

Relationship between the performance indicators of a cascaded 9 levels three-phase multilevel inverter.

Jorge Luis Díaz Rodríguez, Ms., Luis David Fernández Pabón, Ms. and Javier Gelvez Carvajal, Eng.
Universidad de Pamplona, Colombia, jdiazcu@email.edu, davidpabon@hotmail.es

Abstract– *This paper studies and verifies the existence or not of some relation between the performance and the value of the total harmonic distortion (THD) in three-phase cascaded multilevel bridge inverters. With this objective, these parameters are experimentally evaluated in a three-phase multi-level power converter of cascade H bridges, with nine steps per phase, compared to different modulations that have optimized harmonic content through the use of genetic algorithms.*

Keywords- *Multilevel inverter, CMLI, PWM, PWM multinivel, THD, performance.*

Digital Object Identifier (DOI):<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.247>
ISBN: 978-0-9993443-1-6
ISSN: 2414-6390

Relación entre los indicadores de desempeño de un inversor trifásico en cascada de 9 niveles

Jorge Luis Díaz Rodríguez, Ms., Luis David Fernández Pabón, Ms. and Javier Gelvez Carvajal, Eng.
Universidad de Pamplona, Colombia, jdiazcu@email.edu, davidpabon@hotmail.es

Abstract– En este artículo se estudia y verifica la existencia de alguna relación entre el rendimiento y el valor de la distorsión armónica total (THD) en inversores trifásicos multinivel tipo puente H en cascada. Con este objetivo se evalúa de forma experimental estos parámetros en un convertidor de potencia trifásico multinivel de puentes H en cascada, de nueve escalones por fase, frente a diferentes modulaciones que poseen contenido armónico optimizado mediante el uso de algoritmos genéticos.

Keywords– Inversor multinivel, CMLI, PWM, PWM multinivel, THD, rendimiento.

I. INTRODUCCIÓN

La conversión DC-AC, busca a partir de fuentes de corriente directa obtener ondas de corriente alterna para alimentar máquinas de AC (corriente alterna) a partir de estrategias llamadas PWM, estas técnicas conllevan problemas de distorsión armónica y de conmutación [1]. La aparición de la conexión de interruptores de potencia junto con varias fuentes de directa aparece como una posible solución. Sin embargo, conseguir una distribución estática y dinámica de tensión entre los interruptores se convierte en un problema que llevó al desarrollo de la nueva familia de convertidores, llamados convertidores multinivel [2], [3].

A pesar de que la idea de la utilización de múltiples niveles de tensión para realizar la conversión eléctrica fue propuesta en el año de 1975 por Baker y Lawrence en su patente en Estados Unidos [4], el primer convertidor multinivel se implementa con el inversor de tres escalones introducida por Nabae, Takahashi y Akagi en 1981 [5]. Posteriormente, varias topologías de convertidores multinivel han sido desarrollados [6], que tienen en común el concepto elemental de alcanzar ondas de tensión escalonadas que estén más cercanas a una onda sinusoidal.

Las tecnologías de inversores de potencia multinivel han alcanzado un alto nivel de desarrollo durante las últimas décadas y se han propuesto gran cantidad de topologías de convertidores. Hoy en día, los inversores multinivel cada vez son más populares en la industria, gracias a la creciente demanda de potencia y calidad de la energía, el convertidor multinivel se convierte entonces en una alternativa debido sus ventajas en reducción de la distorsión armónica y baja emisión electromagnética [3].

En la actualidad, se investigan nuevas maneras de hacer más eficientes los inversores, centrando las investigaciones en aspectos fundamentales como la simplificación del control en diferentes aplicaciones como las fotovoltaicas[7], nuevos algoritmos para mejorar el THD [8-9], nuevas topologías y

estrategias de conmutación que permitan mejorar el rendimiento o eficiencia del convertidor [10], es por esto que esta investigación busca determinar si existe una relación directa entre la optimización del THD y la mejora o disminución del rendimiento propio del convertidor.

II. INVERSORES MULTINIVEL

2.1 Inversor Multinivel en Cascada con Fuente Común

El convertidor de puentes H en cascada de fuente común, utiliza una fuente de directa conectada a varios puentes H, cada puente en su salida posee un transformador el cual se conecta, por el secundario, en cascada con el devanado secundario de los transformadores adyacentes, de esta manera se consigue el aislamiento galvánico necesario para obtener una onda escalonada a partir de una sola fuente en corriente directa [11]. La figura 1 muestra el funcionamiento de este tipo de convertidor, cuando los transformadores de cada etapa tienen la misma relación de transformación [12].

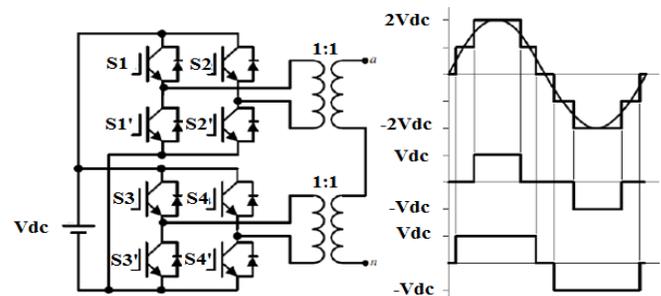


Fig. 1 Inversor multinivel de fuente común simétrico.

Utilizando transformadores de diferentes relaciones de transformación se puede construir un inversor asimétrico de Fuente común, el cual tendrá más escalones en el voltaje de salida; si se seleccionan relaciones de transformación múltiplos de tres, es decir cada transformador tiene un valor de tensión en el secundario igual a tres veces el valor del secundario del transformador del puente anterior, se maximiza la cantidad de niveles de salida del inversor, un ejemplo de esto es el convertidor de dos etapas, que en esta configuración llega a alcanzar nueve niveles en la tensión de salida. El funcionamiento de este convertidor se muestra en la figura 2 [13].

En este trabajo se considera el uso de un convertidor multinivel trifásico de fuente común de nueve niveles por fase, ya que permite obtener el máximo de niveles con el mínimo de etapas, el esquema de este tipo de inversor se muestra en la figura 3 [14].

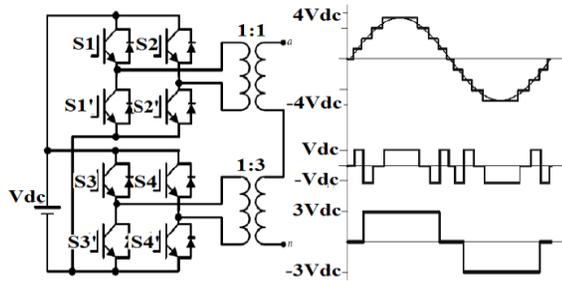


Fig. 2 Convertidor multinivel de fuente común asimétrico de nueve niveles.

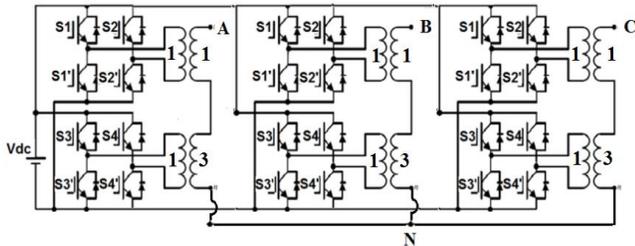


Fig. 3 Convertidor multinivel trifásico de fuente común asimétrico de nueve niveles por fase.

2.2 Modulaciones optimizadas

Para realizar el estudio del rendimiento vs THD en el convertidor mencionado, se determinaron 35 modulaciones de nueve escalones por fase y optimizadas según la distorsión armónica total, las cuales fueron la base del análisis en este estudio. Las modulaciones se determinaron mediante un algoritmo genético en Matlab realizado en un trabajo previo de los autores [14]. Este algoritmo optimiza el THD utilizando la ecuación 1.

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

Donde, n toma valores de impar no múltiplo de tres, es decir 5, 7, 11, 13, 17, ... etc. y L_i son los componentes del vector $L = [a \ b \ c \ d]$. De esta manera (1) define la función objetivo a minimizar mediante el algoritmo de optimización. 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:

$$X = [\alpha_{11} \alpha_{12} \dots \alpha_{1x} \alpha_{21} \alpha_{22} \dots \alpha_{2y} \alpha_{31} \dots \alpha_{3z} \alpha_{41} \dots \alpha_{4w}] \quad (2)$$

Acompañado del vector L , que indica al programa encargado de evaluar la función fitness los ángulos que corresponden a cada escalón. El algoritmo de optimización se encargó de hallar 35 modulaciones con diferentes ángulos de disparo y diferentes conmutaciones, con el fin de determinar una curva THD vs rendimiento para observar la relación.

Como resultado del algoritmo de optimización, se dan 35 modulaciones, para cada una de ellas se define un vector L , que muestra el número de ángulos de disparo en cada escalón en el primer cuarto de onda de la modulación de fase, por ejemplo $L = [3 \ 3 \ 5 \ 9]$ indica que en el primer y segundo escalón se tendrá un pulso y medio, en el tercer escalón dos pulsos y medio, en el último escalón 4 pulsos y medio en el primer cuarto de onda de la tensión de fase; el algoritmo también da el valor de los ángulos en grados eléctricos y calcula el THD de línea teórico.

Como muestra de las modulaciones encontradas se presenta la modulación $L = [3 \ 3 \ 5 \ 9]$, que presenta los ángulos de disparo mostrados en la tabla 1. La distorsión armónica total de voltaje (THDv) de las tensiones de línea, de un sistema trifásico equilibrado, que utilice una modulación de fase de nueve escalones con los anteriores ángulos de disparo, teóricamente será de 0.000132%.

TABLA I
ÁNGULOS [EN GRADOS] PARA LA MODULACIÓN $L = [3 \ 3 \ 5 \ 9]$.

a=3	b=3	c=5	d=9	
5.70241538	18.229993	34.4310184	53.386964	73.2043847
9.94093425	24.218687	34.7242607	55.288426	73.2387503
12.51467958	26.1824422	36.5706369	60.479581	78.4542332
		45.0850569	64.6966	81.6462089
		47.1467285	67.878653	

Estos ángulos generan las formas de onda de la tensión de fase que a su vez generan las tensiones de línea, como ejemplo de estas formas de onda se muestra en la figura 5. la forma de onda de fase de la modulación $L = [3 \ 3 \ 3 \ 5]$.

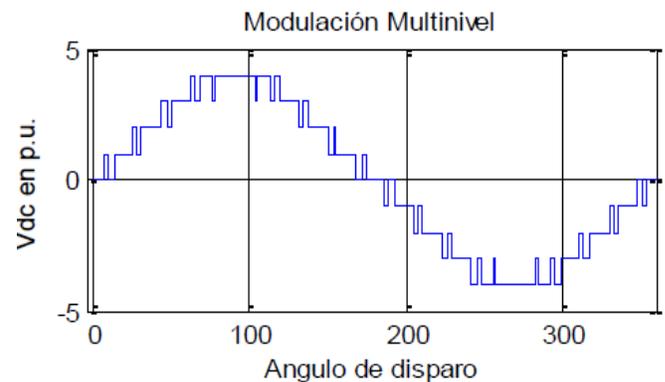


Fig. 4 Forma de la tensión de fase para la modulación $L = [3 \ 3 \ 3 \ 5]$.

Esta tensión de fase, desfasada 120° y 240° , genera el sistema de tensiones trifásicas de línea mostrada en la figura 5. Estas tensiones presentan más niveles que las de fase y más pulsos, lo que conlleva a que el espectro de línea sea mejor que el de fase, esto se puede observar en las figuras 6 y 7 en donde se muestran los espectros de fase y de línea respectivamente.

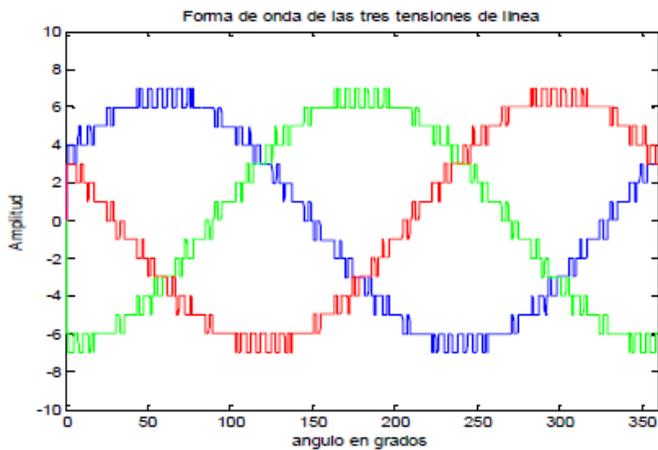


Fig. 5 Sistema trifásico de tensiones.

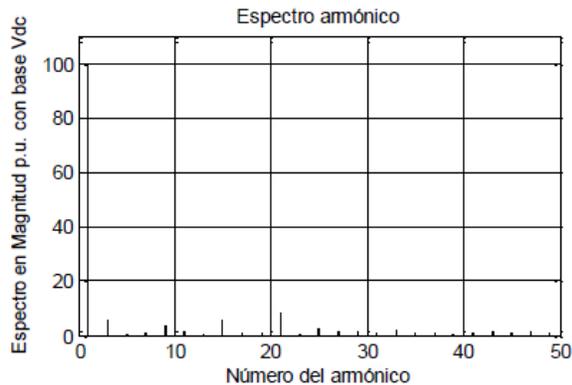


Fig. 6 Espectro armónico de la modulación de fase.

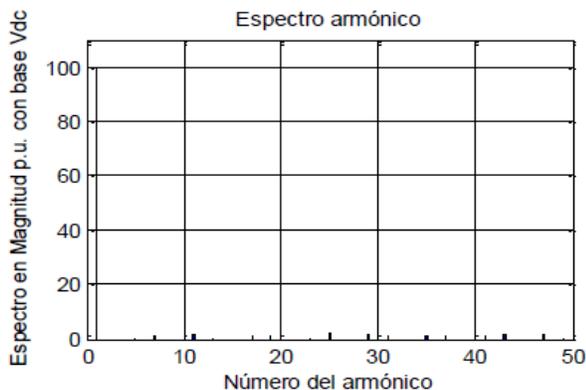


Fig. 7 Espectro armónico de la modulación de línea.

En las figuras anteriores se observa que el espectro armónico de las tensiones de línea es más limpio que el de las tensiones de fase, esto se debe a que los armónicos múltiples de tres desaparecen totalmente por la diferencia de potencial entre las fases.

Como muestra de las 35 modulaciones encontradas se presenta la tabla 2, la cual se un fragmento de la tabla completa., esta solo muestra los primeros cinco ángulos de cada modulación.

TABLA II
FRAGMENTO DE LA TABLA DE MODULACIONES.

N	L	THD línea	Ángulos en grados eléctricos				
1	1 1 1 1	5.0509	5.0509	10.0386	23.9784	42.1747	60.1914
2	1 1 3 3	8.2806	8.2806	9.7824	21.6705	35.7313	38.6087
3	3 3 3 3	2.9665	2.9665	9.5784	18.0187	19.0929	28.5919
4	3 3 3 5	1.5393	1.5393	6.0958	8.5106	12.6224	24.8590
5	3 5 5 5	10.9301	10.9301	8.6267	10.5007	14.9117	18.8358
6	5 5 5 5	0.0001	5.0509	10.0386	23.9784	42.1747	60.1914

2.3 Implementación

Para realizar las pruebas experimentales, se implementó un prototipo de inversor trifásico según la topología seleccionada [14], basado en el uso de mosfets como dispositivos de conmutación. La potencia del convertidor es de 2100 VA nominales, el voltaje de entrada es de 48 Vdc, con el fin de que se aplicable a sistemas fotovoltaicos de bajo costo en los cuales sólo se tenga uno o dos bloques acumulador de esta tensión, la frecuencia nominal 60 Hz, y la tensión nominal de salida de 127 Vrms en fase y 220 Vrms de línea. El control del convertidor se realiza sólo con doce señales, las necesarias para controlar los mosfets superiores de los puentes, los inferiores se controlan mediante la negación de las 12 señales de control principales y la asignación de tiempo muerto se realizó junto con la negación por hardware. En la figura 8 se muestra una fotografía del prototipo sin carcasa con las respectivas partes que lo componen.

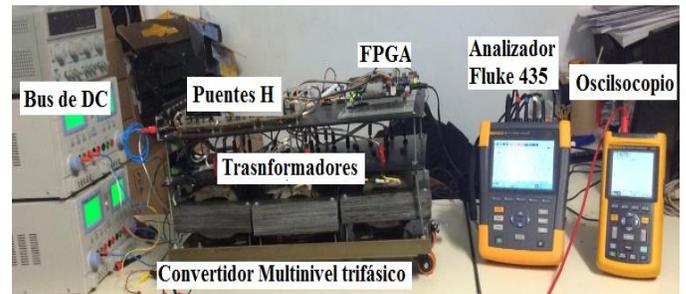


Fig. 8 Prototipo utilizado para las pruebas de validación del contenido armónico.

III. RESULTADOS

3.1. Pruebas experimentales

Las pruebas realizadas para determinar la relación de rendimiento vs THD se efectuaron con cargas inductivas; se alimentó el convertidor con tensión nominal y se alimentó un motor de inducción de rotor bobinado de medio caballo de fuerza, en conexión Δ de 230 V, a través del inversor; se midieron las tensiones y corrientes de salida del convertidor con el osciloscopio y el analizador *Fluke 435*, para evaluar los parámetros de calidad de la energía relacionados con la forma de onda de tensión y de corriente. El analizador *Fluke 435* tiene una opción para medir el rendimiento de convertidores de potencia trifásicos, opción ideal para este trabajo.

Para aumentar la potencia de salida, al motor de inducción se le acopla un generador de corriente directa, el cual entregaba energía a un reóstato, al variar el reóstato se puede controlar de manera directa la potencia de salida del inversor, el montaje de la prueba se muestra en la figura 9.

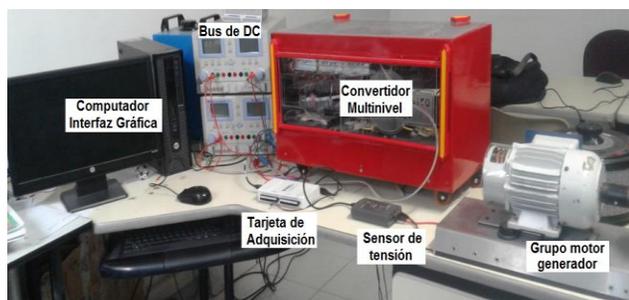


Fig. 9 Montaje de la prueba.

Como muestra de los resultados, se presentan el rendimiento medido para una modulación al azar, en este caso la modulación $L = [1\ 1\ 3\ 3]$, los datos dados por el analizador Fluke se observan en la figura 10. El rendimiento del convertidor es del 77% aproximadamente.



Fig. 10 Rendimiento en la modulación $L = [1\ 1\ 3\ 3]$.

De igual forma para esta modulación el THD de la tensión de línea, junto con el espectro se pueden observar en la figura 11, la distorsión armónica total es de sólo 3.3%.

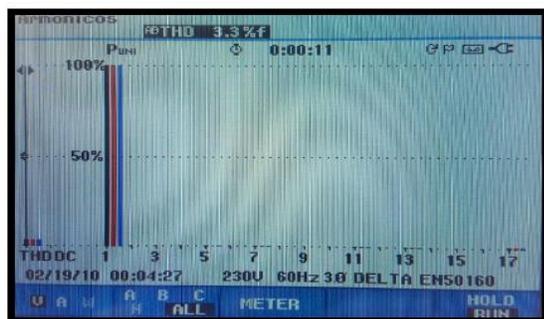


Fig. 11 THD de la modulación $L = [1\ 1\ 3\ 3]$.

Un fragmento de la tabla del consolidado de los resultados de la medición de las 35 modulaciones se muestra en tabla 3.

TABLA III.
FRAGMENTO DE LA TABLA DEL CONSOLIDADO DE LAS MEDICIONES.

L	THD línea	THD línea med.	THD fase	THD fase med.	Pin	Pout	V	Rend.
1 1 3 3	3.20%	3.3%	8.5%	8.2%	323.8	249.1	195.3	76.9%
3 3 3 3	3.10%	2.8%	13.5%	15.3%	307.7	236.3	178.5	76.8%
3 3 3 5	2.60%	1.6%	11.5%	11.3%	311.3	237.4	180.1	76.3%
3 5 5 5	1.50%	1.5%	12.5%	18.6%	315.4	329.1	159.1	75.8%
5 5 5 5	0.60%	0.8%	11.6%	16.1%	317.2	242.3	163.0	76.4%
3 5 5 7	0.60%	0.8%	12.5%	15.2%	309.0	236.5	172.7	76.5%

En la anterior tabla se relacionan todas las variables medidas, como se observa en todas las modulaciones el THD de fase es más alto que el de línea, los rendimientos están alrededor de 70 a 77%, sin embargo a simple vista no se observa una relación clara entre el THD y el rendimiento, de igual forma no hay una relación clara con respecto al número de conmutaciones, ya que en teoría a mayor número de conmutaciones las pérdidas aumentarían y el rendimiento disminuiría, sin embargo las modulaciones $L = [1\ 1\ 1\ 15]$ y $L = [1\ 1\ 1\ 17]$ presentan un comportamiento diferente ya que la modulación con mayor número de conmutaciones tiene mejor rendimiento que la de menos conmutaciones.

Para conocer la relación que existe entre las variables de estudio (THD y rendimiento), se realizó el análisis con la correlación de Pearson, el cual a través de un coeficiente determina la correlación que existe entre las variables; esta se obtiene de la sumatoria de los resultados de las mediciones, este coeficiente tiene como rango desde 1 hasta -1, donde 1 positivo es una correlación máxima entre estas variables, si este coeficiente se acerca a 0 la relación se hace nula, cuando el resultado es un signo negativo la correlación de Pearson tiende a ser inversa.

Generalmente, correlaciones entre ± 0.15 y ± 0.10 se consideran como bajas; entre ± 0.30 y ± 0.40 como moderadas, entre ± 0.50 y ± 0.70 como moderadamente altas; entre ± 0.80 y ± 0.90 como altas; y más de ± 0.90 muy altas. El análisis de las variables, en este trabajo, se realizó en el software estadístico SPSS, el cual es una herramienta útil en este tipo de análisis.

3.2. Relación rendimiento y THD

En el estudio de relación “rendimiento vs THD” el coeficiente de correlación de Pearson tiene un valor de +0.010, lo cual resulta en una correlación baja casi nula, por lo cual se concluye que la relación entre las variables no existe.

Como se puede observar en la anterior figura 12.a., los datos son muy dispersos, ya que modulaciones con un THD muy cercano presentan rendimientos relativamente distantes; si se observa el rango de variación del rendimiento, se puede concluir que es de cerca del 5%, un rango pequeño pero significativo.

IV. CONCLUSIONES

Al analizar el aumento o disminución de conmutaciones en los escalones de la modulación *Step* y su relación con el THD, se puede evidenciar que el aumento de las conmutaciones en los niveles superiores genera una disminución de la distorsión armónica total y si las conmutaciones aumentan en escalones inferiores el nivel de THD aumenta, lo cual deja en claro que para optimizar el THD es muy conveniente aumentar el número de pulsos en los escalones superiores de la modulación multinivel.

En cuanto a los espectros armónicos medidos en las tensiones de fase, en cada una de las pruebas y modulaciones, se evidenció que los componentes presentes son los múltiplos de tres, ya que estos armónicos se eliminan en las tensiones de línea por la diferencia de potencial entre las dos fases y el algoritmo de optimización utilizado opera directamente en las tensiones de línea.

No existe relación directa entre la distorsión armónica total (THD) de la tensión de línea y el rendimiento del convertidor, como se evidenció en los datos presentados, dos modulaciones que tienen distorsiones similares pueden presentar rendimientos completamente diferentes.

Le rendimiento efectivamente dependerá del número de conmutaciones, sin embargo la posición de las conmutaciones en los escalones de la modulación multinivel también influye, ya que dos modulaciones pueden tener el mismo número de conmutaciones en total, pero si en una se colocan más pulsos en la parte superior que inferior, el rendimiento será un poco menor, un ejemplo de esto, son las modulaciones $L1=[1\ 1\ 1\ 17]$ y $L2=[5\ 5\ 5\ 5]$, ya que $L1$ tiene un rendimiento del 74% y $L2$ de 76,4%, efectivamente la que distribuye mejor los pulsos tiene mayor rendimiento, esto se debe a que no conmuta tanto el puente de mayor potencia.

No existe relación directa entre la distorsión armónica total de la tensión de fase y el rendimiento del convertidor, como se evidenció en los datos presentados, dos modulaciones que tienen distorsiones similares pueden presentar rendimientos completamente diferentes. Se recomienda en próximos trabajos determinar la relación entre el rendimiento y el número de pulsos en cada uno de los escalones, con el fin de establecer qué número de pulsos es el adecuado en cada escalón para obtener el máximo rendimiento y de esta manera buscar optimizar el THD en términos de ese número de ángulos de disparo en cada escalón.

REFERENCIAS

- [1] J. L. Diaz Rodríguez, L. D. Pabon Fernández, y I. Torres Chávez, Comparative analysis of harmonic distortion in power inverters, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 2012, Vol. 1, No. 19.
- [2] J. A. Araque, J. L. Diaz Rodríguez, y O. E. Gualdrón, Optimización del THD en un convertidor multinivel monofásico usando algoritmos genéticos, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol. 1, No. 21, 2013.
- [3] M. Malinowski, K; Gopakumar, J. Rodriguez, and M. Pérez, "A Survey on Cascaded Multilevel Inverters", IEEE Trans. on Ind. Elect., Vol. 57, N. 7, pp. 2197-2206, July 2010.

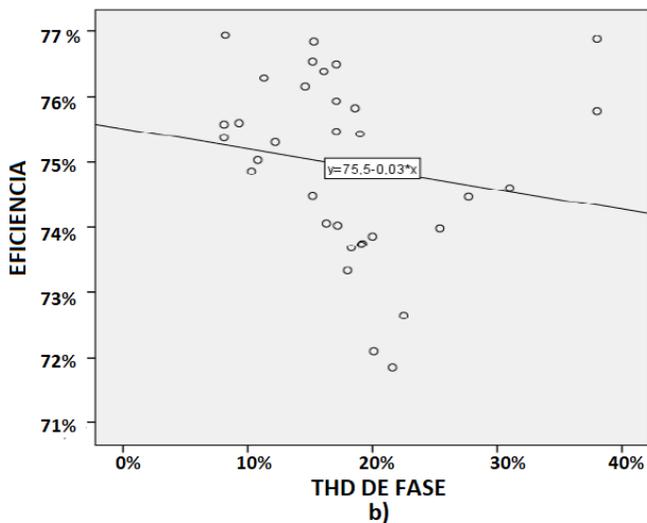
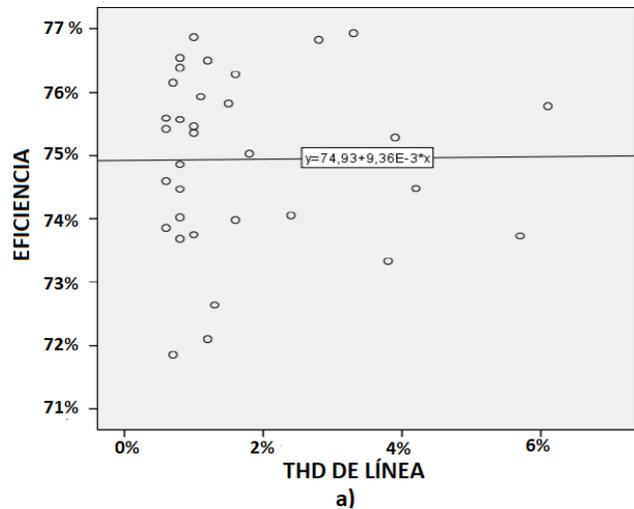


Fig. 12 a) Rendimiento vs. THD del voltaje línea.
b). Rendimiento vs. THD del voltaje de fase.

Para el caso de la relación entre la distorsión armónica total de fase y el rendimiento, se aprecia que el índice de correlación es de 0.168 nuevamente se presenta una baja correlación entre las variables. La figura 12.b. muestra la gráfica de dispersión de este análisis, donde se demuestra la poca relación entre las variables.

Al igual que en la relación anterior se observar en que los datos son muy dispersos, ya que modulaciones con un THD muy cercano presentan rendimientos relativamente distantes; si se observa el rango de variación del rendimiento, se puede concluir nuevamente que es de cerca del 5%, un rango pequeño pero significativo. Es claro que los THD de fase son mucho más grandes que los de línea, esto se debe a que el algoritmo de optimización opera directamente en línea y por ende, los armónicos múltiplos de tres que no existen en las líneas, aparecen en las fases.

- [4] R. H. Baker and H. B. Lawrence, Electric Power Converter, US. Patent Number 3,867,643, 1975.
- [5] A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi. "A new neutral point clamped PWM inverter", IEEE Trans. Ins. Appl., vol. IA-17, N. 5, pp.518-523, Sep-Oct, 1981.
- [6] I. Colak, E. Kabalci and R. Bayindir, Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes, Energy Conversion and Management, Vol. 52, Issue 2, pp. 1114-1128, Feb. 2011.
- [7] M. Barghi Latran, A. Teke, Investigation of multilevel multifunctional grid connected inverter topologies and control strategies used in photovoltaic systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 42, pp. 361-376, Feb. 2015.
- [8] T. Sudhakar Babu, K. Priya, D. Maheswaran, K. Sathish Kumar, N. Rajasekar, Selective voltage harmonic elimination in PWM inverter using bacterial foraging algorithm, Swarm and Evolutionary Computation, Vol. 20, pp. 74-81, Feb. 2015.
- [9] A. M. Amjad, Z. Salam, A review of soft computing methods for harmonics elimination PWM for inverters in renewable energy conversion systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 33, pp. 141-153, May 2014.
- [10] A. M. Mahfuz-Ur-Rahman, M. M. Islam and M. R. Islam, "Performance analysis of modulation techniques in multilevel inverters for direct grid connected photovoltaic arrays," 2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), Dhaka, Bangladesh, pp. 66-69, 2016.
- [11] L. D. Pabon Fernandez, E. A. Caicedo Peñaranda, J. L. Diaz Rodriguez, y A. Pardo Garcia. "Configurable converter for performance assessment of cascaded multilevel power converters". WSEAS Transactions On Power Systems, Vol. 11, pp. 199 - 209, 2016.
- [12] L. D. Pabon Fernandez, J. L. Diaz Rodriguez and E. A. Caicedo Peñaranda, "Comparative analysis of harmonic minimization in a 5 levels cascaded multilevel converter," 2016 IEEE ANDESCON, Arequipa, Peru, pp. 1-4, 2016.
- [13] J. L. Diaz Rodriguez, L. D. Pabon Fernandez, y A. Pardo Garcia, THD Improvement of a PWM Cascade Multilevel Power Inverters Using Genetic Algorithms as Optimization Method, WSEAS Transactions On Power Systems, Vol. 10, No. 1, Greece, pp. 46-54, 2015.
- [14] L. D. Pabon Fernandez, J. L. Diaz Rodriguez and A. Pardo Garcia, "Total harmonic distortion optimization of the line voltage in single source cascaded multilevel converter", WSEAS Transactions On Systems, ed. WSEAS Press, Vol.: 15, pp. 199 - 209, 2016.