



## Convertidor DC/AC de tensión controlada

### DC/AC power converter with controlled voltage output

**Luis David Pabón Fernández.; Jorge Luis Díaz Rodríguez and Aldo Pardo García**

Universidad de Pamplona, Colombia, [davidpabon@hotmail.es](mailto:davidpabon@hotmail.es), [jdiazcu@gmail.com](mailto:jdiazcu@gmail.com), [apardo13@hotmail.com](mailto:apardo13@hotmail.com)

#### Resumen

En este artículo se presenta la simulación de un prototipo propuesto para convertir corriente directa en corriente alterna trifásica con voltaje de línea controlado a través del enlace de corriente directa, para esto el prototipo utiliza un convertidor cd/cd. Buck-Boost de elementos reducidos acoplado a un inversor multinivel de puentes H en cascada de fuente común. El inversor utiliza una modulación con contenido armónico optimizado, lo que permite obtener una fuente de tensión en alterna con óptima calidad de la energía y valor de voltaje variable.

Palabras clave: Electrónica de potencia, convertidor DC / AC, inversores, convertidor DC / DC, modulación, optimización.

#### Abstract

This paper presents the simulation of a power converter prototype proposed to convert direct current (DC) into three-phase alternating current (AC) with line voltage controlled through direct current link, using a DC/DC converter. A Buck-Boost converter of reduced elements coupled to a cascaded H-bridges common source multilevel inverter. The power inverter uses a modulation with optimized harmonic content, which allows obtaining an AC voltage source with optimum power quality and variable voltage output.

Keywords: Power electronics, DC/AC converter, inverters, DC/DC converter, modulation, optimization.

#### I. INTRODUCCIÓN

La conversión de potencia eléctrica de componente directa a componente alterna, 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[1], estas técnicas conllevan problemas de distorsión armónica y de conmutación [2],[3]. Para solucionar estos problemas y conseguir una forma de onda de tensión que se acerque más a una onda sinusoidal pura, con el mínimo de conmutaciones de los dispositivos de potencia, aparece una nueva familia de

inversores, llamados convertidores multinivel [4][5][6], estos convertidores acercan el contenido de distorsión armónica a cero, pero para acercar aún más las formas de ondas de las tensiones de los convertidores multinivel a ondas sinusoidales puras, se han realizado múltiples trabajos de optimización del contenido armónico[7], [8], [9] estos trabajos buscan eliminar los armónicos, ya sea en ordenes selectivos[10][11] o en una banda determinada[12], sin embargo no se llega a un punto óptimo definitivo, por lo que el tema está abierto para la investigación.

Otro problema de la conversión CD/CA, es la variación de la tensión en términos de los cambios de carga y fluctuaciones del bloque de corriente continua de donde el inversor toma la energía[10]. En inversores la regulación de tensión puede causar que las tensiones de salida salgan de los límites establecidos para conservar la calidad de la energía suministrada a la carga.

Es por esto que en este trabajo se presenta un prototipo de inversor multinivel que integra un convertidor CD/CD que permita regular el valor RMS del voltaje de salida del inversor, de esta manera se obtiene una fuente de estado sólido que permite variar el valor de tensión alterna a la salida del convertidor. Esta fuente podrá ser utilizada en aplicaciones industriales de tensiones variables o en aplicaciones académicas que requieran control sobre la tensión. En este artículo se presenta la simulación del sistema, que verifica el funcionamiento deseado.

## II. CONVERTIDOR MULTINIVEL CON BUCK-BOOST DE ELEMENTOS REDUCIDOS

El prototipo desarrollado integra un convertidor CD/CD de elementos reducidos y un convertidor multinivel trifásico. La topología del convertidor CD/CD se muestra en la figura 1, en esta se observan los componentes del convertidor: dos interruptores de potencia, dos diodos de circulación, un condensador y un inductor.

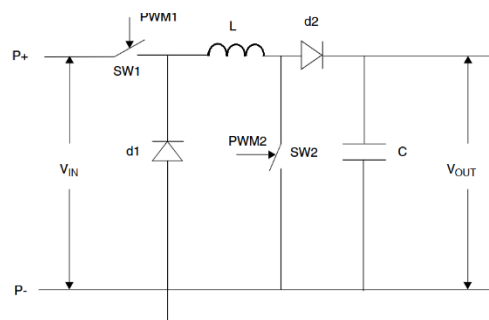


Fig. 1. Topología del convertidor [13].

Del anterior diagrama se puede observar que si el interruptor 2 está abierto y se controla el interruptor S1 el sistema luce como un convertidor reductor, exceptuando

la pérdida a través del diodo D2. Si por el contrario S1 permanece cerrado y S2 se controla el sistema luce como un convertidor elevador con excepción del camino de circulación libre D1. Si el interruptor uno permanece cerrado y el interruptor dos permanece abierto, entonces al sistema iguala el voltaje de la salida, al voltaje de la entrada menos la caída de potencial a través del diodo D2[13].

Bajo este funcionamiento se establecen los modos de operación presentados en la tabla 1. Cuando los dos interruptores están cerrados, el S2 cortocircuita la carga. De esta manera el inductor acumula energía, este es el modo de operación de un elevador. Si ambos interruptores están abiertos, no se provee energía a la carga. Esta es la condición de un convertidor reductor cuando la energía almacenada en el inductor es liberada a través de los diodos D1 y D2. Cuando el interruptor S1 está cerrado y S2 es abierto el voltaje de la carga será provisto directamente por la entrada. Esta es la condición encontrada en un convertidor reductor cuando la energía fluye del suministro a la carga. Esta condición se encuentra también cuando el convertidor elevador provee energía a la carga desde el suministro y la inductancia, elevando el nivel de voltaje de la carga[13].

Tabla 1. Descripción de los modos de operación del convertidor[13]

Modo	SW1(PWM 1)	SW2(PWM 2)	Modos de operación
1	OFF	OFF	Reductor
2	OFF	ON	No
3	ON	OFF	reductor elevador
4	ON	ON	Elevador

Para aterrizar el convertidor a un caso específico, con el fin de poder realizar la simulación, se calcularon los componentes requeridos para que el convertidor pueda suministrar una potencia de salida de 2300 W, una entrada nominal de 48 V y un voltaje de salida variable de 0 al 200% de la entrada nominal. La frecuencia de operación será de 15 kHz, esta frecuencia se seleccionó en un valor bajo, con el fin de que el convertidor pueda manejar variaciones de corriente grandes sin llevar al extremo a los dispositivos semiconductores. este diseño permitiría tener un cargador de baterías para un sistema fotovoltaico de 48 V, el valor de la inductancia calculada es de  $12.98 * 10^{-6} H$ . y el valor de la capacitancia es  $2.777 * 10^{-3} F$ .

El inversor multinivel se encarga de generar las ondas de tensión trifásicas, esto a partir de la construcción de ondas escalonadas que se construyen a partir de la tensión de corriente directa generada por el convertidor de elementos reducidos. La

topología de inversor multinivel seleccionada para este trabajo es el convertidor trifásico de puente H en cascada asimétrico de fuente común con relación 1:3 de 2 etapas, el cual genera voltaje de línea con 17 escalones como máximo, esta topología se muestra en la figura 2[11]

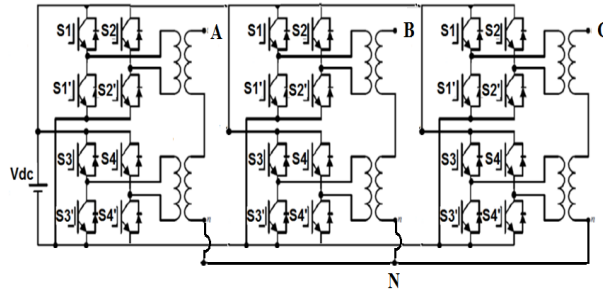


Fig. 2. Topología del inversor multinivel.

El convertidor diseñado con base en Mosfets 640N, tiene una capacidad de potencia de 2300 VA, con una tensión máxima de 250V. Estos dos convertidores se conectan en cascada para obtener el prototipo de inversión y acondicionamiento de potencia eléctrica para sistemas FV que requieran una salida en alterna.

### III. MODULACIÓN MULTINIVEL

La modulación a utilizar en el convertidor trifásico, es una modulación optimizada presentada en un trabajo previo de los autores [14], esta modulación elimina los armónicos de las tensiones de línea dentro del orden de los primeros 50 componentes, haciendo que el total de distorsión armónica sea nula cumpliendo el estándar IEE 519. La forma de onda de la modulación por fase se muestra en la figura 3.

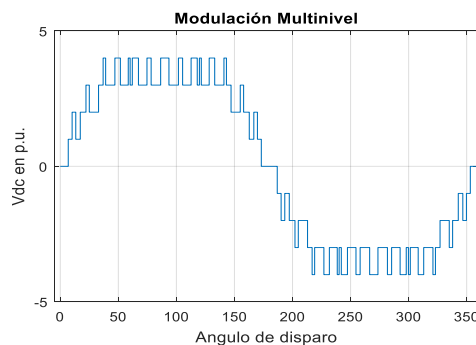


Fig. 3. Forma de onda de la modulación por fase.

Esta modulación de fase genera un sistema de tensiones de línea de secuencia positiva como el mostrado en la figura 4. Estas tensiones se generan debido a la diferencia de potencial entre fase.

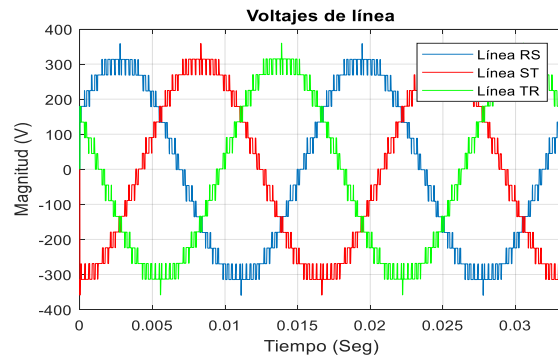


Fig. 4. Modulaciones de línea del sistema trifásico de secuencia positiva.

El espectro armónico de las tensiones de línea se muestra en la figura 5.

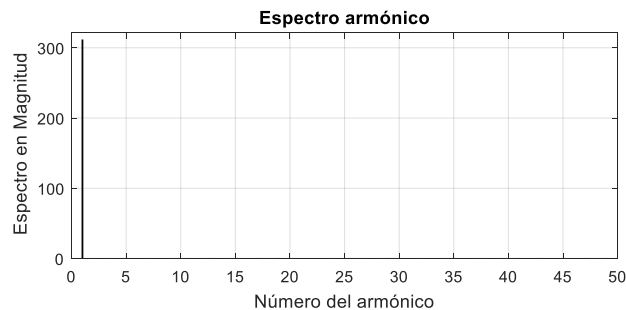


Fig. 5. Espectro armónico de la modulación de línea.

#### IV. SIMULACIÓN

##### ESQUEMA DE SIMULACIÓN

La simulación propuesta se realizó en Simulink de Matlab, en la figura 6 se muestra el esquema de simulación, en donde se observan las diferentes etapas que la compone: la visualización hace referencia a los bloques en donde se pueden observar las diferentes variables como corrientes y voltajes, la etapa de cálculo THD y RMS permiten observar los contenidos armónicos y valores RMS, el control CD/CD permite mediante una sola señal controlar el convertidor de elementos reducidos, el convertidor CD/CD es el convertidor descrito anteriormente, el bloque de medición está compuesto por los voltímetros y amperímetros, la carga está representada por resistores o inductores trifásicos según el caso a examinar, por último el inversor, que se encuentra dentro de un subsistema.

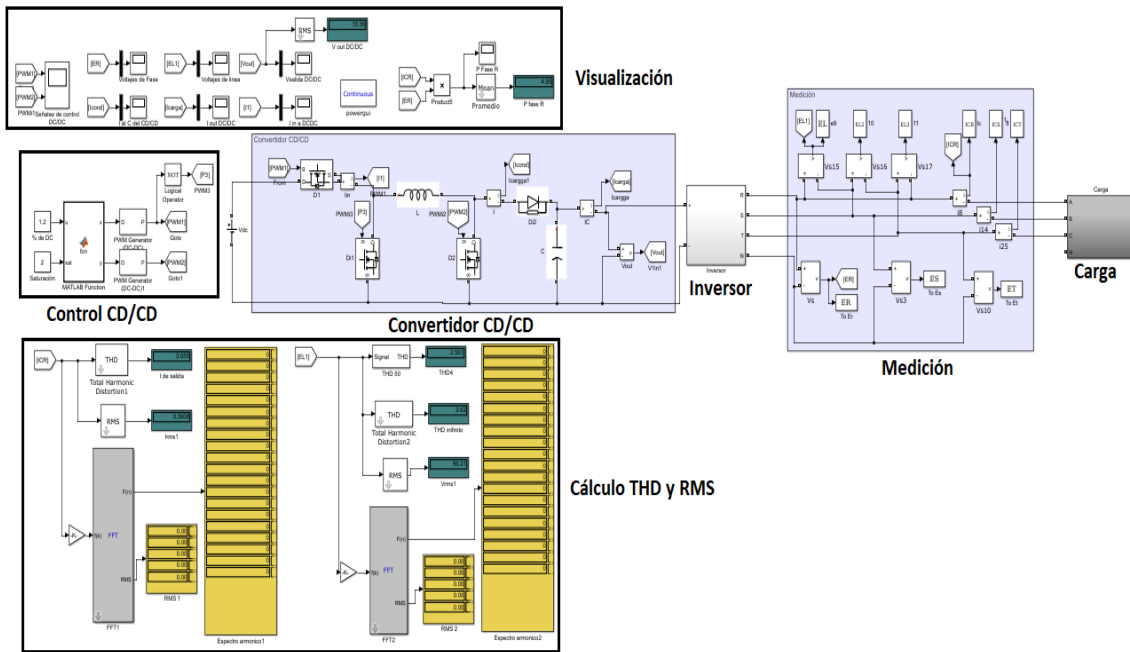


Fig. 6. Simulación del sistema completo

En la figura 7 se observa el inversor que se encuentra dentro del subsistema llamado “inversor”

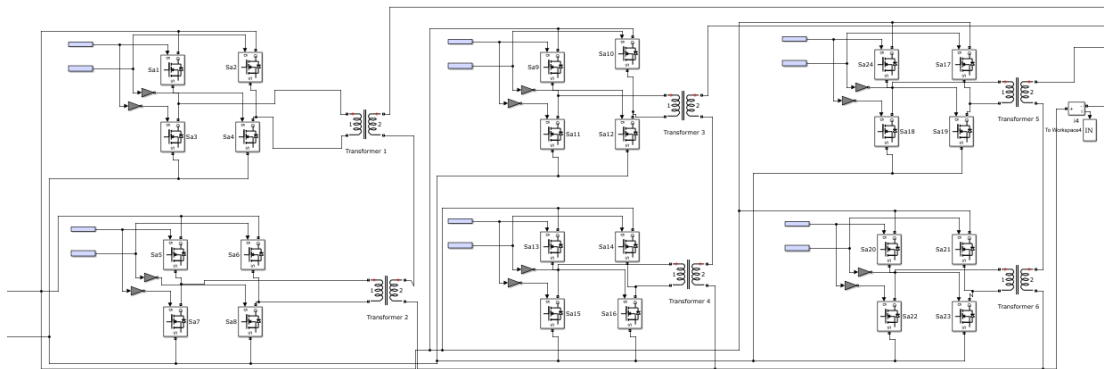


Fig. 7. Subsistema inversor

El bloque mostrado en la figura 6 como control CD/CD se encarga de controlar el convertidor CD/CD, recibiendo solo un dato que es el porcentaje de tensión deseado, es decir de 0 a 200% de la tensión nominal, este dato es un número de 0 a 2. De igual forma existe una entrada a este bloque que se llama saturación, este dato le indica al inversor cual es el máximo de tensión alcanzable. En teoría sería 2. A continuación se muestra este bloque.

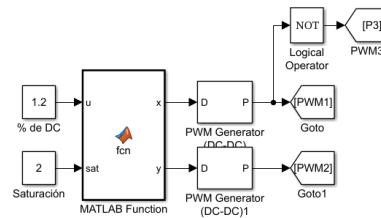


Fig. 8. Bloque de control del convertidor CD/CD.

Como se puede observar en la figura, existen 3 PWM, las dos principales y una tercera que es la negación de la primera, esto para evitar complejidad en los circuitos de accionamiento de transistores que estén flotando, como lo es el transistor 1. A continuación, se muestra cómo actúa el sistema variando la entrada de CD, es decir variando la señal de control en valores que están entre 0 y 1.3, la carga utilizada en la simulación es una carga inductiva de  $20+15j$  Ohm.

#### MODO BYPASS: SIMULACIÓN CON ENTRADA DE 1

En esta simulación la señal de entrada al convertidor CD/CD es 1, esto para que actúe como un bypass. La salida del sistema será el voltaje nominal menos la caída de tensión normal más las caídas de tensión del convertidor CD/CD, esto debe dar un voltaje menor a los 220 V nominales. A continuación se muestra la salida de tensión y de corriente del convertidor CD/CD para 7 ciclos de la onda de 60Hz.

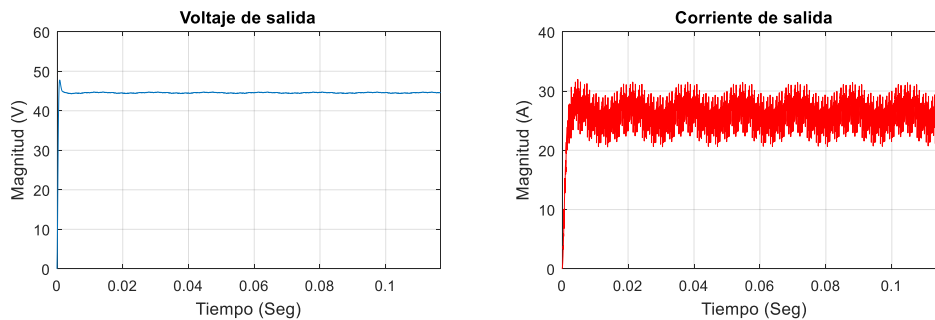


Fig. 9. Salida de voltaje y corriente del convertidor CD/CD.

En la figura se observa que el voltaje se establece en 44.56 V, esto es casi 3.5 V por debajo de los 48V nominales, lo cual corresponde a una caída de 7.29%. La salida de tensión no posee rizado, sin embargo, la corriente tiene un rizado fuerte esto debido al tiro de corriente de las modulaciones, lo cual es normal.

A continuación, se muestra la forma de onda de las tensiones de línea.

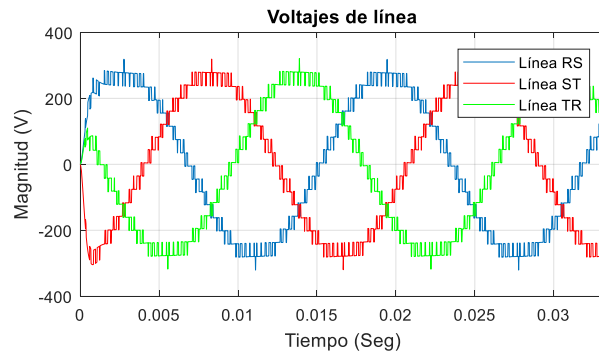


Fig. 10. Forma de onda de las tensiones de línea

La forma de onda de la modulación presenta el mismo comportamiento descrito en las secciones anteriores, esto deja ver que el sistema se comporta de una manera adecuada. El contenido armónico de esta modulación es de solo el 0.3147%. Lo cual es muy bajo para un consumo de 1000W. En cuanto al valor RMS, este es de 195 V. El espectro armónico de la tensión de línea se muestra en la figura 11.

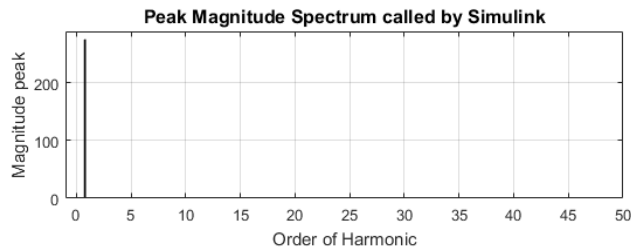


Fig. 11. Espectro armónico de la tensión de línea

Como se puede ver claramente, el espectro es completamente limpio en la banda de los primeros 50 armónicos. La forma de onda de la corriente de línea que va hacia la carga se muestra en la siguiente figura.

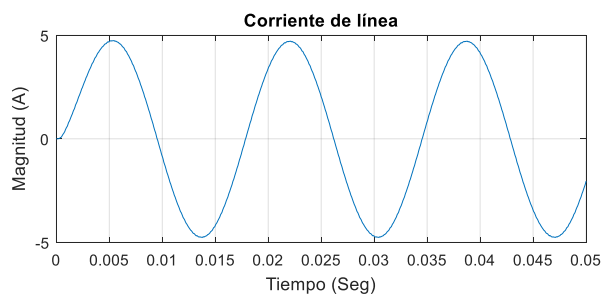


Fig. 12. Forma de onda de la corriente de línea

Esta corriente tiene un valor RMS de 3.34 A, y su forma es sinusoidal, el contenido armónico es muy bajo como se puede apreciar en la figura 13.



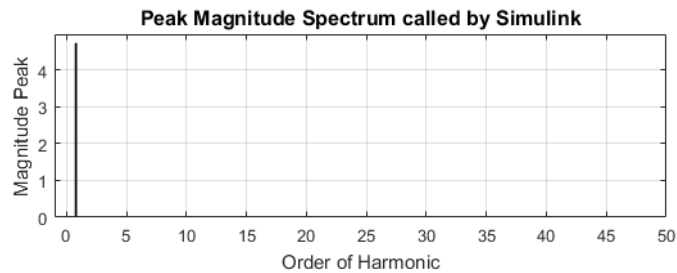


Fig. 13. Espectro armónico de la corriente de línea.

El THD es de solo el 0.27 % en todo el espectro es decir en la banda extendida hasta el armónico 8840, el espectro hasta el armónico 50 se muestra en la siguiente figura.

### MODO ELEVACIÓN: SIMULACIÓN CON ENTRADA DE 1.2

En esta simulación se le da como señal de entrada 1.2 al convertidor CD/CD esto para que actúe como un elevador. Esta elevación incrementará el nivel de salida del sistema por encima de los 220V. A continuación se muestra la salida de tensión y de corriente del convertidor CD/CD para 7 ciclos de la onda de 60Hz.

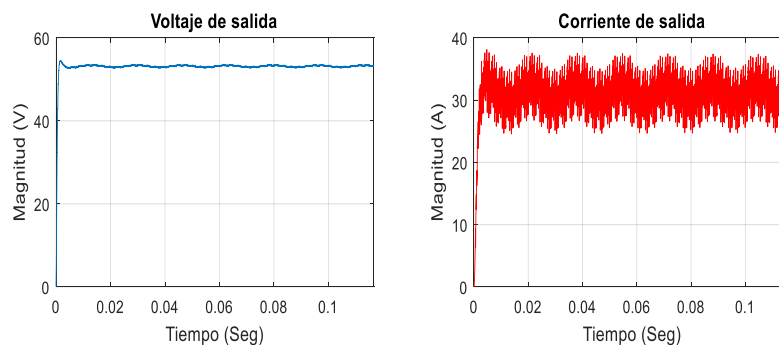


Fig. 14. Salida de voltaje y corriente del convertidor CD/CD.

En la figura se observa que el voltaje se establece en 53.18 V, esto es casi 5.2 V por encima de los 48V nominales, lo cual corresponde a una elevación de 10.83% con respecto a la tensión nominal y 18,5% con respecto al modo bypass. La salida de tensión no posee rizado, sin embargo, la corriente tiene un rizado fuerte esto debido al tiro de corriente de las modulaciones, lo cual es normal. En la figura 15 se muestra la forma de onda de las tensiones de línea. La forma de onda de la modulación presenta el mismo comportamiento descrito en las secciones anteriores, esto deja ver que el sistema se comporta de una manera adecuada. El contenido armónico de esta modulación es de solo el 0.3554%. Lo cual es muy bajo para un consumo de 1435W. En cuanto al valor RMS, este es de 232.7 V lo cual representa una elevación del 5.77%. El espectro armónico de la tensión de línea se muestra en la figura 16.

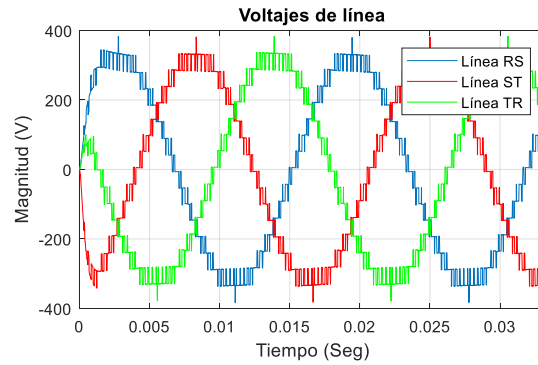


Fig.15. Forma de onda de las tensiones de línea.

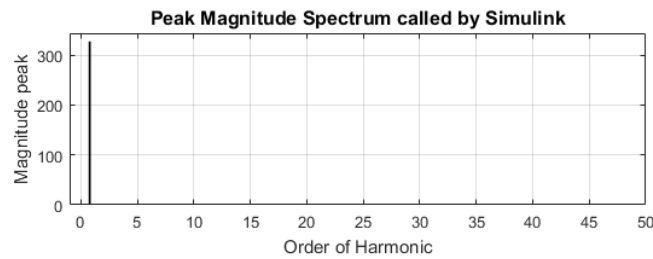


Fig. 16. Espectro armónico de la tensión de línea.

Como se puede ver claramente, el espectro es completamente limpio en la banda de los primeros 50 armónicos. La forma de onda de la corriente de línea que va hacia la carga se muestra en la figura 17.

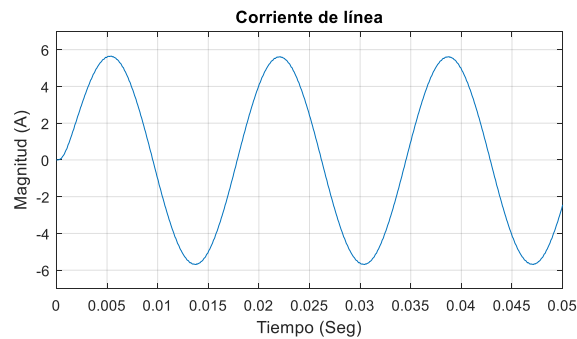


Fig. 17. Forma de onda de la corriente de línea

Esta corriente tiene un valor RMS de 4 A, y su forma es sinusoidal, el contenido armónico es muy bajo como se puede apreciar en la siguiente figura.

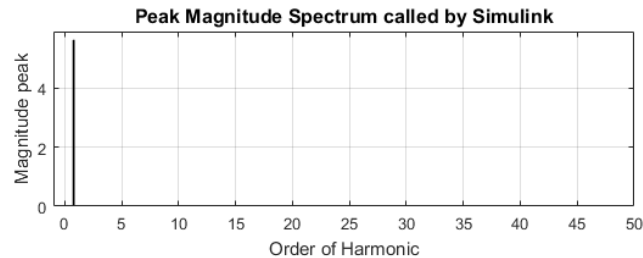


Fig. 18. Espectro armónico de la corriente de línea.

El THD es de solo el 0.30 % en todo el espectro es decir en la banda extendida hasta el armónico 8840. Esto quiere decir, que el espectro es completamente limpio.

#### MODO REDUCCIÓN: SIMULACIÓN CON ENTRADA DE 0.8

En esta simulación se le da como señal de entrada 0.8 al convertidor CD/CD esto para que actúe como un reductor. Esta acción disminuirá el nivel de salida del sistema por debajo de los 220 V nominales, A continuación de muestra la salida de tensión y de corriente del convertidor CD/CD para 7 ciclos de la onda de 60Hz.

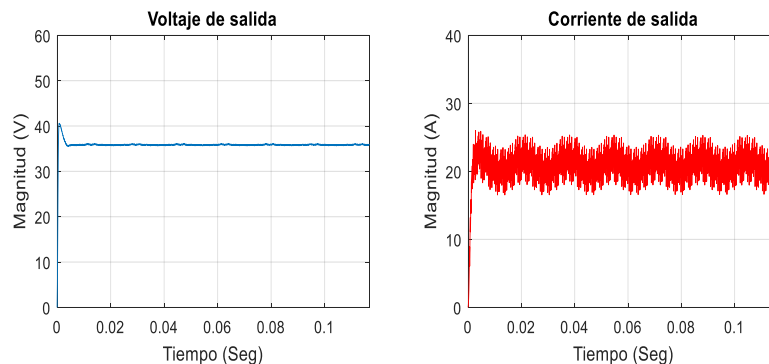


Fig. 19. Salida de voltaje y corriente del convertidor CD/CD.

En la figura se observa que el voltaje se establece en 35.84 V, esto es casi 12.16 V por abajo de los 48V nominales, lo cual corresponde a una caída del 25.33% con respecto a la tensión nominal y 18,4% con respecto al modo bypass. La salida de tensión no posee rizado, sin embargo, la corriente tiene un rizado fuerte esto debido al tiro de corriente de las modulaciones, lo cual es normal. A continuación, se muestra la forma de onda de las tensiones de línea.

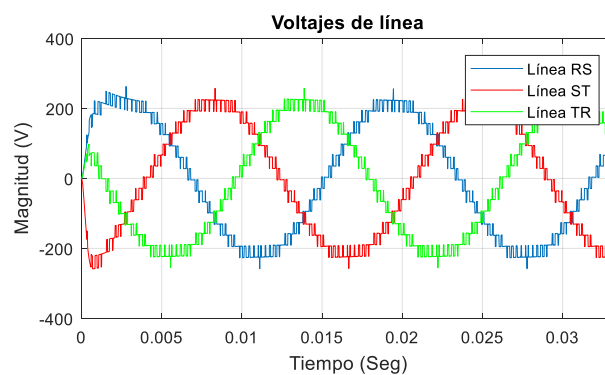


Fig. 20. Forma de onda de las tensiones de línea.

La forma de onda de la modulación presenta el mismo comportamiento descrito en las secciones anteriores, esto deja ver que el sistema se comporta de una manera adecuada. El contenido armónico de esta modulación es de solo el 0.3109%. Lo cual es muy bajo para un consumo de 651W. En cuanto al valor RMS, este es de 156.8

V, lo cual representa una depresión del 28.72%. El espectro armónico de la tensión de línea se muestra en la siguiente figura.

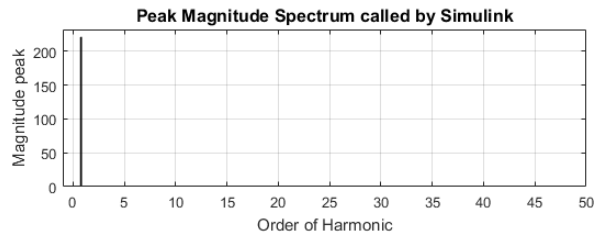


Fig. 21. Espectro armónico de la tensión de línea

Como se puede ver claramente, el espectro es completamente limpio en la banda de los primeros 50 armónicos. La forma de onda de la corriente de línea que va hacia la carga se muestra en la figura 22.

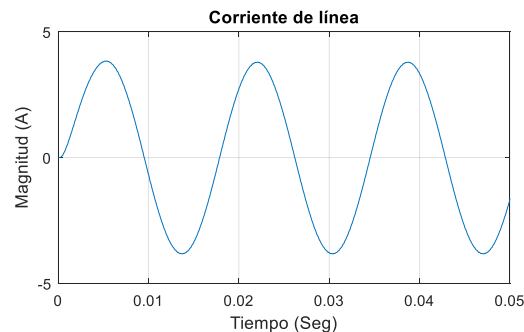


Figura 22. Forma de onda de la corriente de línea.

Esta corriente tiene un valor RMS de 2.689 A, y su forma es sinusoidal, el contenido armónico es muy bajo como se puede apreciar en la siguiente figura.

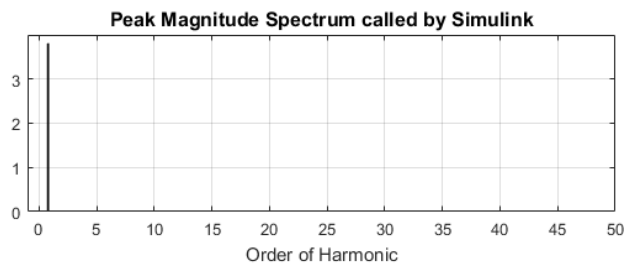


Fig. 23 Espectro armónico de la corriente de línea.

El THD es de solo el 0.270 % en todo el espectro es decir en la banda extendida hasta el armónico 8840. El espectro es completamente limpio.

### SIMULACIÓN FRENTE A VARIOS PASOS EN CARGA

Para observar el comportamiento del sistema frente a varios escalones, se realizó una simulación en la cual se inyectó una señal escalera que va desde 0.4 a 1.3 en pasos de 0.1. la simulación se realizó con la carga inductiva de  $20+15j$  ohm. La señal

de entrada y el valor RMS de la tensión de línea a la salida del inversor se muestran en la siguiente figura

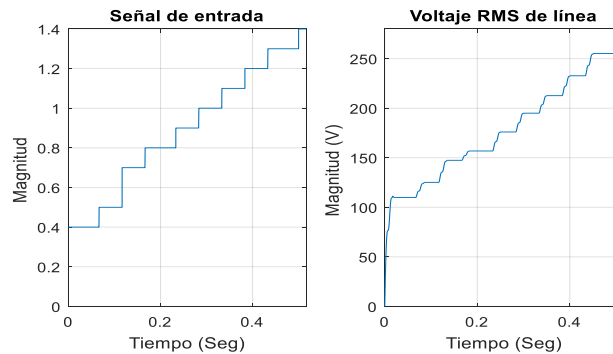


Fig. 24. Señal de entrada y tensión de salida en carga.

Como se puede ver en la figura, de los 10 escalones presentes en la entrada se replican nueve en la salida, ya que el último cuya magnitud es de 1.4 se encuentra por arriba del nivel de saturación, que es de 1.3. El comportamiento del THD de la corriente y la tensión se muestran en la figura 25.

Como se puede observar el THD es prácticamente nulo, se presentan valores superiores al 1% solo en los ciclos transitorios en los cuales se establece un cambio de nivel de tensión, cuando el convertidor y el sistema entran al estado estable el THD es prácticamente nulo. El THD de la corriente es algo superior al THD de voltaje, pero cabe resaltar que el THD de corriente es evaluado hasta el armónico 8840, mientras que el THD de la tensión de línea es evaluado hasta el armónico 50.

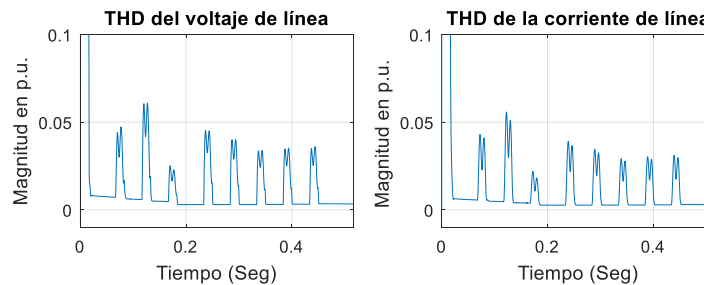


Fig. 25. THD de voltaje y corriente de línea

## CONCLUSIONES

El convertidor propuesto se controla con una única señal de control que le indica al convertidor CD/CD que porcentaje de tensión nominal se requiere a la salida, esto hace que el prototipo sea una fuente de voltaje alterno variable, cuya tensión RMS de línea a la salida puede variar del 0 al 100%.

En cuanto a la linealidad del cambio de tensión, esta depende de la carga demandada, cuando el convertidor opera con cargas que demandan poca corriente, el cambio de tensión es no lineal presentándose una variación de tensión forma de función polinómica de grado 3; cuando el convertidor asume cargas que demandan corrientes altas, el cambio de tensión se tiende a linealizar. Sin embargo, cabe decir que la zona de operación cercana al modo bypass siempre presenta un comportamiento cercano al lineal.

La corriente de salida del convertidor no presenta rizado ni conmutaciones, es una onda sinusoidal completamente lisa, esto es muy bueno ya que suministra corriente con una calidad adecuada; independientemente del cambio del punto de operación del convertidor, no se presentan sobre impulsos o transitorios que puedan ser negativos para la carga.

La tensión de salida del convertidor es una onda escalonada con varios pulsos, los cuales optimizan el contenido armónico e independientemente del nivel de tensión, el THD es prácticamente nulo, lo cual optimiza la calidad de la energía suministrada.

El prototipo desarrollado se puede utilizar en aplicaciones industriales o académicas en donde se quiera variar la tensión alterna de un sistema trifásico con óptima calidad de la energía, sin recurrir a autotransformadores con partes móviles que pueden generar chispas y requieran mantenimiento continuo.

### **Referencias Bibliográficas**

- [1] V. Gaikwad, S. Mutha, R. Mundhe, O. Sagar, and T. Chinchole, "Survey of PWM techniques for solar inverter," in 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC), 2016, pp. 501–504.
- [2] S. A. Saleh and M. A. Rahman, "Modeling of Power Inverters," in An Introduction to Wavelet Modulated Inverters, IEEE, 2011, p. 1.
- [3] S. A. Saleh and M. A. Rahman, "Introduction to Power Inverters," in An Introduction to Wavelet Modulated Inverters, IEEE, 2011, p. 1.
- [4] A. Ruderman, "About Voltage Total Harmonic Distortion for Single- and Three-Phase Multilevel Inverters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 3, pp. 1548–1551, 2015.
- [5] H. Abu-Rub, M. Malinowski, and K. Al-Haddad, "Multilevel Converter/Inverter Topologies and Applications," in Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications, IEEE, 2014, p. 1.
- [6] B. Wu and M. Narimani, "Other Multilevel Voltage Source Inverters," in High-Power Converters and AC Drives, IEEE, 2017, p. 1.

- [7] V. Roberge, M. Tarbouchi, and F. Okou, "Strategies to Accelerate Harmonic Minimization in Multilevel Inverters Using a Parallel Genetic Algorithm on Graphical Processing Unit," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 10, pp. 5087–5090, 2014.
- [8] T. Jacob and L. P. Suresh, "A review paper on the elimination of harmonics in multilevel inverters using bioinspired algorithms," in *2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2016, pp. 1–8.
- [9] M. Srndovic, A. Zhetessov, T. Alizadeh, Y. L. Familiant, G. Grandi, and A. Ruderman, "Simultaneous Selective Harmonic Elimination and THD Minimization for a Single-Phase Multilevel Inverter With Staircase Modulation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 2, pp. 1532–1541, 2018.
- [10] A. Anurag, N. Deshmukh, A. Maguluri, and S. Anand, "Integrated DC–DC Converter Based Grid-Connected Transformerless Photovoltaic Inverter With Extended Input Voltage Range," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 10, pp. 8322–8330, 2018.
- [11] L. D. P. Fernandez, J. L. D. Rodriguez, and M. A. J. Carvajal, "Three-phase multilevel inverter with selective harmonic elimination," in *2015 Workshop on Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA)*, 2015, pp. 1–6.
- [12] J. L. D. Rodriguez, L. D. P. Fernandez, and A. P. Garcia, "Harmonic distortion optimization of multilevel PWM inverter using genetic algorithms," in *2014 IEEE 5th Colombian Workshop on Circuits and Systems (CWCAS)*, 2014, pp. 1–6.
- [13] R. S. Weissbach and K. M. Torres, "A noninverting buck-boost converter with reduced components using a microcontroller," in *Proceedings. IEEE SoutheastCon 2001 (Cat. No.01CH37208)*, 2001, pp. 79–84.
- [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*, 2015, pp 110-120
- [15] Molina M, Tebaldi M, Bolognini N.2013.Eficiencia de difracción del registro de speckle modulados generados a partir de superficies reflecto-difusoras. *Bistua:Revista de la Facultad de Ciencias Basicas*. 10 (2):50-60.

\*Para citar este artículo:Pabón Fernández L.D.; Díaz Rodríguez J.L. and Pardo García A. DC/AC power converter with controlled voltage output..Revista Bistua. 2018 16(2):95-109

+ Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas: Pabón Fernández L.D. Facultad de Ingenierias.Universidad de Pamplona – Colombia. email: davidpabon@hotmail.es

Recibido: Diciembre 07 de 2017

Aceptado: Marzo 14 de 2018