

Comportamiento con carga de un inversor multinivel fuente común con transformadores a la salida

Jorge Luis Díaz Rodríguez

Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia
E-mail: jdiazcu@gmail.com

Luis David Pabón Fernández

Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia
E-mail: davidpabon@hotmail.es

Anderson Américo Andrade Acero

Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia
E-mail: andersonandradeacero@gmail.com

ABSTRACT

This work deals with the design, development and testing of the behavior under load of a three-stage common source (27 steps) multilevel converter. Prototype implementation is carried by adopting firing angles calculated to achieve a harmonic distortion of 1.1% for the first 40 harmonics taking into account the requirements of IEEE Standard 519. The developed prototype is tested with domestic loads, evaluating the behavior of variables such as voltage regulation, the behavior of the harmonic distortion and other technical aspects of the power converter.

Keywords: Multilevel converter, transformer, total harmonic distortion, load behavior.

RESUMEN

Este trabajo trata del diseño y análisis bajo carga del comportamiento de un convertidor multinivel fuente común de tres etapas (27 escalones). Se realiza la implementación del prototipo adoptando ángulos de disparo calculados para lograr una distorsión armónica de 1.1% hasta los primeros 40 armónicos teniendo en cuenta los requerimientos del estándar IEEE 519. El prototipo desarrollado se prueba con cargas domésticas, evaluando el comportamiento de variables como la regulación de tensión, el comportamiento de la distorsión armónica y otros aspectos técnicos del convertidor de potencia.

Palabras claves: Convertidor multinivel, transformador, distorsión armónica, comportamiento en carga.

1. INTRODUCCIÓN

En la sociedad e industria actual se emplea una variedad de equipos electrónicos vinculados al control de procesos, accionamiento, procesamiento, comunicaciones y transmisión de información, que conectados a la red eléctrica afectan directamente la calidad de la energía de los sistemas de distribución (Sánchez, 2009). Un ejemplo de estos equipos son los convertidores de potencia, que son comercializados en productos estándar y que alimentan una amplia gama de aplicaciones, tales como compresores, bombas, ventiladores, motores de arranque de turbina de gas, compensación de potencia reactiva, conversión de la energía eólica, conversión de energía fotovoltaica y la tracción ferroviaria, entre otros (Kouro et al 2010). Teniendo gran influencia en las energías

alternativas que necesitan, posterior a la generación, la acumulación en baterías y CA su conversión a corriente alterna para alimentar cargas eléctricas (Chavarria, 2010). Estas conversiones de CA en DC y de DC en CA por medio de componentes de electrónica de potencia producen gran cantidad de distorsiones armónicas (Mohan *et al.*, 2009) lo cual ha motivado el estudio e investigación en los temas de optimización del contenido armónico en las ondas de tensión y de corriente entregadas por los convertidores de potencia.

Dentro de este campo de investigación los convertidores de potencia multinivel han sido una opción reciente para disminuir los niveles de distorsión armónica y brindar una solución en cuanto a calidad de energía se refiere (Papriwal, 2012), (Debnath, 2012), (Valan, 2013) y (Rahim, 2013), ya que dada su naturaleza de generar ondas escalonadas reducen ostensiblemente el total del contenido armónico, en comparación con los convertidores convencionales. Dentro de las topologías multinivel la configuración fuente común de puentes H en cascada presenta grandes ventajas sobre las otras al necesitar sólo con una fuente de alimentación y realizar el escalonado mediante transformadores en la salida (Elgueta, 2003) y (Rios, 2005). Sin embargo, esta topología presenta dificultades a la hora de incluir los transformadores, debido a la presencia de comportamientos que perturban las modulaciones (Geun *et al.*, 2009), a parte del aumento de la complejidad del diseño (Suresh *et al.*, 2012). En los últimos años se han presentado varios trabajos en donde se busca mejorar el rendimiento de este tipo de convertidor (Panda *et al.*, 2012), (Suresh *et al.*, 2012) y (Baneí *et al.*, 2012), teniendo como referencia dicha necesidad este trabajo busca precisamente analizar el comportamiento de este tipo de convertidores frente a cargas de diferentes tipos y brindar una explicación del porqué de las perturbaciones y cómo se puede mejorar su comportamiento.

2. CONVERTIDORES MULTINIVEL DE PUENTE H EN CASCADA

Los convertidores multinivel fueron desarrollados desde mediados de 1980, inicialmente con el trabajo de Nabae, Takahashi y Agaki, 1988 (Nabae *et al.*, 1988). En la figura 1 se muestra el esquema general de un inversor multinivel con puentes H, en donde se puede observar el funcionamiento básico y cómo la forma de onda de salida se construye mediante la adición de las salidas de cada puente (Panda, 2012).

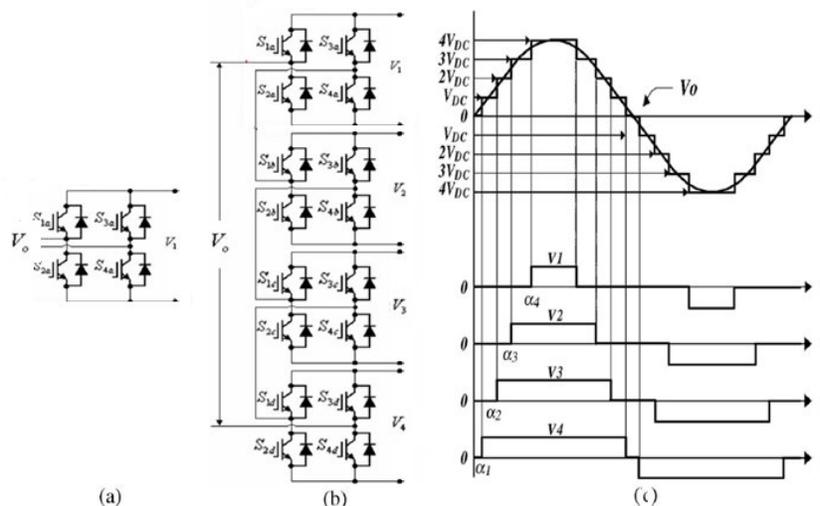


Figura 1: a) Puente H. b) Convertidor multinivel de puentes H. c) Formas de onda de los puentes y del convertidor.

Las topologías se pueden dividir en dos categorías según la dependencia de la relación de los voltajes que maneje cada puente, estas categorías son: simétricas o asimétricas. Se consideran simétricas si los voltajes de todos los puentes son iguales o asimétricas si estos son diferentes. Lo común es encontrar voltajes con relaciones 1:2 o 1:3; en la figura 2 se muestra las topologías mencionadas (Elgueta, 2003).

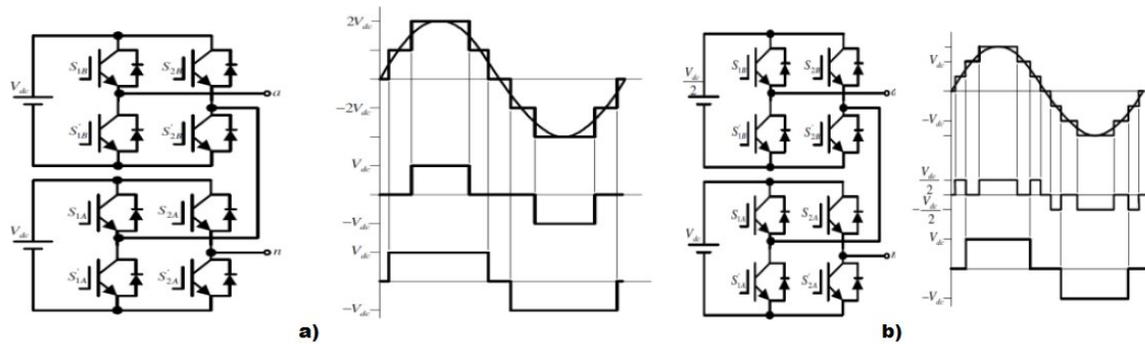


Figura 2: Topologías del convertidor multinivel. a) Simétrico. b) Asimétrico de relación 1:2.

En cuanto a la forma de obtener los voltajes en cada puente, se pueden describir dos topologías fuente común. En la cual todos los puentes se alimentan de una sola fuente, y la diferencia de voltajes y el aislamiento galvánico se consigue mediante transformadores. La otra topología es la de fuentes independientes, en la cual todos los puentes se alimentan de forma independiente. En la figura 3 se observa un ejemplo de estas topologías (Elgueta, 2003).

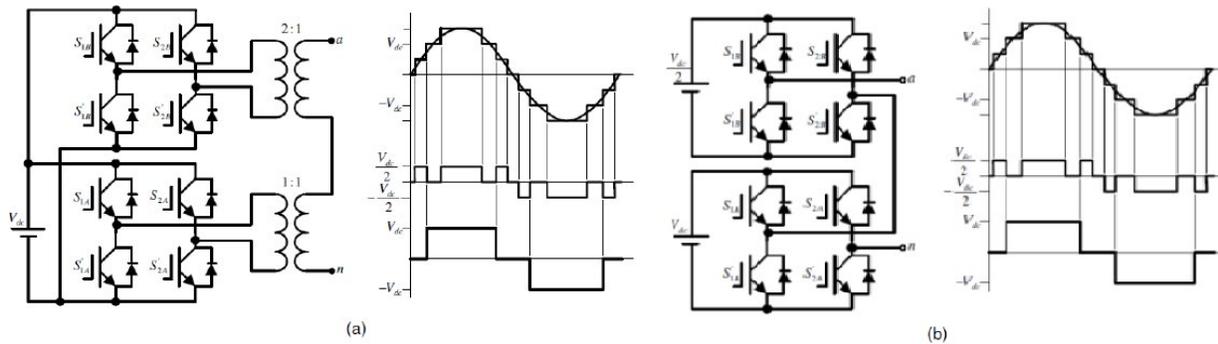


Figura 3: Topologías del convertidor multinivel. a) Fuente común. b) Fuente independiente.

3. CONVERTIDOR MULTINIVEL DE FUENTE COMÚN DE TRES ETAPAS.

3.1 TOPOLOGÍA DEL INVERSOR MULTINIVEL FUENTE COMÚN

La topología de inversor multinivel seleccionada para este trabajo fue un convertidor de puente H en cascada asimétrico de tres etapas; y de fuente común con transformadores a la salida. Este genera 27 niveles de tensión a la salida del convertidor, gracias a la asimetría 1:3, con una tensión eficaz de 127 V. Se selecciona este convertidor ya que usa tres transformadores. Uno de los transformadores asume la mayor carga y opera a la misma frecuencia de red, los otros dos, con mayor número de conmutaciones asumen menor cantidad de carga (Alfaro, 2010) y (Rios, 2005). De esta manera el análisis del comportamiento en carga involucrará tres transformadores y la forma de onda se acercará más a la onda sinusoidal con un THD inferior al 5%.

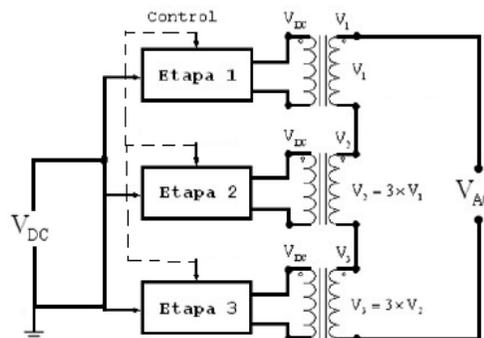


Figura 4: Topología del convertidor.

3.2 MODULACIÓN Y ÁNGULOS DE DISPARO

La forma de onda a la salida del convertidores se calcula similar a la ilustrada en la figura 5(a) los tiempos de los escalones de voltaje fueron determinados en base a un trabajo de investigación anterior “*Estudio de técnicas alternativas de optimización para disminuir la distorsión armónica total en la etapa de potencia de los sistemas fotovoltaicos*”. Esta modulación tiene una distorsión armónica de apenas 1.1%. Medida hasta los primeros cuarenta armónicos. El espectro armónico se muestra en la figura 5(b), en las figuras los escalones tienen un valor de Vdc. En razón a lo anterior las medidas están basadas en ese nivel de tensión.

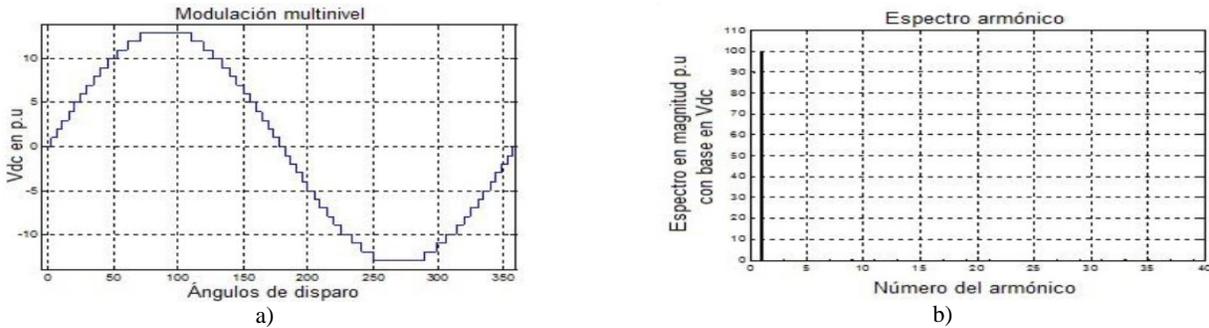


Figura 5: a) Forma de onda deseada a la salida del convertidor. b) Espectro armónico de la forma de onda.

Los tiempos de disparo se calcularon con base en los ángulos de disparo establecidos, para una frecuencia de 60 Hz. En la tabla 1 se muestra una parte de dicho arreglo, donde se calcula el número de ciclos de cada escalón en términos de un reloj de 20 MHz para su implementación.

Tabla 1: Ángulos y tiempos de disparo de cada nivel e implementación en reloj de 20 MHz.

Nivel	Tiempo [μs]	Ciclos de reloj (cristal 20MHz)	Ángulo de disparo		Nivel	Tiempo [μs]	Ciclos de reloj (cristal 20MHz)	Ángulo de disparo	
			[°]	[rad]				[°]	[rad]
0	93.14	465.70	0	0	5	228.85	1144.25	19.825	0.346
1	216.49	1082.45	2.012	0.035	6	215.01	1075.05	24.768	0.432
2	189.44	947.20	6.688	0.117	7	247.67	1238.35	29.413	0.513
3	219.87	1099.35	10.780	0.188	8	244.97	1224.85	34.763	0.607
4	198.91	994.55	15.529	0.271	9	276.76	1383.8	40.054	0.699

Con la duración de cada escalón, se determina qué puente debe estar activado (+Vdc ó -Vdc) para alcanzar cada nivel, también qué mosfet de cada puente se debería conmutar para obtener la salida deseada en cada puente. En la figura 6 se muestra este procedimiento en las formas de onda obtenidas.

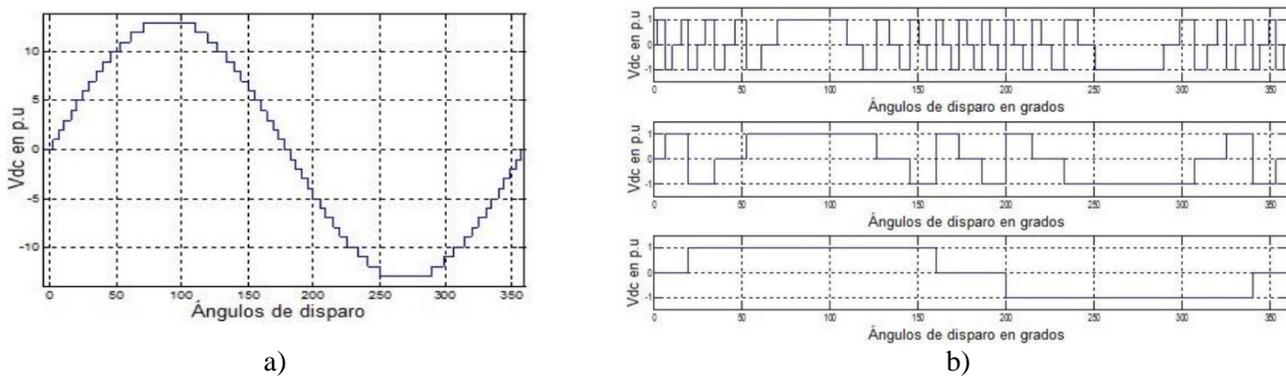


Figura 6: a) Onda a la salida del convertidor. b) Onda a la salida de cada puente H.

3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

Teniendo en cuenta los requerimientos de la modulación se diseñan la etapas de control, utilizando para este fin un microcontrolador PIC18F2550. Para los circuitos de acoplamiento entre la etapa de control y la potencia se utiliza los drivers IR2110 y los optoacopladores 6N137. También se calculan los disipadores de potencia. El circuito se muestra de forma completa en la figura 7, junto con la tarjeta desarrollada.

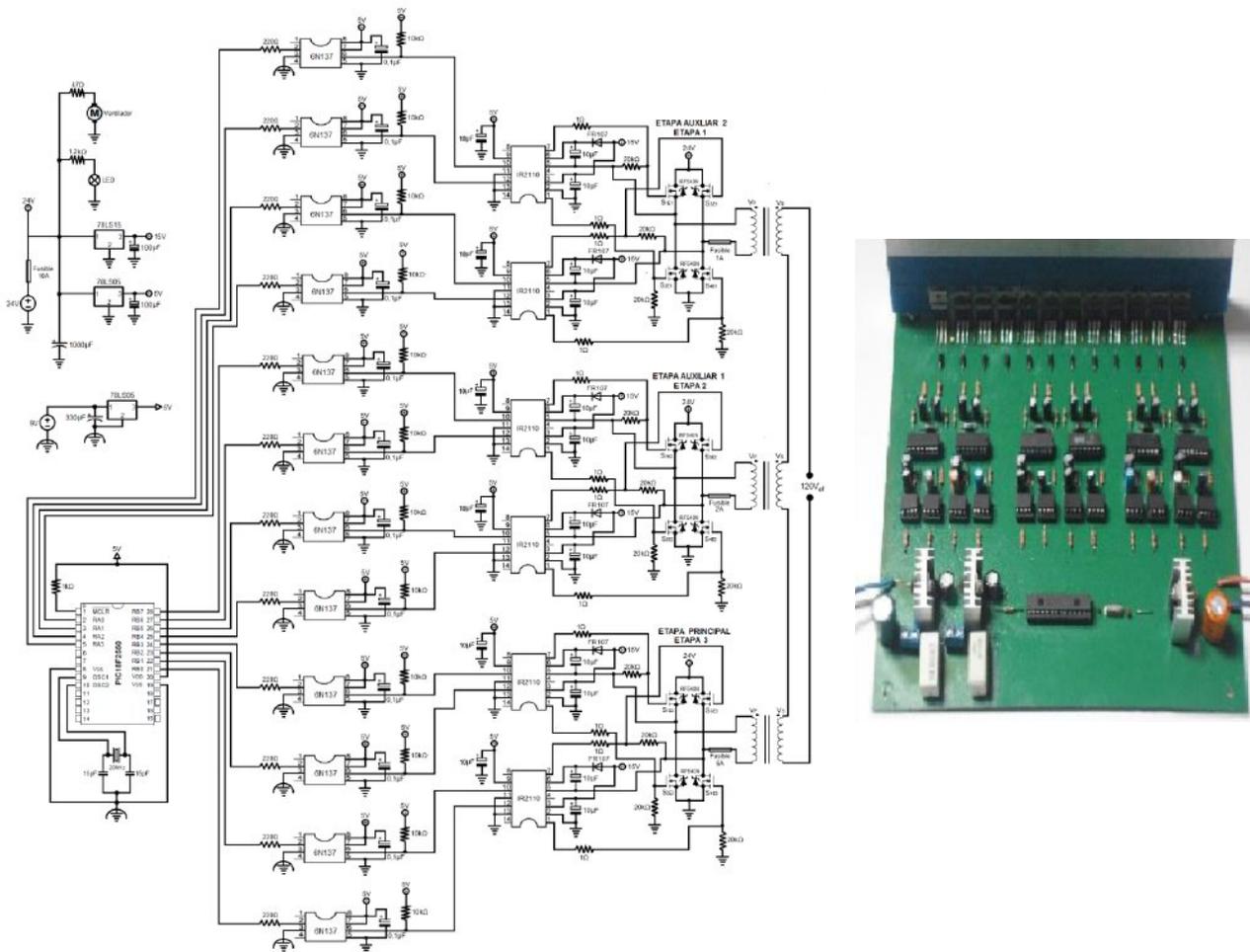


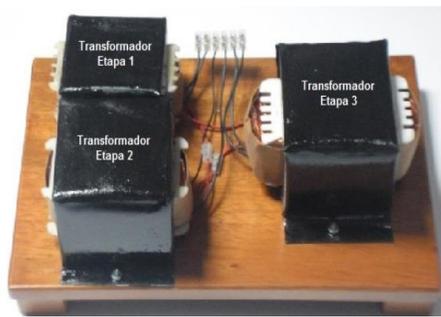
Figura 7: Esquema del circuito del convertidor y la tarjeta implementada.

Para el cálculo de los transformadores se tomaron como referencia varios trabajos previos (Elgueta, 2003), (Rios, 2005) y (Panda, 2012). Sobredimensionando los núcleos a fin de evitar la saturación de los mismos, es decir se aborda el problema de la saturación frente a pulsos mediante el aumento del área transversal del núcleo de los transformadores. La relación de los voltajes en la salida de cada puente es una relación de 3, el voltaje de alimentación común de CD se estableció como 24 V, voltaje común para baterías (una posible aplicación para fuentes alternativas). En la tabla 2 se muestra los voltajes calculados para alcanzar una tensión nominal de salida de 120 Vrms, teniendo en cuenta que los voltajes eficaces primarios estarían determinados por la forma de onda a la salida de cada puente, figura 6(b).

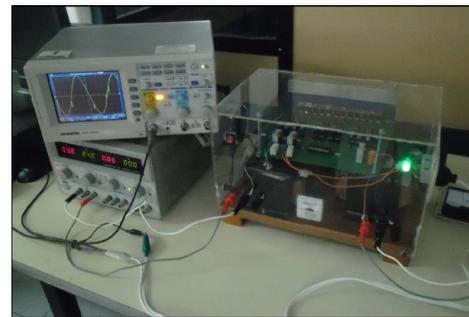
Tabla 2: Voltajes eficaces (RMS) para el diseño de los transformadores

Transformador	Voltaje eficaz primario [V]	Voltaje eficaz Secundario [V]
1	20.09	13.05
2	20.38	39.16
3	21.19	114.07

Se completa el convertidor adicionando los circuitos de protección eléctrica y los indicadores de estados, en la figura 8 se pueden observar los transformadores diseñados junto al prototipo ya finalizado.



a)



b)

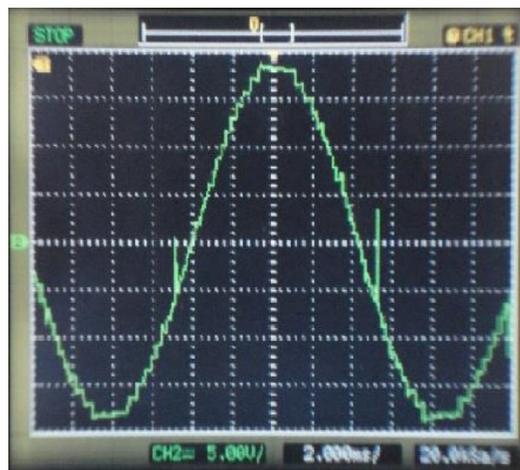
Figura 8: a) Transformadores desarrollados. b) Convertidor implementado.

3.4 PRUEBAS DE VACÍO

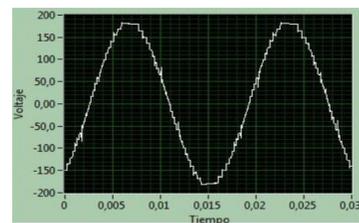
En la figura 8(b) se puede observar el convertidor alimentado con una fuente de corriente directa de 24 V y un osciloscopio en donde se observa la forma de onda. Las variables de voltaje RMS y contenido de THD se midieron con el dispositivo *Harmonic Power Clamp Meter* (MS2205), se observó la forma de onda en el osciloscopio y se utiliza un Sistema de Adquisición de Datos en *Labview* para capturar las señales de tensión y calcular de esta forma los espectros armónicos tanto en *Matlab* como en *Labview*. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- **Forma de onda**

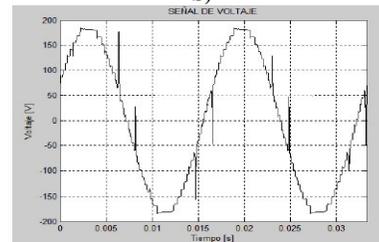
La forma de onda se puede observar en la figura 9, allí se indica la onda en el osciloscopio, a través del sistema de adquisición en *Labview* y en *Matlab*.



a)



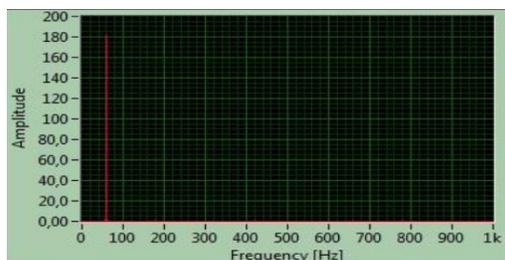
b)



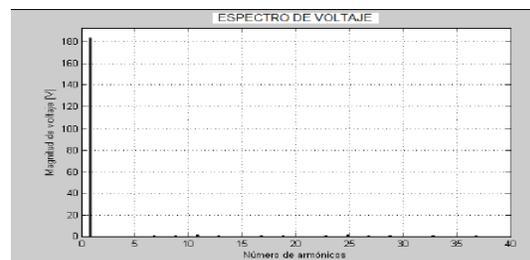
c)

Figura 9: Forma de onda a) Osciloscopio. b) Sistema de adquisición en Labview. c) Datos visualizados en Matlab.

El espectro armónico medido para la onda de tensión anterior se muestra en la figura 10.



a)



b)

Figura 10: Espectro armónico. a) Sistema de adquisición en Labview. b) Calculado en Matlab.

Los valores de tensión RMS y de THD se muestran en la siguiente figura 11.



Figura 11: a) Medida de tensión eficaz (RMS) y THD. b) Datos de la onda en el sistema de adquisición.

En la figura 12 se muestra el comportamiento de la onda de salida y la activación del puente 1. En esta figura se puede observar la naturaleza del sobreimpulso presente en la onda en vacío, debido al $L \frac{di}{dt}$ del devanado primario, y la caída de tensión que sufre el pulso a medida que el núcleo del transformador se satura.

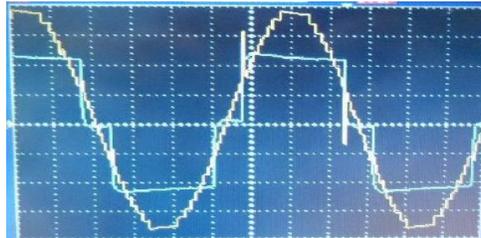


Figura 12: Formas de onda a la salida del convertidor y activación del puente principal.

4. ANÁLISIS CON CARGA

Para evaluar el comportamiento del convertidor se alimentaron tres tipos de cargas: resistiva (bombilla incandescente), inductiva (motor de inducción) y una carga no lineal (lámpara compacta ahorradora). Con las tres cargas anteriores se evalúa la forma de onda, la distorsión armónica y el valor eficaz de la onda de tensión, los tres casos de cargas utilizadas se ilustran en la figura 13.

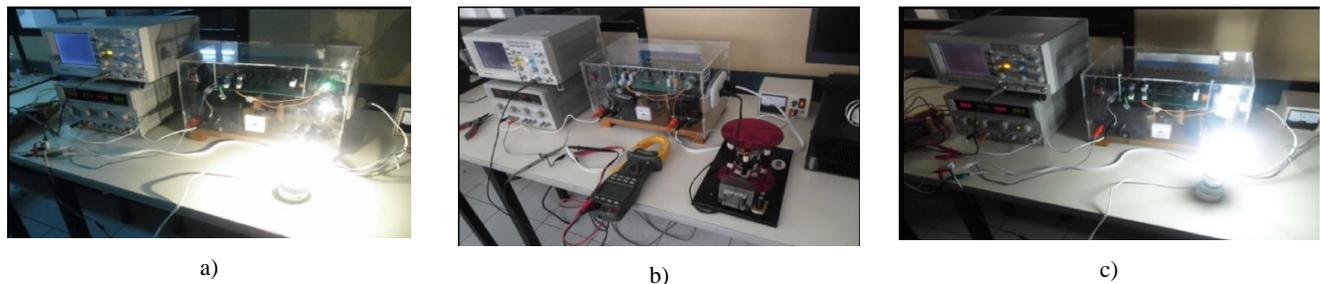


Figura 13: a) Prueba carga resistiva. b) Prueba carga inductiva. c) Prueba carga no lineal.

4.1 CARGA RESISTIVA

La bombilla incandescente que se conecta al inversor multinivel es una carga resistiva de 60W. La forma de onda de voltaje y el espectro armónico de magnitud pico se muestran en la figura 14.

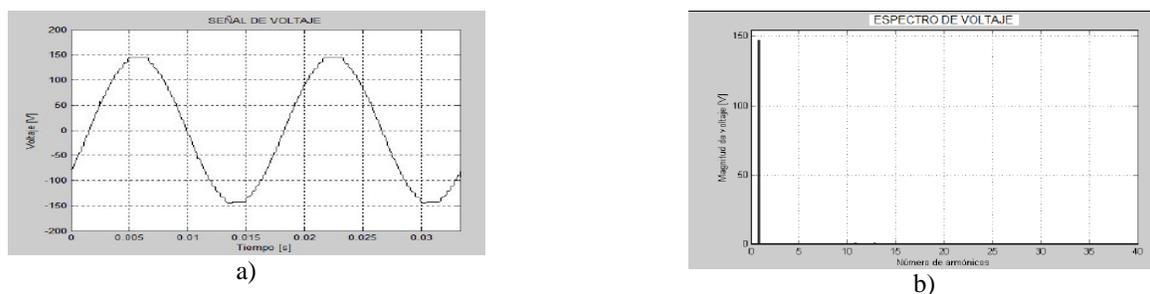


Figura 14: a) Forma de onda a la salida del convertidor. b) espectro armónico carga resistiva.

El valor RMS medio a la salida del convertidor fue de 104 voltios con una Distorsión Armónica Total (THD) de 1.05% , estos valores se resumen en la tabla 3.

Tabla 3: Datos de la onda de tensión en carga resistiva

Frecuencia [Hz]	Amplitud [V]	Vrms [V]	THD [%]
60.005	146.58	103.617	1.05

4.2 CARGA INDUCTIVA

El motor de inducción monofásico que se conecta al inversor multinivel como carga inductiva consume aproximadamente 60VA con un factor de potencia de 0.8 a tensión nominal de 120 V. La forma de onda a la salida del convertidor y su respectivo espectro armónico se muestran en la figura 15.

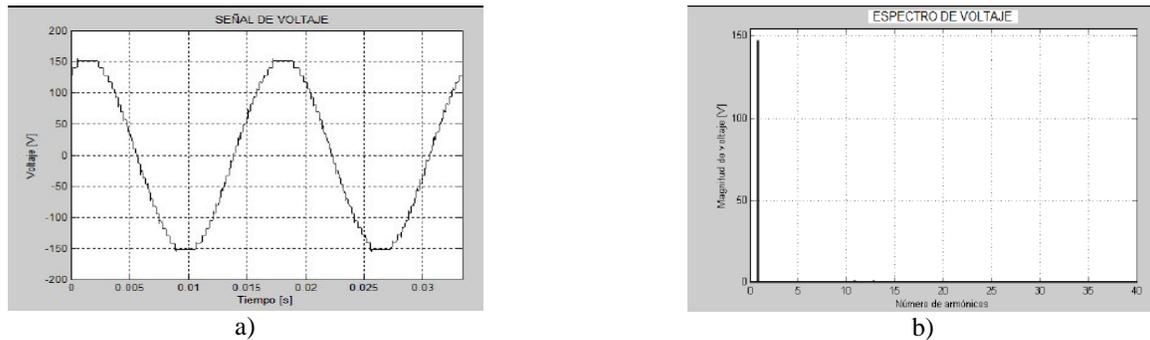


Figura 15: a) Forma de onda a la salida del convertidor. b) espectro armónico carga inductiva

Las variables medidas se resumen en la tabla 4.

Tabla 4: Datos de la onda de tensión en carga inductiva

Frecuencia [Hz]	Amplitud [V]	Vrms [V]	THD [%]
60.0048	153.64	108.71	1.2533

4.3 CARGA NO LINEAL

Como carga no lineal se conectó una bombilla ahorradora de 60VA a una tensión nominal de 120 V. En la figura 16 se puede observar la forma de onda a la salida del convertidor y su respectivo espectro armónico.

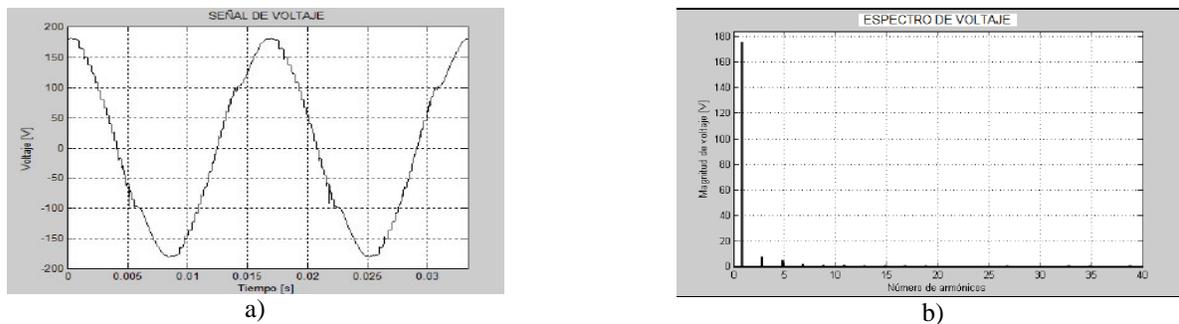


Figura 16: a) Forma de onda a la salida del convertidor. b) espectro armónico carga no lineal

Las variables medidas se resumen en la tabla 5.

Tabla 5: Datos de la onda de tensión en carga no lineal

Frecuencia [Hz]	Amplitud [V]	Vrms [V]	THD [%]
60.0052	175.338	124.149	5.5837

4.4 CARGA RESISTIVA VARIABLE

En último lugar se realiza una prueba variando carga. Por facilidad se eligió el tipo de carga resistiva y se analiza el comportamiento del valor RMS de la onda de tensión a la salida del convertidor. La distorsión armónica no se muestra debido a que se mantiene constante. Los valores de resistencia se variaron en un rango de 100Ω a 1000Ω. En la figura 17(a) y 17(b) se muestra el comportamiento del valor RMS de la onda de tensión y el valor RMS de la corriente respectivamente.

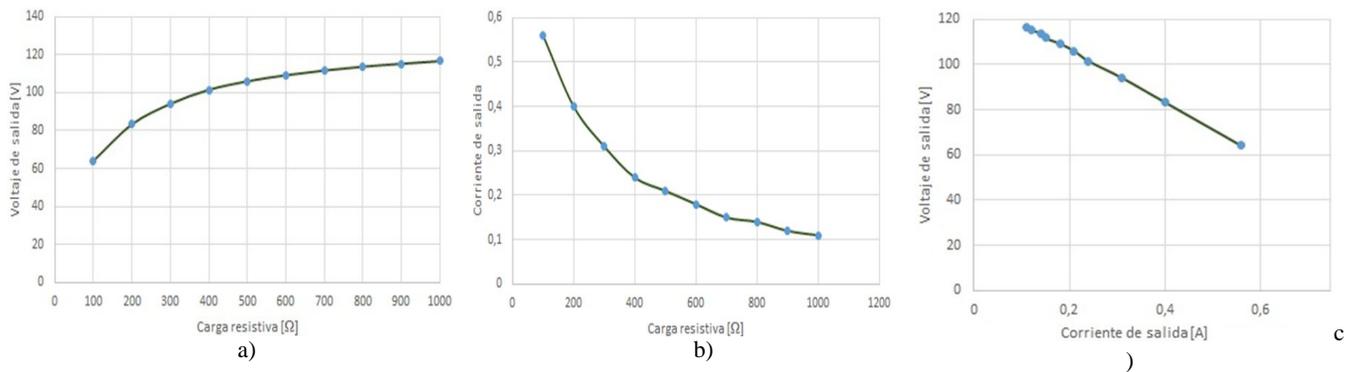


Figura 17: a) Tensión vs resistencia. b) Corriente vs resistencia. c) Voltaje vs corriente.

En la figura 17(c) se puede observar el comportamiento de la tensión vs. la corriente a la salida del convertidor.

5. CONCLUSIONES

Con respecto a la calidad de la energía, el convertidor mantiene sus cualidades pese al aumento o disminución de carga. El menor contenido armónico los presentaron las cargas resistivas, para las cargas inductivas el THD aumenta de manera poco significativa, sin embargo cargas no lineales aumentan considerablemente el contenido armónico de la onda. Este comportamiento se da debido a que las cargas no lineales absorben corriente de manera discontinua al estar los transformadores unidos por el secundario. La corriente del devanado secundario es la misma para los tres transformadores, por tanto la discontinuidad de la corriente afectará a los dos transformadores y deformará la forma de onda de la tensión a causa de los $L di/dt$ presentes en las inductancias de los secundarios del transformador dados por las discontinuidades en la onda de corriente. Cabe resaltar que el convertidor multinivel mantiene un THD inferior al 5% en todas las pruebas exceptuando el caso de carga no lineal.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta es la presencia en vacío de sobreimpulsos en la forma de onda de tensión, estos sobreimpulsos se presentan en el instante en el que el puente principal conmuta. Esto sucede debido al $L di/dt$ que experimenta el devanado primario, sin embargo en presencia de cualquier tipo de carga estos sobreimpulsos desaparecen, presentándose una mejor forma de onda.

La regulación del convertidor se hace más grande a medida que la carga aumenta, esto se debe principalmente a dos factores de suma importancia. El primero es la caída en la impedancia de los transformadores por la presencia de la resistencia y reactancia de cortocircuito. Principalmente por que los devanados tienen resistencias óhmicas y se crea una inductancia por el arrollamiento de la bobina; además, el flujo disperso acrecienta la caída porque al confinar en el núcleo de la máquina eléctrica todo el flujo magnético, y éste se dispersa en el aire. El segundo factor es la saturación de los núcleos, dado que las metodologías convencionales están hechas para construir transformadores que van a ser alimentadas con ondas senosoidales, estas aseguran que el codo de la curva de magnetización se alcance en el voltaje pico de la onda de tensión; al alimentar estos transformadores con ondas cuadradas, el codo de la curva se alcanza antes de que los pulsos finalicen, haciendo que el flujo no crezca a la misma tasa de antes y los pulsos se empiecen a 'caer', este comportamiento se ve más pronunciado en el transformador principal (figura 12), puesto a que este maneja corrientes mayores y pulsos de mayor duración.

El comportamiento del convertidor en cuanto a calidad de la energía es bueno, sin embargo la regulación de tensión y la deformación de los pulsos hacen que esta topología presente algunos inconvenientes. Se sugiere que se utilice una metodología para diseñar estos transformadores que satisfaga los requerimientos de forma de onda y la regulación de tensión.

REFERENCIAS

- Banaei, M. R., Khoujahan, H., Salary, E. (2012). "Single-source cascaded transformers multilevel inverter with reduced number of switches". IET Power Electron, Vol. 5, Iss. 9. pp. 1748, 1753.
- Chavarría, J. (2010). Diseño e Implementación de un Inversor Multinivel para Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Debnath, S., Narayan, R., Ghosh, T. (2012). "Comparison of Different Soft Techniques applicable to Multilevel Inverter for Harmonic Elimination". International journal of computer application ISSUE 2, Vol 6.

- Elgueta, C. M. (2005). Aplicación de un inversor multinivel como variador de frecuencia de un motor de inducción trifásico. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Julio 2005, 156 p.
- Geun, S. S., Soon, K. F. and Park, S. (2009). "Cascaded Multilevel Inverter Employing Three-Phase Transformers and Single DC Input". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 6, pp 2005.
- Kouro, S., Malinowski, M., Gopakumar, K., Pou, J., Franquelo, L.G., Bin, Wu, Rodriguez, J., Pérez, M. A., Leon, J. I. (2010); "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters" IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 57, Issue: 8, 2010, p.p. 2553 – 2580.
- Mohan, N., Undeland, T. M. and Robbins, W. P. (2009). Electrónica de Potencia: Convertidores Aplicación y Diseño. 3^{ra} Edición, McGraw Hill Interamericana.
- Nabae, A., Takhashi, I. and Akagi, A. (1988) " A New neutral point-clamped PWM inverter". IEEE Industry Appl. Soc Annual Meeting conference. Vol. 2.
- Panda, A. K. and Suresh, Y. (2012). "Research on cascade multilevel inverter with single DC source by using three-phase transformers". International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 40, No. 1 pp.9-20.
- Papriwal, A. and Mahor, A. (2012). "Review of mitigation of harmonics in multilevel inverters using PSO" International Journal of Electrical and Electronics Vol. 2 Issue 4 Dec pp. 65-72, 2012.
- Rahim, N., Krismadinata, Wooi, H. and Selvaraj, J. (2013). "Elimination of Harmonics in Photovoltaic Seven-level Inverter with Newton-raphson Optimization", Procedia Environmental Sciences, Vol 17, pp. 519-528,
- Ríos, F. (2003). Diseño y construcción de un inversor trifásico multinivel. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial, con Diploma en Ingeniería Eléctrica. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, p.p. 183
- Sánchez, M. A. (2009). "Calidad de la energía eléctrica". Instituto Tecnológico de Puebla, México,
- Suresh, Y. and Panda, A. K. (2012). "Research on a cascaded multilevel inverter by employing three-phase transformers". IET Power Electron, Vol. 5, Iss. 5, pp. 561,570.
- Suresh, Y. and Panda, A. K. (2012). "Performance of cascaded multilevel inverter by employing single and three-phase transformers". IET Power Electron, Vol. 5, Iss. 9. pp. 1694, 1705.
- Valan M. and Manoharan, P. (2013). "FPGA based multilevel cascaded inverters with SVPWM algorithm for photovoltaic system". Solar Energy, Vol 87, pp. 229-245, January 2013.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.