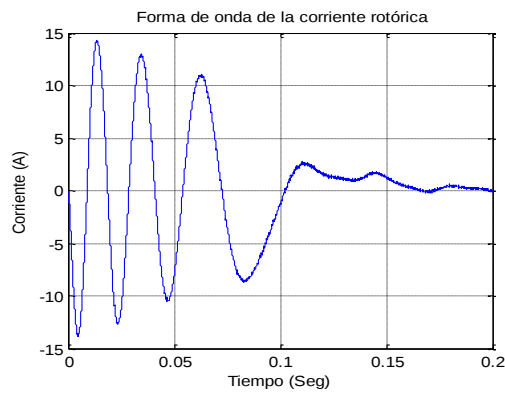


Fig. 15. Forma de onda de la corriente rotórica.

La corriente se asemeja mucho a una sinusoide debido al bajo contenido armónico de la alimentación. Esto disminuye los pares opuestos generados por los armónicos impares y disminuye las pérdidas de energía a causa del aumento de la corriente eficaz debido a la presencia de los armónicos, el beneficio de la alimentación de bajo contenido armónico se verá reflejado en el par y en la velocidad.

Un ejemplo de esto es el comportamiento de la velocidad que se muestra en la figura 16.

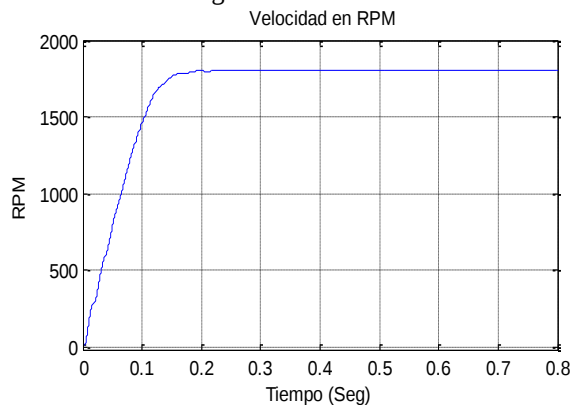


Fig. 16 Velocidad mecánica de la máquina en RPM

Se muestra que la velocidad tiene un comportamiento sin rizado, no existen perturbaciones ni grandes variaciones, tanto en el arranque como en el estado estable, esto evidencia la ventaja de alimentar el motor de inducción con el convertidor multinivel.

V. IMPLEMENTACIÓN

Para validar el funcionamiento del convertidor y verificar el beneficio y buen comportamiento de las variables eléctricas del motor de inducción frente a la alimentación con convertidor multinivel con optimización de armónicos, se realizaron pruebas de laboratorio, en las cuales se midió la calidad de la energía de las tensiones de línea suministradas por el inversor, se observaron también los valores RMS, la frecuencia de las tensiones, los valores RMS y formas de onda de las corrientes del estator. El montaje de las pruebas se muestra en la figura 17.



Fig. 17 Montaje de las pruebas.

Para medir el total de distorsión armónica en las tensiones de línea se utilizaron dos equipos: el osciloscopio Fluke 125 y el analizador de red Fluke 434. El analizador de red permite medir con alta precisión el contenido armónico de voltajes y corrientes en el rango de frecuencias cercanas a 50 ó 60 Hz, sin embargo, para verificar las formas de onda de las tensiones y las presencia de los pulsos se hace necesario utilizar el osciloscopio ya que este instrumento permite tener más precisión en la visualización.

Los valores nominales del motor elegido para las pruebas se muestran en la tabla II, corresponden a una conexión en Delta de los devanados estáticos.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS NOMINALES DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Datos	Valor
Tensión nominal	220V
Inominal	2.1 A
Potencia nominal	0.35 kW
Frecuencia	60 Hz
Aislamiento	Clase B

A. Resultados

En la figura 18 se muestra la forma de onda de la tensión de línea a una frecuencia de 60 Hz donde el nivel de tensión RMS es de 212.8 V. Se observa la correspondencia con la forma de onda teórica, sin embargo los pulsos más rápidos en el escalón superior no alcanzan a ser percibidos en la figura.

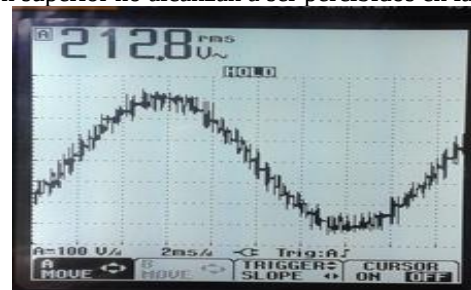


Fig. 18 Forma de onda de la tensión de línea a 60 Hz

La figura 19 muestra las tres formas de onda de la tensión de línea, capturadas por el analizador Fluke. Se observa que las formas de onda presentan el mismo comportamiento, aunque la resolución de visualización no es la mejor, lo cual no permite percibir de una buena manera la presencia de todos los pulsos en las tensiones de línea.

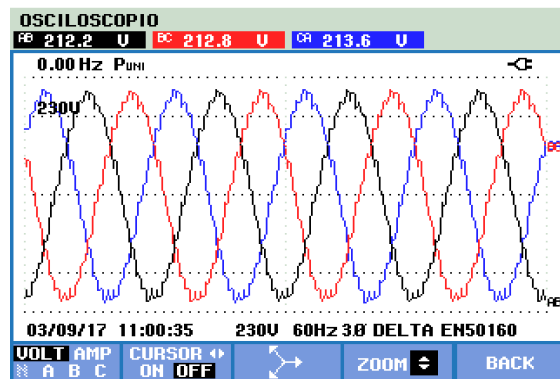


Fig. 19 Formas de onda de las tres tensiones de línea.

Los valores eficaces de las tensiones de línea tomadas por el analizador se muestran en la tabla III.

TABLA III
VALORES RMS DE LAS TENSIONES DE LÍNEA

Vrms línea AB	Vrms línea BC	Vrms línea CA
212.2 V	212.8 V	213.6 V

Los valores RMS de las tensiones de línea están desequilibradas debido a las pequeñas imperfecciones en la construcción de los transformadores de fase, el desbalance entra las tensiones de línea es menor que el desequilibrio entre las tensiones de fase, presentando un valor de 0.34%. La siguiente figura muestra el diagrama fasorial de las tres tensiones medidas en el analizador Fluke.

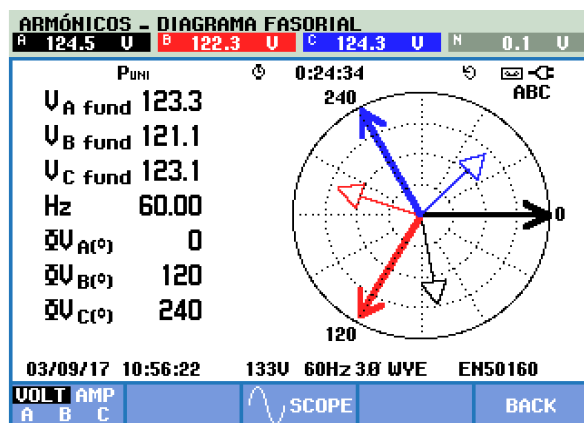


Fig. 20. Diagrama fasorial de las tres tensiones de fase.

La figura muestra que las diferencias de fase del sistema, de secuencia positiva ABC, es de 0, 120 y 240 grados eléctricos, de igual forma muestra los desfases de las corrientes que entran al motor, claramente se observa que el sistema es equilibrado.

La figura 21 muestra el espectro armónico de la tensión de línea obtenido en la prueba experimental.

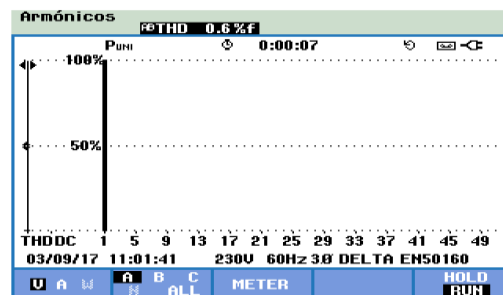


Fig. 21. Espectro armónico de la tensión de línea.

El espectro armónico dado, ratifica la optimización realizada por el convertidor que adopta la modulación encontrada por el algoritmo de optimización. El THD es de 0.6% superior al encontrado por el algoritmo de optimización; esto se debe a las pequeñas perturbaciones que ejercen los transformadores que utiliza el convertidor. Aunque el THDv de la prueba es mayor que el dado por la simulación, el THD es bastante bajo cumpliendo a cabalidad el estándar IEEE 519.

La figura 22 muestra el espectro de las tres tensiones de línea, en ella se evidencia que el comportamiento es idéntico en los tres voltajes.

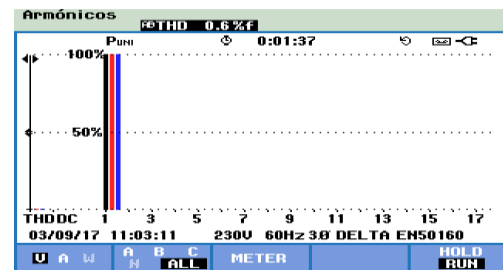


Fig. 22. Espectro armónico de las tres tensiones de línea.

La forma de onda de la corriente estáticas del motor junto con la tensión de línea se muestra en la figura 23. Se puede ver que la corriente, que está en atraso con respecto a la tensión, es prácticamente sinusoidal, hecho que se ratifica en la figura 22 en donde se muestran las tres formas de onda de la corriente de línea, capturadas por el analizador Fluke.

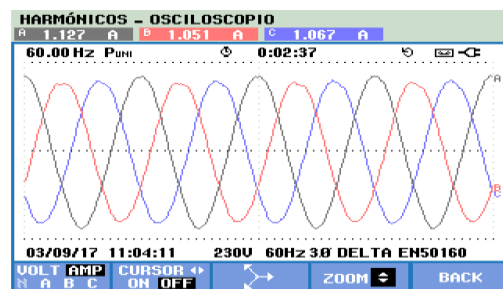


Fig. 23 Formas de onda de las tres corrientes de línea.

La figura 24 muestra el espectro obtenido en la prueba. Se observa que existe una presencia de armónicos de bajo orden 2, 3, 4 y 5 esto debido a la forma de onda de corriente que el motor demanda. Sin embargo el THD es de 2,3% un valor muy inferior al valor de la simulación.

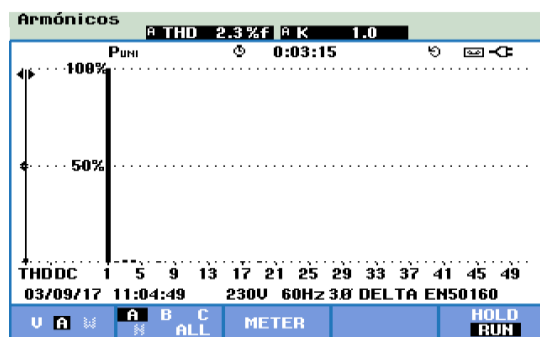


Fig. 24 Espectro armónico de la corriente de línea

La figura 25 se muestra el espectro de las tres corrientes de línea, en ella se evidencia que el comportamiento es idéntico en las tres corrientes.

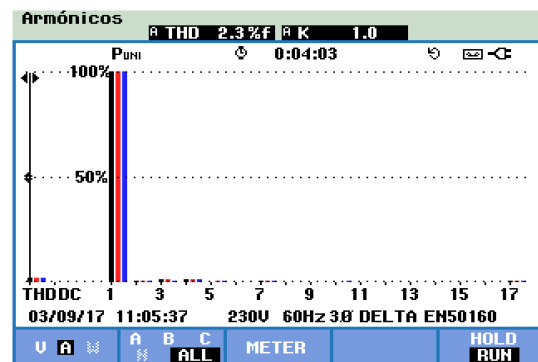


Fig. 25. Espectro armónico de las tres corrientes de línea.

VI. CONCLUSIONES

El valor del THD de las tensiones de línea evidencia la adecuada optimización realizada por el algoritmo, ya que en todas las pruebas el THD estuvo por debajo del límite establecido por la IEEE-519 de 5%. Presentándose el THD más bajo en un valor de 0.9% y el más alto en 3%, que son valores excelentes en cuanto a optimización se refiere y que supera con creces el estándar establecido.

Los resultados en cuanto al THD de la tensión de línea, refleja el buen diseño del convertidor, ya que este es capaz de reproducir las formas de onda calculadas de una manera casi exacta. Aunque el convertidor utiliza transformadores a la salida de los puentes H, el diseño de los mismos minimiza las perturbaciones que ellos puedan generar, es por esta razón que el THD es muy bajo a pesar de que se utilicen transformadores a frecuencia variable.

El comportamiento del THDi en todas las pruebas fue bastante bueno, ya que este se mantiene por debajo del 5% y los aportes de cada uno de los armónicos es prácticamente insignificantes. Claramente se observa en las pruebas que el THDi depende de la frecuencia y del filtrado de las inductancias del motor así como la de los transformadores, presentándose diversos valores, todos inferiores.

La alimentación del motor de inducción con convertidor de potencia multinivel y optimización de armónicos desarrollado este trabajo ofrece ventajas para el adecuado funcionamiento del motor de inducción, como la reducción de las componentes armónicas de la corriente y tensión, lo cual disminuye el rizado en el par electromagnético, en la velocidad y las corrientes, de esta manera se evitan problemas como pares opuestos, sobrecalentamiento y demás inconvenientes asociados a la distorsión armónica.

Si se compara la simulación con la validación experimental, en las simulaciones se presentan mayores perturbaciones en cuanto a las formas de onda, esto se debe a que en la simulación se utilizaron modelos de transformadores convencionales, y para construir el prototipo se utilizó una nueva metodología de diseño para estas aplicaciones [12]. Los transformadores calculados bajo esta nueva metodología se comportaron de manera adecuada, sin saturarse, brindando excelentes resultados.

REFERENCIAS

- [1] J. Mora, Máquinas Eléctricas, McGraw Hill, 2005.
- [2] P. Vas, Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford: Clarendon Press, 1998.
- [3] M. A. Sanchez, Calidad de la energía eléctrica, Instituto Tecnológico de Puebla: México, 2009.
- [4] Y. Mehmet, V. Seydi and V. y. H. C. Seci, "Comparison of Output Current Harmonics of Voltage Source Inverter used Different PWM Control Techniques", WSEAS Transactions on Power Systems, pp. 696-703, 2008.
- [5] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley and S. D. Umans, Electric Machinery, Sexta edición ed., McGraw Hill, 2003.
- [6] G. Barbera, H. G. Mayer and F. Issouribehere, "Medición de la emisión armónica en variadores de velocidad y desarrollo de modelos de simulación," in Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRE 2009., 2009.
- [7] M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodríguez and M. Pérez, "A Survey on Cascaded Multilevel Inverters," IEEE Trans. on Ind. Elect, pp. 2197-2206, 2010.
- [8] S. Manasa, "Design and simulation of three phase five level and seven level inverter fed induction motor drive with two cascaded h-bridge configuration," international journal of electrical and electronics engineering, p. 2231 – 5284, 2012.
- [9] J. L. Díaz Rodríguez, L. D. Pabón Fernández and A. Pardo García, "THD improvement of a PWM cascade multilevel power inverters using genetic algorithms as optimization method," WSEAS transaction on Power Systems, vol. 10, pp. 46-54, 2015.
- [10] L. D. Pabón Fernández, J. L. Díaz Rodríguez and A. Pardo García, "Total harmonic distortion optimization of the line voltage in single source cascaded multilevel converter," WSEAS transaction on Systems, vol. 10, pp. 110-120, 2016.
- [11] IEEE, "IEEE Std. 519-1992 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", IEEE, 1992.
- [12] J. L. Díaz Rodríguez, L. D. Pabón Fernández and E. A. Caicedo Peñaranda, "Novel methodology for the calculation of transformers in power multilevel converters," Ingeniería y competitividad, vol. 17, no. 1, 2015.