

# Aplicaciones en la gestión de energía eléctrica de media y baja tensión por medio de un transformador de estado sólido



DOI : 10.53358/ideas.v4i1.687

Oscar Gonzales<sup>1</sup>, Ricardo Rosero<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Carrera de Electricidad, Instituto Superior Universitario Sucre,  
Teodoro Gómez de la Torre S14 - 72 y Joaquín Gutiérrez, Quito, Ecuador

<sup>1</sup>{ogonzales, rrosero}@tecnologicosucre.edu.ec

## RESUMEN

En el presente artículo se presenta una descripción de las características y las funcionalidades de un transformador de estado sólido (TES) destinado a la gestión de energía. Se presentan esquemas de simulación que están presentes para diferentes escenarios en los cuales el TES permite transformar la energía de un sistema de distribución de baja y media tensión con los resultados respectivos y sus implicaciones.

**Palabras Clave:** TES, potencia, energía, desfase, transformador.

## Introducción

La implementación de convertidores de potencia en diferentes ámbitos de la ciencia y la tecnología ha sido muy importante para lograr mejorar la eficiencia en la gestión de energía eléctrica. El uso prominente de estos dispositivos se debe a las ventajas que se obtienen por sus bajas pérdidas de conmutación cuando operan a valores de frecuencia altos (entre los 5 KHz a 100 KHz). De esta forma se busca que el consumo energético sea eficiente, sin importar el ambiente en el cual se presente un proceso de conversión y consumo de energía (procesos eléctricos, mecánicos, térmicos, químicos, etc). En el ámbito de la transmisión y distribución de energía eléctrica, existen los transformadores como medios gestores del transporte de la energía eléctrica. Durante generaciones, el transformador es el dispositivo que ha podido cambiar los niveles de voltaje/corriente, sea elevándolas o reduciéndolas para un propósito específico en las centrales de generación y distribución. Sin embargo, se evidencian limitaciones en el manejo eficiente de la energía por parte del transformador como las pérdidas generadas por corrientes parásitas en sus bobinados, pérdidas por calentamiento, pérdidas por efecto de histéresis, entre otros.

Una alternativa muy productiva que se ha propuesto en los últimos años es la construcción de un transformador de estado sólido (TES). Este es un dispositivo formado por elementos semiconductores de potencia que puede operar a altas frecuencias, con pérdidas de energía bajas. Otro de sus beneficios que se puede apreciar es la variación del voltaje de salida del transformador sin depender de la relación de vueltas entre su primario y secundario [1].

Se han encontrado varios trabajos que exploran detalladamente técnicas de mejoramiento del desempeño en los TES. En [2] los autores hacen un estudio extenso sobre las topologías y aplicaciones de los TES. Autores como [3], hacen referencia a una revisión de las acciones de control para la regulación de potencia con el fin de mejorar la gestión de energía. De este modo, se pueden citar otros trabajos como [4] – [7] que hacen un extenso análisis sobre las funcionalidades de los TES.



Sin embargo, existen pocos trabajos que muestren aplicaciones extendidas que pueden alcanzar los TES bajo parámetros de control y conmutación determinados. Por esta razón, el presente artículo científico muestra algunas de las aplicaciones que pueden implementarse en los TES bajo diferentes etapas de conmutación y control. El artículo se divide en las siguientes secciones: II. Transformador de Estado Sólido, III. Esquema propuesto para el TES, IV. Pruebas y Resultados, V. Trabajo Futuro, y VI. Conclusiones.

## Descripción del TES

La red de suministro de energía eléctrica existente se caracteriza por diferentes niveles de tensión, por ejemplo, un nivel de media tensión (MT), que van desde 7.2 kV hasta 24 kV para distancias largas de distribución de potencia, mientras que una distribución de baja tensión (LT) de nivel, que van desde 127V hasta 690V se selecciona para el suministro final de las cargas. La adaptación y el aislamiento entre las diferentes secciones de la red se realiza por transformadores pasivos operados a la

frecuencia de línea (50 Hz / 60 Hz), por lo que, en caso de aplicaciones de alta potencia, estos transformadores se colocan convenientemente, muy cercanos a la carga con el fin de minimizar las pérdidas en la transmisión de energía.

Un TES es un dispositivo activo de conversión de energía que posee las siguientes características:

- Disponibilidad de acoplamiento DC en baja tensión
- Corrección activa del factor de potencia
- Compensación de potencia reactiva
- Filtrado activo
- Aislamiento a perturbaciones
- Protección inteligente

Las ventajas fundamentales que ofrece este dispositivo se centran en: proporcionar energía en función de parámetros de calidad y el acoplamiento de fuentes de sistemas de energía renovable.

En cuanto a las aplicaciones en donde se utiliza el TES se destacan los sistemas de distribución de energía y el enlace de varios dispositivos eléctricos/electrónicos en redes inteligentes (Fig. 1).

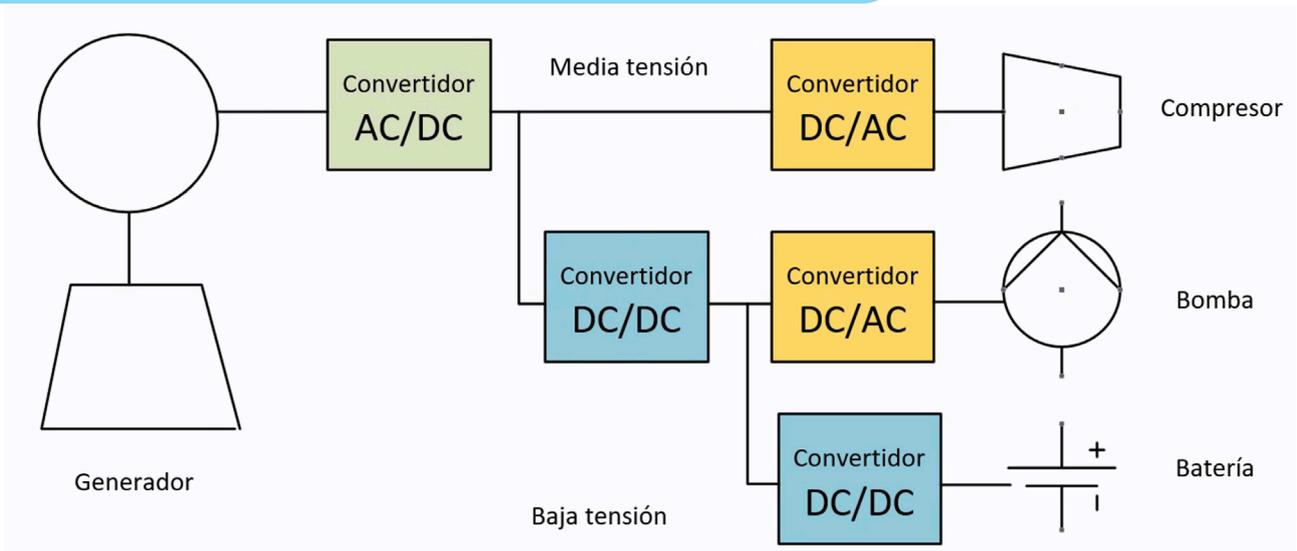


Fig. 1. Acoplamiento de dispositivos con un TES [1].

Para el siguiente trabajo se ha implementado un TES con una arquitectura matricial [1]. Este circuito (Fig. 2) se encuentra constituido por dos puentes, cada uno con 4 interruptores de potencia que representan los IGBTs. El esquema se complementa con un núcleo de ferrita el cual tiene como característica principal el de poder desenvolverse a altas frecuencias.

Finalmente, se implementan filtros a la entrada y a la salida del dispositivo. El flujo de la energía es bidireccional y es importante obtener una señal senoidal a una frecuencia de operación de la red eléctrica (60 Hz para la red local) y a un voltaje variable. Se consiguen estas características empleando una secuencia de conmutación como la que se muestra en la Fig. 3, en donde se espera que todos los dispositivos de potencia trabajen a la misma frecuencia la cual es un múltiplo del valor de la frecuencia de la red eléctrica y hay un desfase entre conmutaciones dadas por un ángulo que va a convertirse en uno de los medios fundamentales al momento de variar el voltaje de salida.

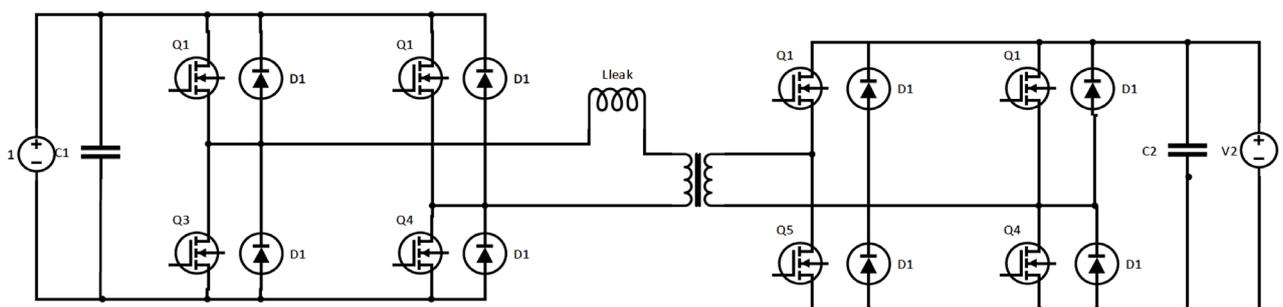


Fig. 2. TES tipo matricial [1].

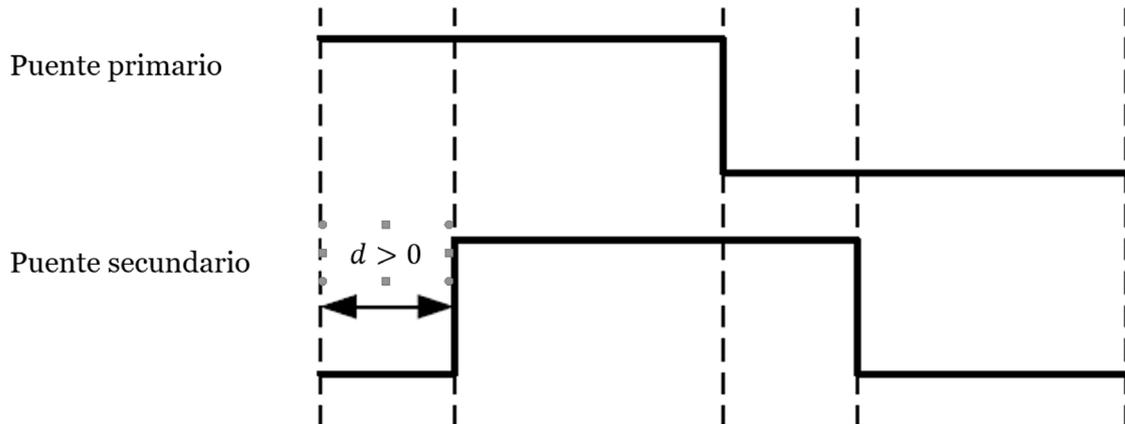


Fig. 3. Secuencia de conmutación de los interruptores de potencia [1].

El TES presenta regula la potencia de salida por medio de la siguiente relación de voltajes:

$$P = \frac{V_1 V_2}{2Nf_s L_t} d(1 - d) \quad (1)$$

Donde  $V_1$  es el voltaje de entrada,  $V_2$  el voltaje de salida,  $N$  la relación de vueltas del transformador de ferrita,  $f_s$  la frecuencia de conmutación,  $L_t$  la inductancia de magnetización y  $d$  el ángulo de desfase entre las señales de entrada y salida del TES.

La conmutación del convertidor se regula con la relación de trabajo:

$$\alpha = t_{on} f_s \quad (2)$$

Donde  $t_{on}$  es el tiempo de encendido del semiconductor y  $\alpha$  es el ángulo de disparo.

### Casos de estudio de operación del TES

Se construyó el esquema en PSIM® (Fig. 5) tomando en cuenta las consideraciones relacionadas con las conmutaciones de cada uno de los IGBTs. Además, se han incorporado medidores de voltaje y corriente para ver en algunas etapas el proceso de conversión de energía.

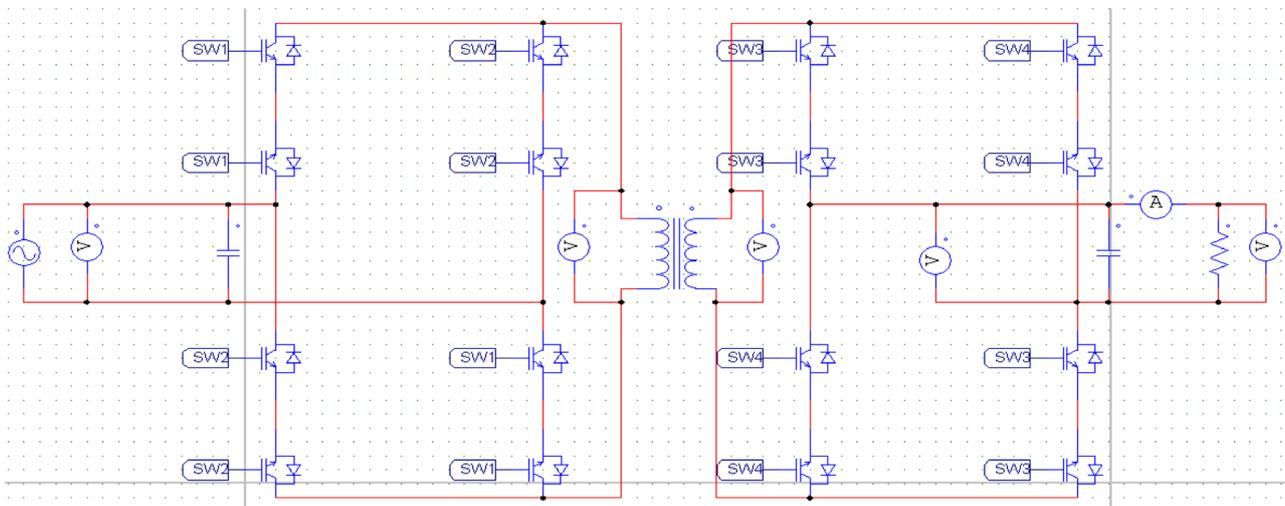


Fig. 5. Esquema implementado en PSIM®.

Uno de los elementos adicionales que se incorporan al esquema es un filtro. De acuerdo con las pruebas y resultados obtenidos previamente se determinó la necesidad de incorporar un filtro pasa bajos de segundo orden el cual presenta una mejor pendiente de filtrado para omitir componentes de alta frecuencia que al fin y al cabo distorsionan la forma de onda del voltaje de salida. A continuación, se presentan las pruebas que fueron realizadas al convertidor.

### Técnica de conmutación por desplazamiento de fase

De acuerdo con el esquema de conmutación visto anteriormente, se emplea en el convertidor una frecuencia de trabajo de 480 Hz. Esta frecuencia es 8 veces mayor que la fundamental y se ha escogido este valor para obtener una visualización adecuada del cambio de las ondas en la entrada y salida del TES. La relación de trabajo de la señal moduladora es 0.5. Los valores de desplazamiento entre el interruptor 1 y 3 oscilan entre  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ . El valor límite de desfase se consigue a  $90^\circ$ , para valores superiores lo que sucede en la salida es un proceso cíclico en el cual la onda salida repite sus valores como si el desplazamiento fuera nuevamente  $0^\circ$ . El valor de frecuencia de corte empleado en el filtro es de 80 Hz para tratar de obtener la fundamental pura con más precisión y eliminar armónicos adyacentes que distorsionan en gran manera la onda de voltaje de salida. Además, es necesario aplicar una ganancia al filtro debido a que con el afán de obtener una senoidal pura y una frecuencia de corte cercana a 60 Hz se disminuye la amplitud y es necesario recobrar valores de voltaje perdidos. En la Fig. 6 se aplica la prueba a  $0^\circ$ .

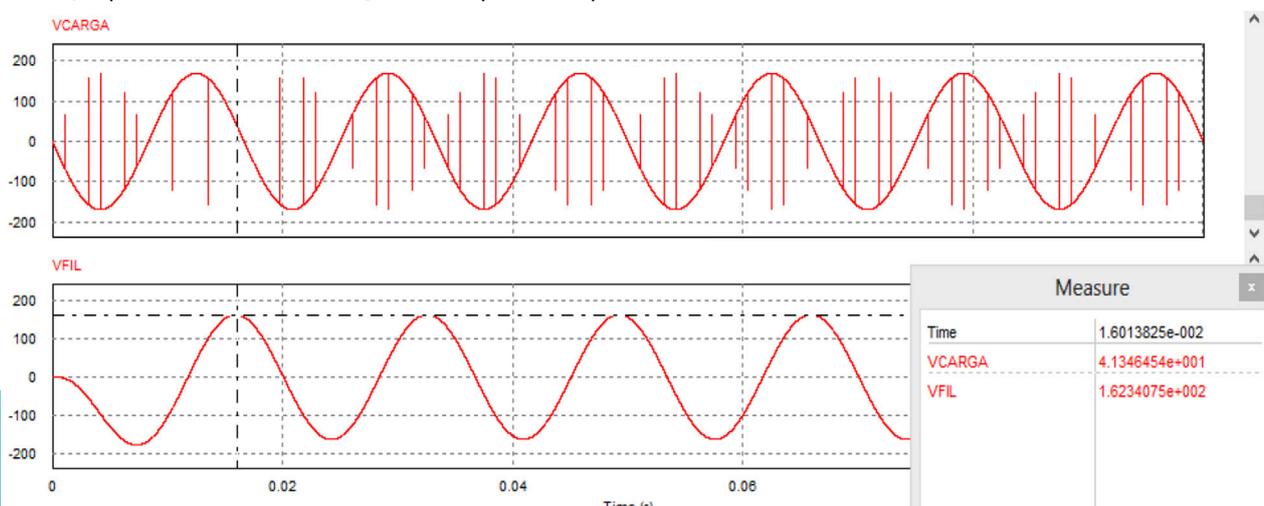


Fig. 6. Primera prueba de desfase.

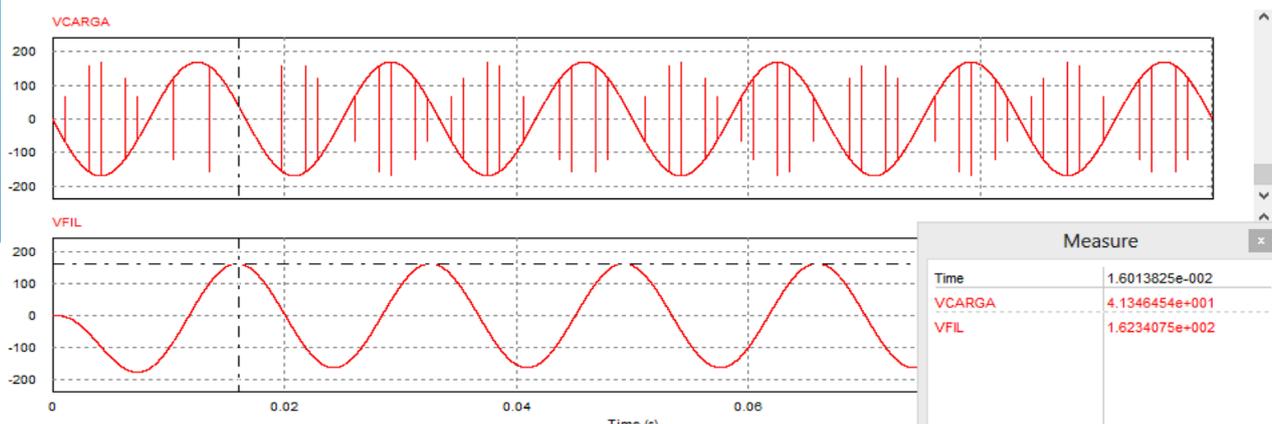


Fig. 7. Espectro de frecuencia de la primera prueba.



El desfase al ser mínimo presenta una salida senoidal pura a excepción de picos de voltaje que surgen por las conmutaciones. Además, se pueden presentar estos casos en donde no es necesario aplicar un filtro ya que la señal presenta armónicos de alta frecuencia muy bajos o imperceptibles (Fig. 7).

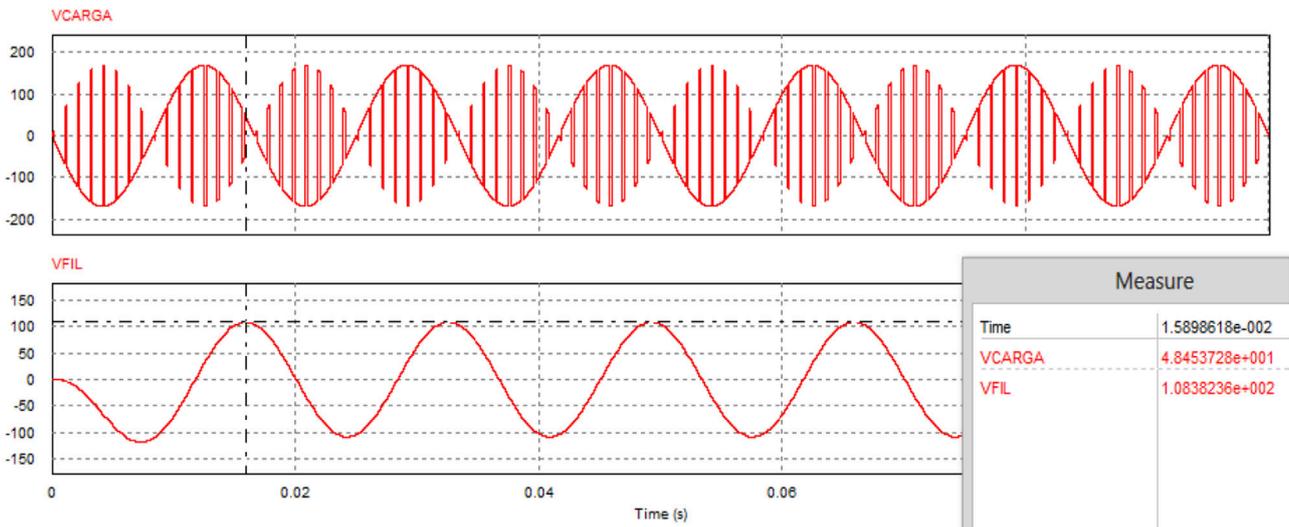


Fig. 8. Segunda prueba de desfase.

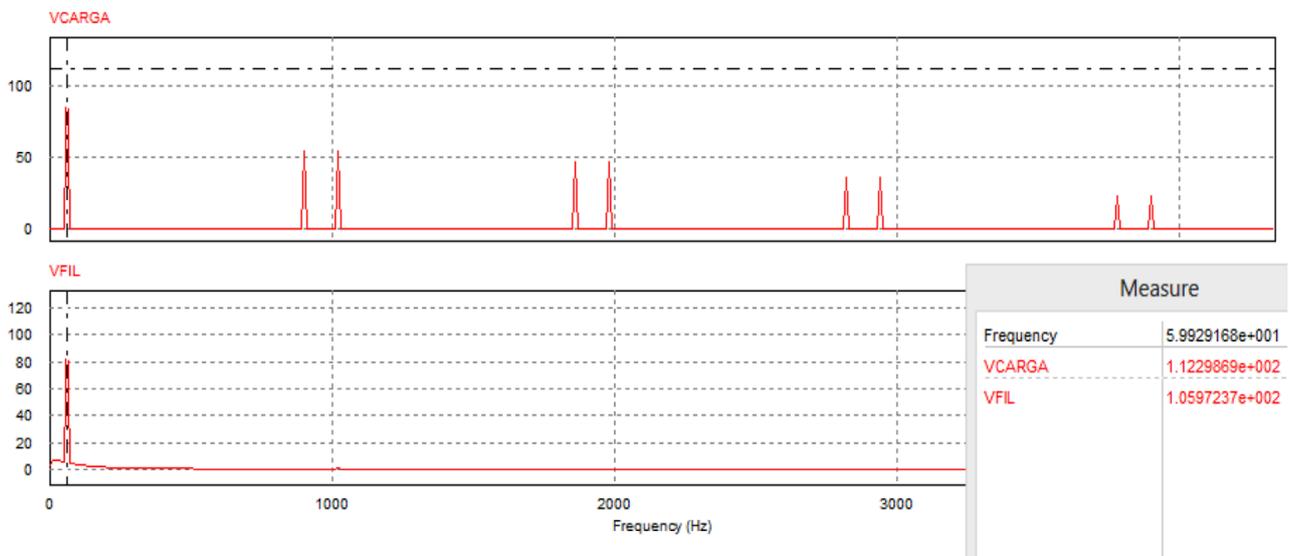


Fig. 9. Espectro de frecuencia de la segunda prueba.

Se ha conseguido bajar el voltaje de salida a 108V. En cuanto al grafico de frecuencia, se observa en más la importancia del uso del filtro en el sistema ya que varias frecuencias de orden superior han sido anuladas. En la Fig. 10 se aplica la prueba a  $60^\circ$  y se aprecia su espectro en frecuencia en la Fig. 11.

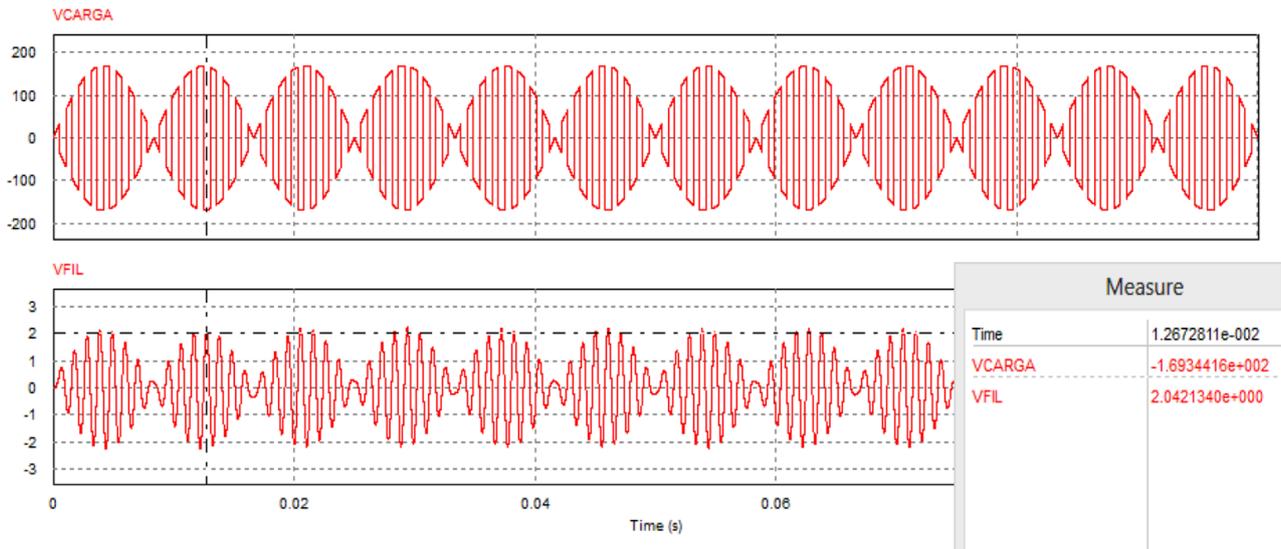


Fig. 10. Tercera prueba de desfase.

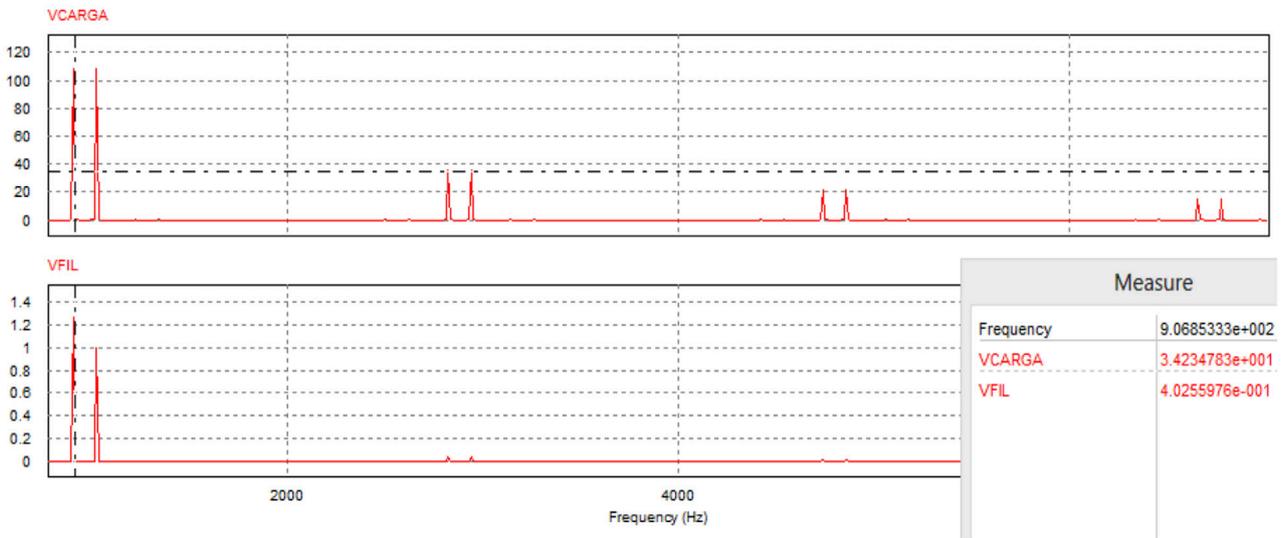


Fig. 11. Espectro de frecuencia de la tercera prueba.

Se aprecia que el voltaje de salida ha disminuido a un voltaje pico de 54V y la presencia de los valores de los armónicos se hace más notoria. En la gráfica de frecuencia se puede corroborar el enunciado anterior debido a que el espectro nos dice que existen armónicos que tienen un valor alto comparado con la fundamental. Pese a que estos valores de armónicos han sido filtrados para obtener una mejor respuesta, hay residuos que se visualizan en la señal de salida debido a su gran magnitud. Otro punto importante es el de que el armónico de gran valor que influye en la respuesta de salida es el de 900 Hz y se relaciona con el doble de la frecuencia de conmutación utilizada en el circuito.

Finalmente, en la Fig. 12 se aplica la prueba a 90° y se aprecia su espectro en frecuencia en la Fig. 13.

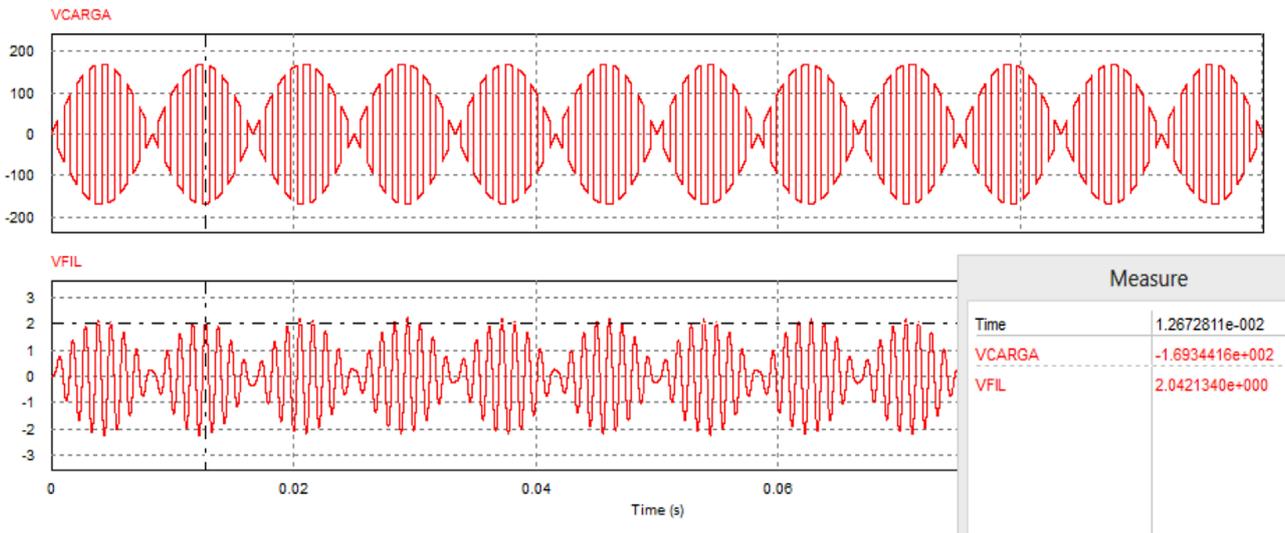


Fig. 12. Cuarta prueba de desfase.

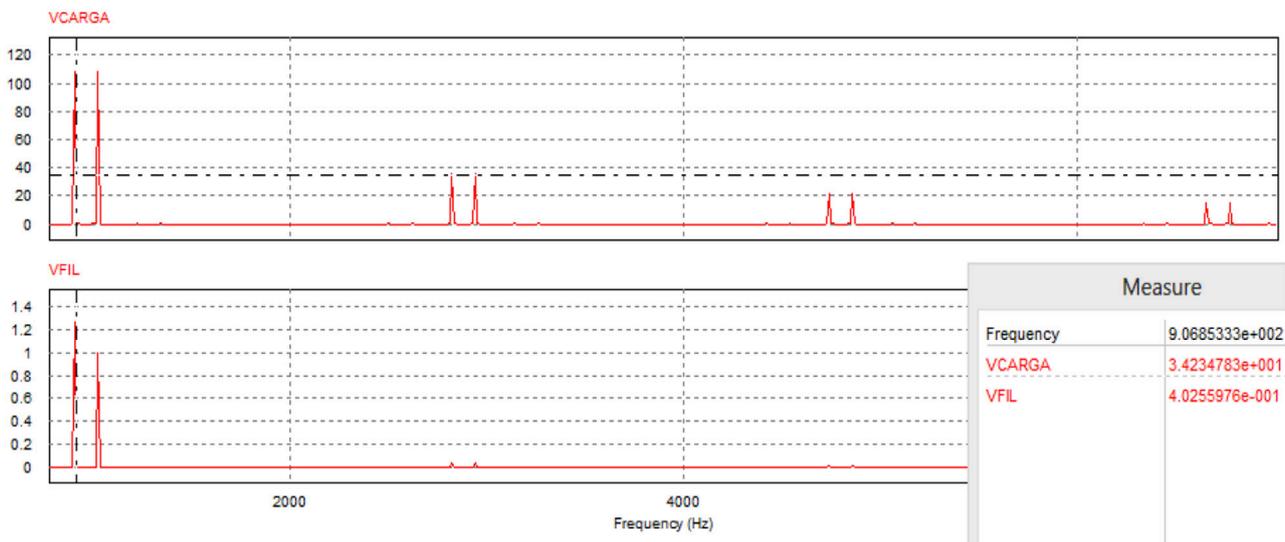


Fig. 13. Espectro de frecuencia de la cuarta prueba.

Se aprecia que el gráfico de la onda en el tiempo se ha atenuado mucho. Alcanza un valor de 2V como máximo. Sin embargo, esta onda de salida no es senoidal, esto se corrobora con la gráfica del espectro de frecuencia en donde se visualiza que la onda ve un valor predominante de frecuencia en 900Hz, tal como lo sucedido en el anterior caso. El armónico fundamental no aparece porque se ha anulado debido al desplazamiento de fase en la conmutación lo que hizo posible disminuir el voltaje de salida pero generó una onda de ruido en el sistema.

### Técnica de conmutación por variación del ancho de pulso

En este caso, se analiza el efecto que presenta un cambio en la relación del ancho de pulso aplicado a cada uno de los IGBTs del convertidor. Para ello se realizan pruebas con los siguientes valores: 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1 y tomando en cuenta que el valor del desfase en la conmutación al ser fijo es de específicamente  $45^\circ$ .

En la Fig. 14 se aplica la prueba = 0 y se aprecia su espectro en frecuencia en la Fig. 15.

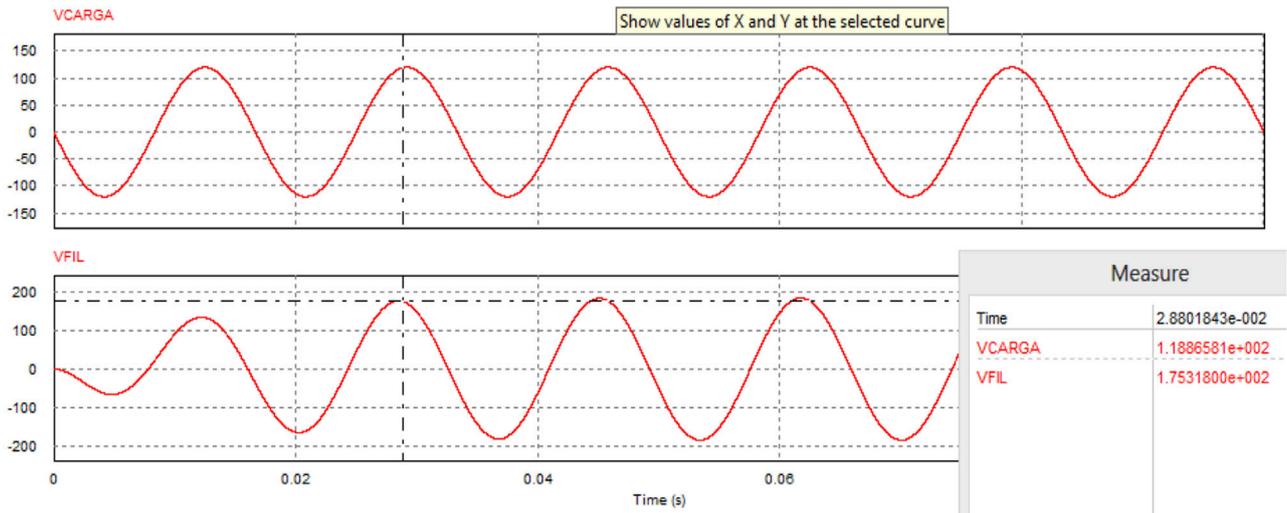


Fig. 14. Primera prueba con cambios de  $\delta$ .

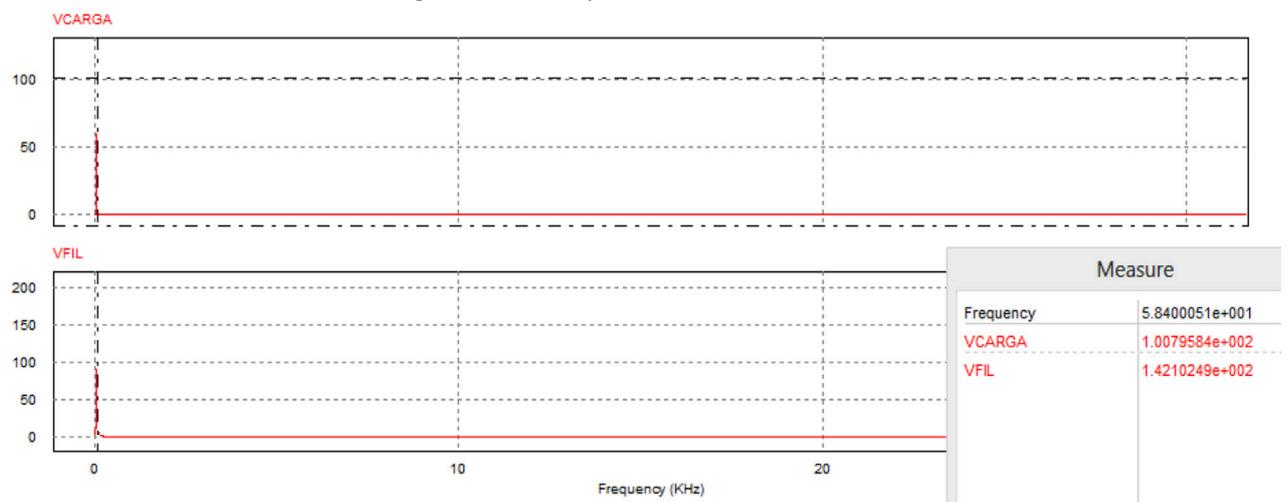


Fig. 15. Espectro de frecuencia de la primera prueba.

Las figuras muestran una onda senoidal pura y sin mucho desfase por la acción del filtro en la salida. El gráfico del espectro de frecuencias afirma que la señal es pura ya que no existe ningún tipo de armónico que tratar de distorsionar la onda.

En la Fig. 16 se aplica la prueba  $\delta = 0,25$  y se aprecia su espectro en frecuencia en la Fig. 17.

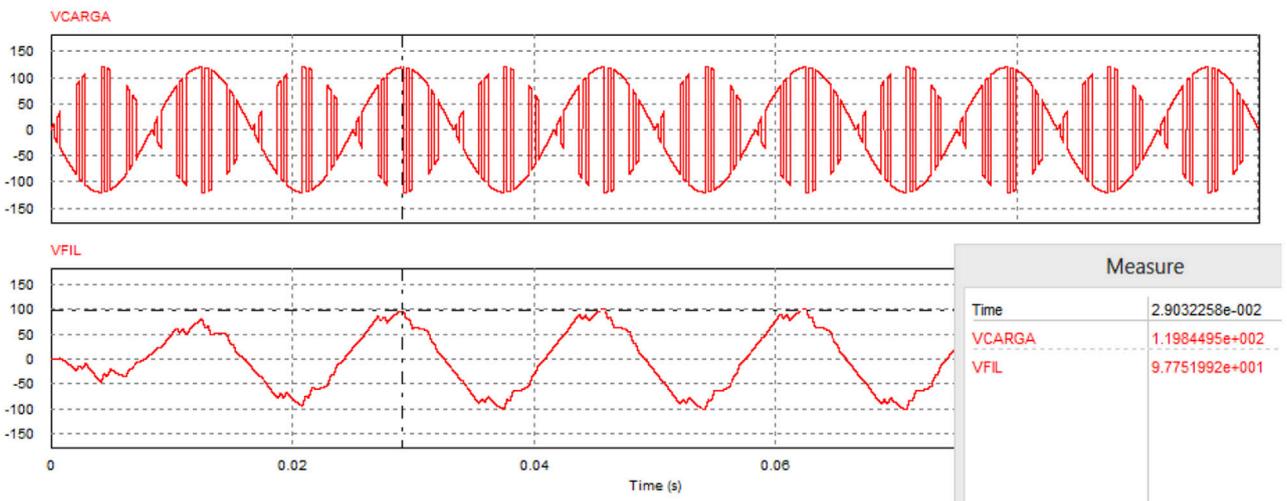


Fig. 16. Segunda prueba con cambios de  $\delta$ .

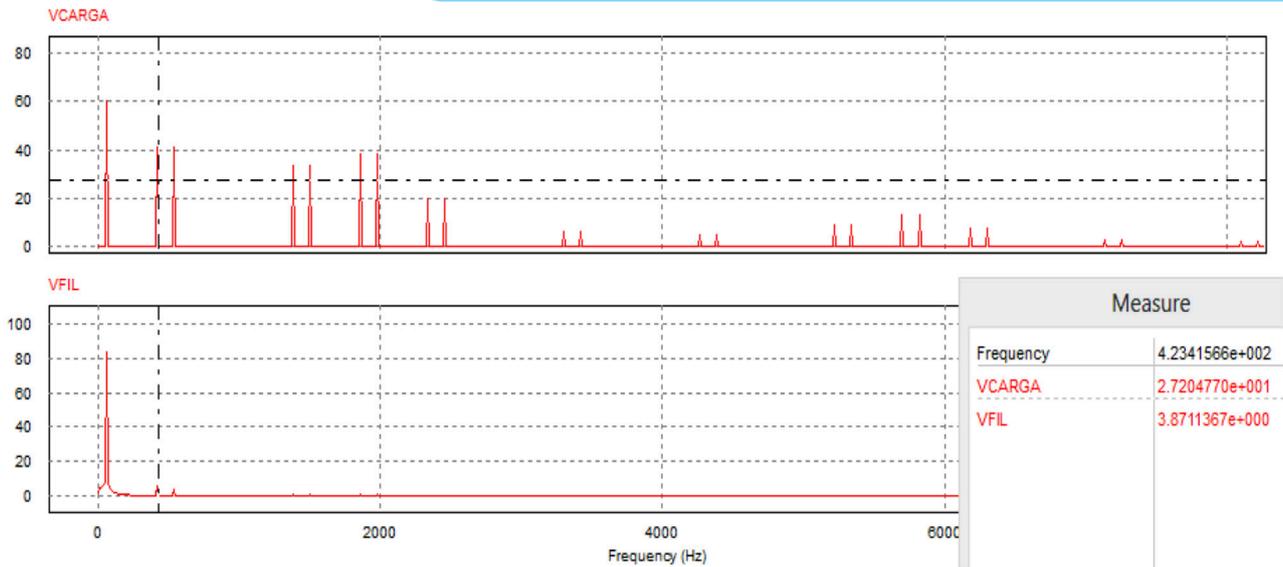


Fig. 17. Espectro de frecuencia de la segunda prueba.

En la Fig. 18 se aplica la prueba  $\delta = 0,5$  y se aprecia su espectro en frecuencia en la Fig. 19.

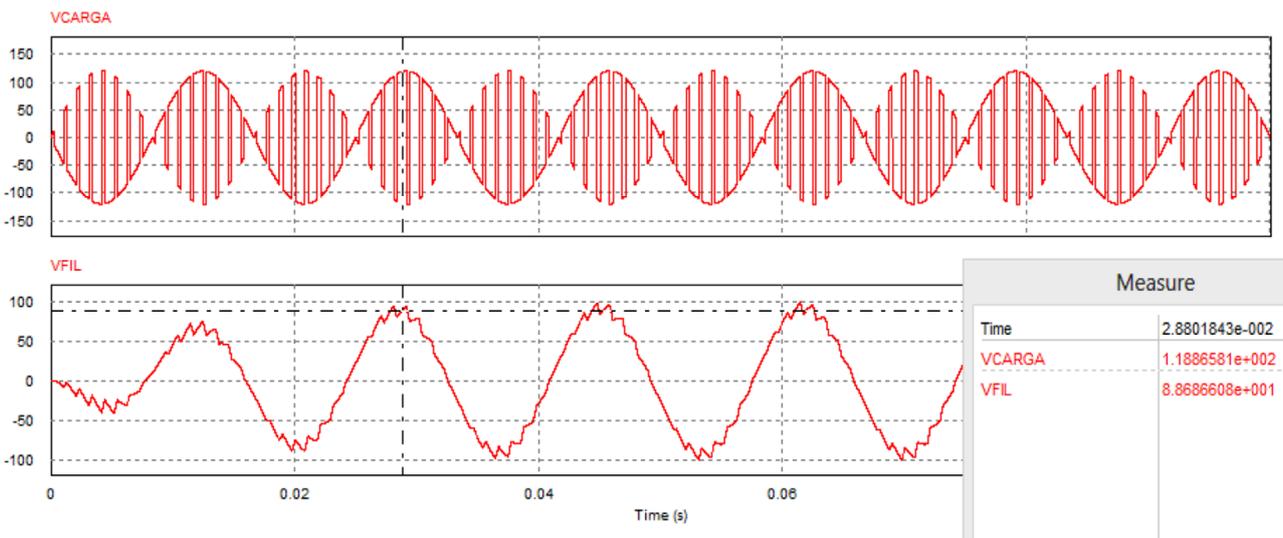


Fig. 18. Tercera prueba con cambios de  $\delta$ .

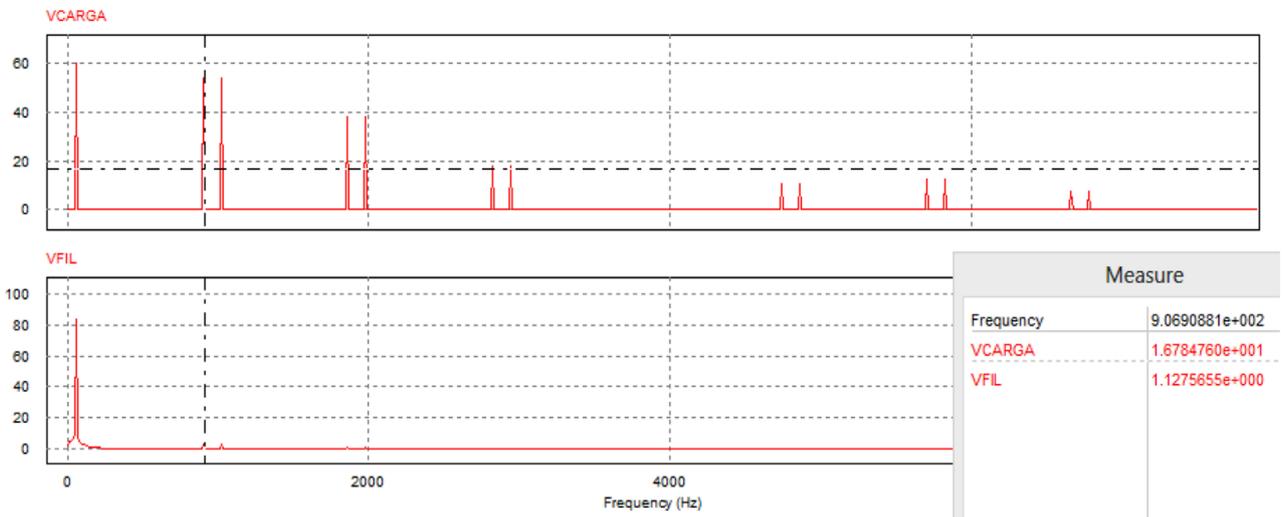


Fig. 19. Espectro de frecuencia de la tercera prueba.

La gráfica de la onda de salida muestra una amplitud cercana de 88V pico y se nota que hasta el momento con cada aumento de la relación de trabajo se produce un decremento en la amplitud de la onda de salida. El espectro de frecuencias muestra un comportamiento muy similar al caso anterior en el cual las componentes cercanas a la fundamental y que no han sido completamente filtradas por su gran magnitud, generan distorsión en la onda de salida.

En la Fig. 20 se aplica la prueba  $\delta = 0,75$  y se aprecia su espectro en frecuencia en la Fig. 21.

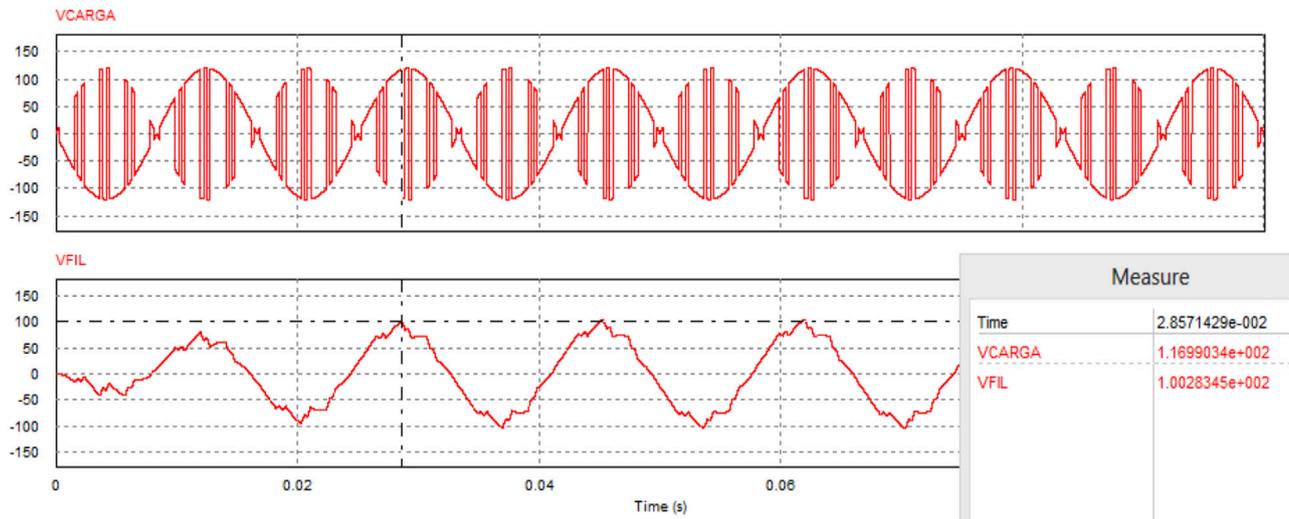


Fig. 20. Cuarta prueba con cambios de  $\delta$ .

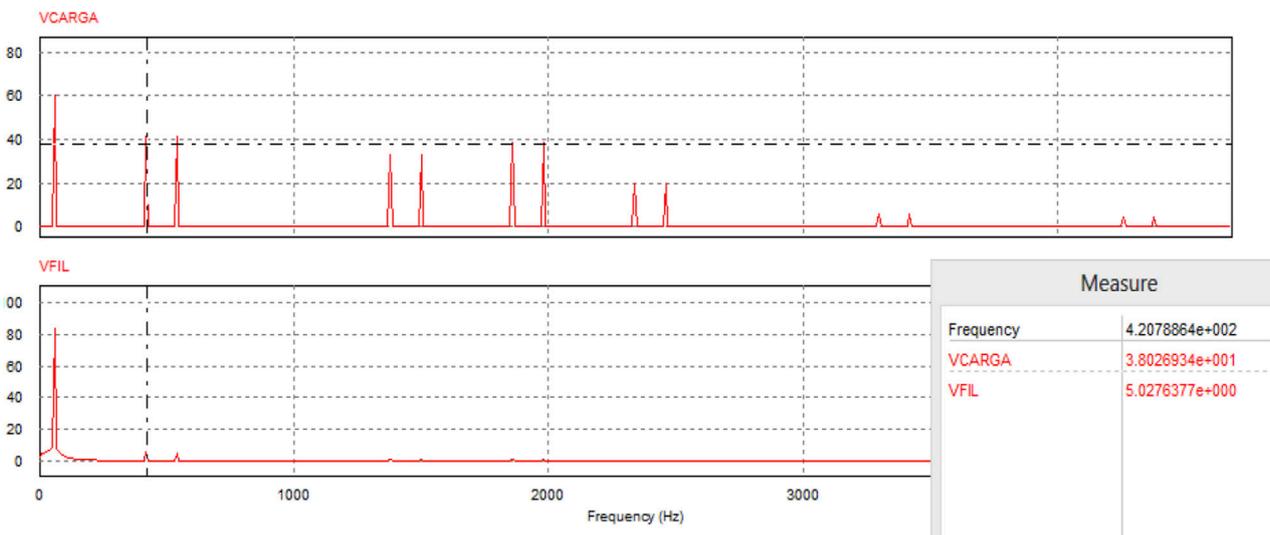


Fig. 21. Espectro de frecuencia de la cuarta prueba.

Al valor de 0.75 de relación de trabajo, la onda de salida se muestra con un valor muy similar al producido por un  $\delta = 0.25$ . La diferencia en el voltaje pico es de apenas 3V lo cual podrán deberse más a la distorsión en el punto en el cual se ha tomado la medición. El espectro de frecuencia muestra el comportamiento descrito en los párrafos anteriores.

En la Fig. 22 se aplica la prueba  $\delta = 0.75$  y se aprecia su espectro en frecuencia en la Fig. 23.

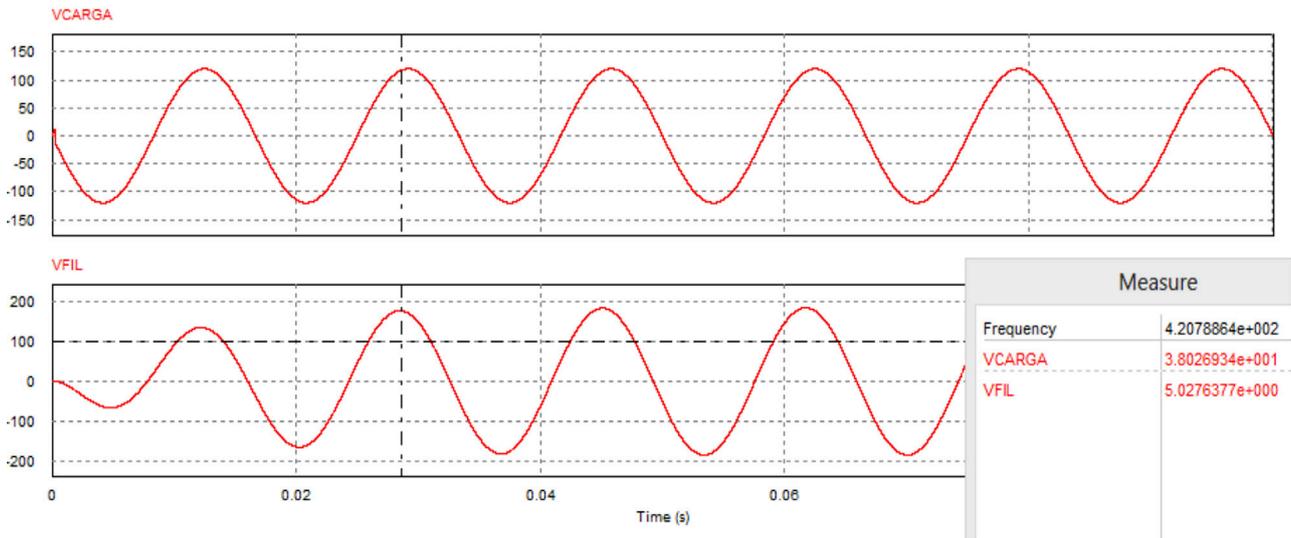


Fig. 22. Quinta prueba con cambios de  $\delta$ .

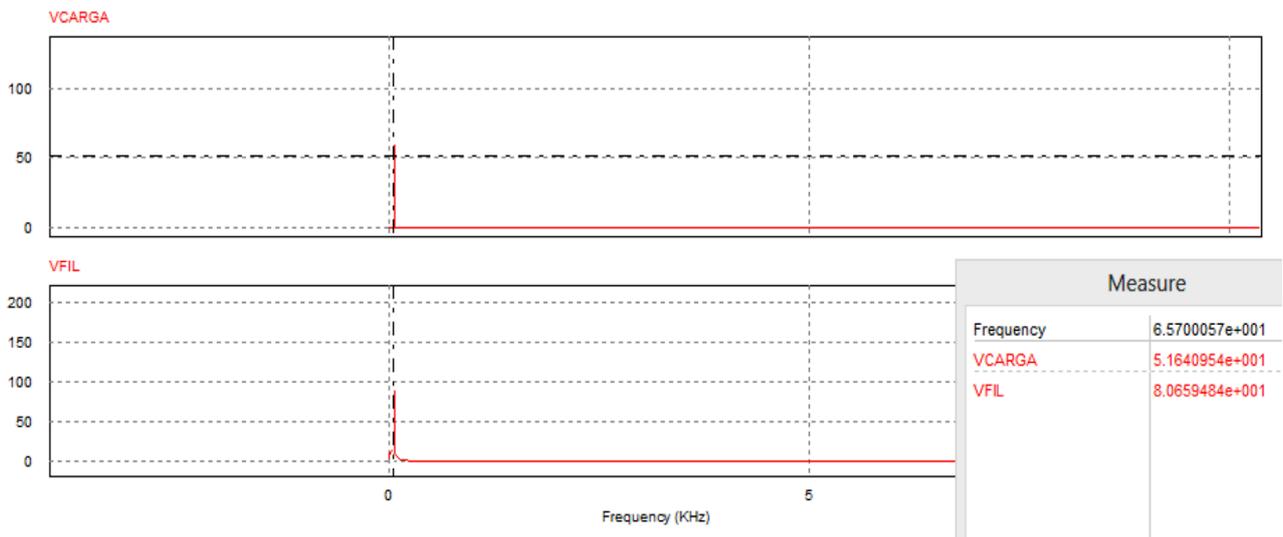


Fig. 23. Espectro de frecuencia de la quinta prueba.

Finalmente, con un valor de 1 de relación de trabajo se ha logrado obtener una nueva senoidal y el espectro de frecuencia muestra el gráfico de la componente fundamental tal cual sucedido en el primer caso analizado en este apartado.

### 3.3 Implementación de un filtro pasa banda

En la implementación del filtro pasa banda se utiliza un rango comprendido entre 30 Hz y 100 Hz. Con esto se podrá apreciar una solución alternativa al filtro pasa bajos

que se utilizó en las primeras pruebas.

Por lo cual se tomarán los mismos valores de desfase para analizar los posibles cambios en el voltaje de salida. En la Fig. 24 se aplica la prueba a  $0^\circ$  y se aprecia su espectro en frecuencia en la Fig. 25.

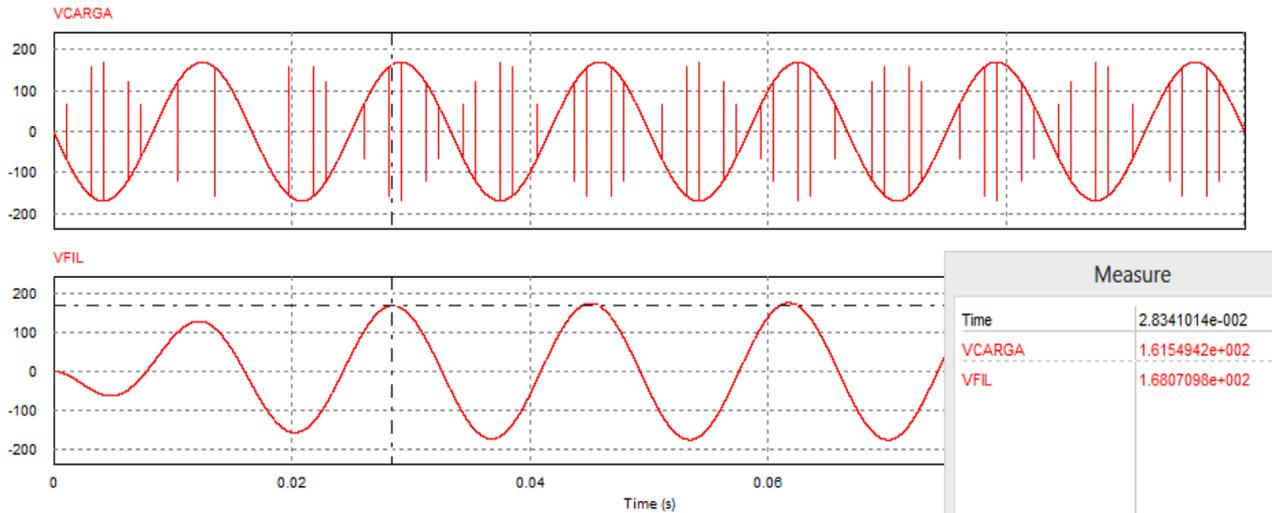


Fig. 24. Primera prueba con cambio de fase.

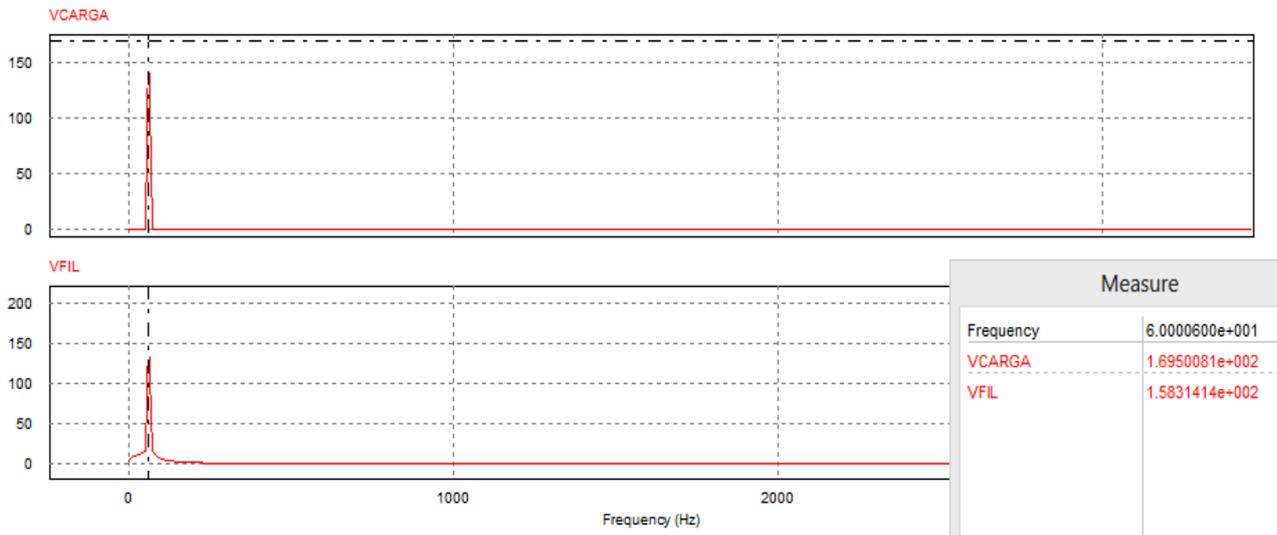


Fig. 25. Espectro de frecuencia de la primera prueba.

El gráfico presenta un valor similar al obtenido con el filtro pasa bajos, tanto para su amplitud como para su frecuencia. En la Fig. 26 se aplica la prueba a 30° y se aprecia su espectro en frecuencia en la Fig. 27.

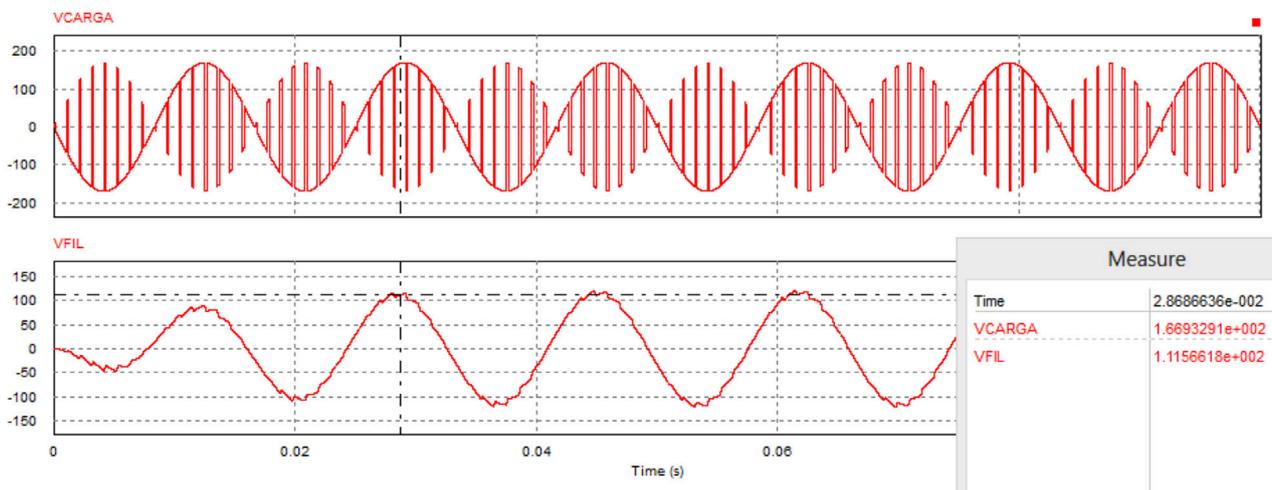


Fig. 26. Segunda prueba con cambio de fase.

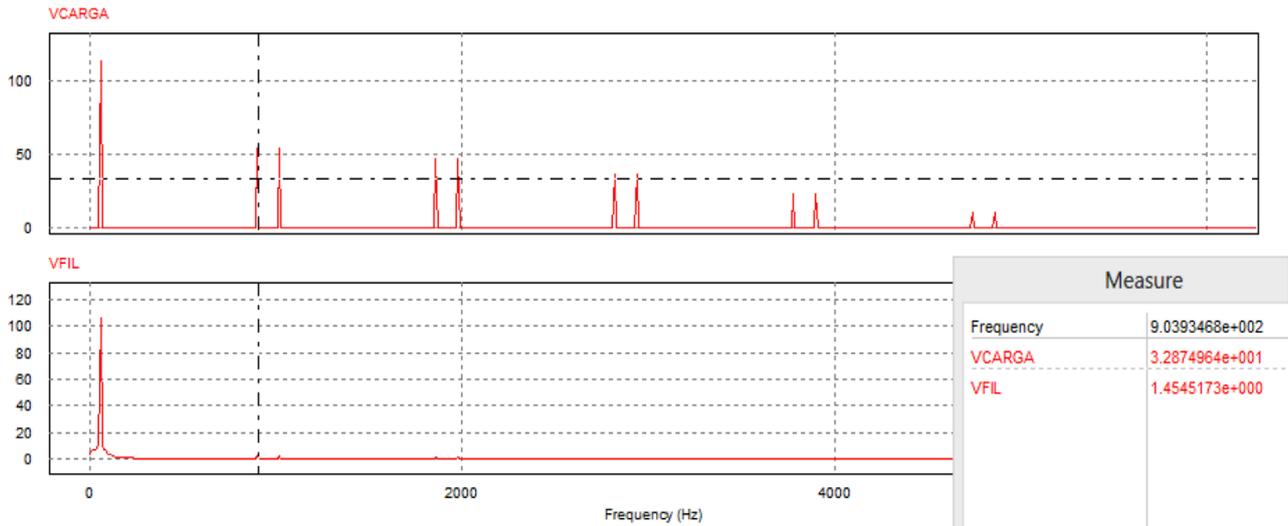


Fig. 27. Espectro de frecuencia de la segunda prueba.

Se presenta de nuevo un comportamiento muy similar al del filtro pasa bajos a diferencia que la onda de voltaje tiene 3V de diferencia con su equivalente de filtro pasa bajos. La frecuencia también es coherente con el enunciado anterior. Los gráficos para los desfases de 60° y 90° también fueron similares por lo que no fue necesario incluirlos en esta sección.

### Acoplamiento del TES a la red

Se conecta el convertidor a la red como un medio de acoplamiento entre una fuente de AC proveniente de un generador con el potencial de obtener esta energía por medio de fuentes renovables. El objetivo en esta prueba es determinar un ángulo específico de desfase en el cual se pueda controlar la dirección del flujo de energía, es decir, que este vaya hacia la red desde el sistema auxiliar de AC o viceversa.

De las pruebas realizadas, se presentó la transferencia del conversor a la red en un ángulo de 180°. Esto se debe a que en ese punto se comienza de nuevo el desfase como si empezara de cero. Al no haber algún retardo originado por algún elemento del circuito, se logra trabajar con la onda completa, que no es necesario filtrarla y de esta manera tratar de tener un impulso de energía que envíe corriente a la red. Con otros valores de ángulo de desfase no se puede ingresar corriente a la red.

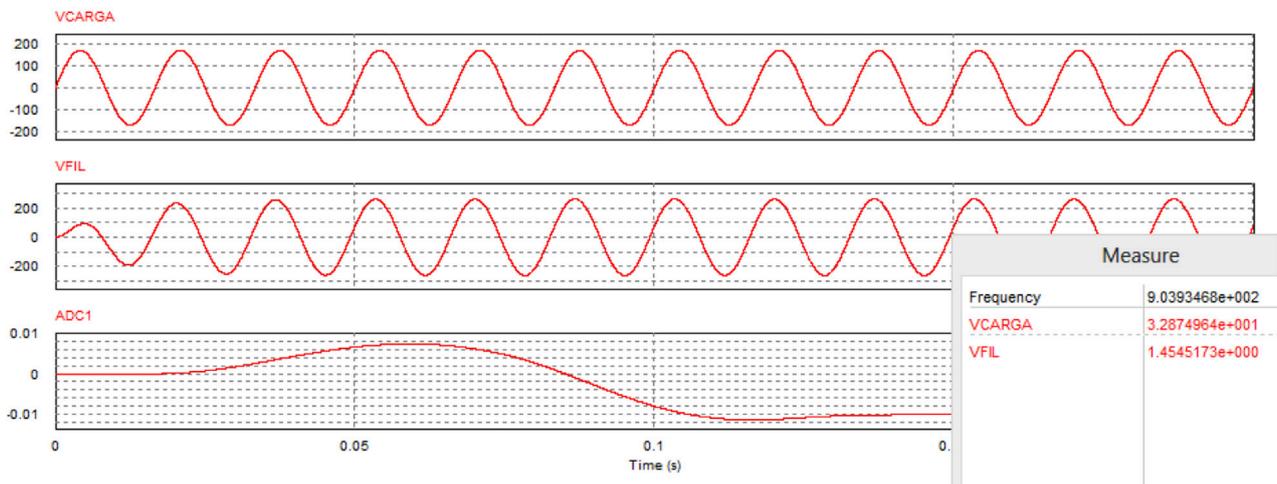


Fig. 28. Ingreso de energía a la red (transitorio positivo).

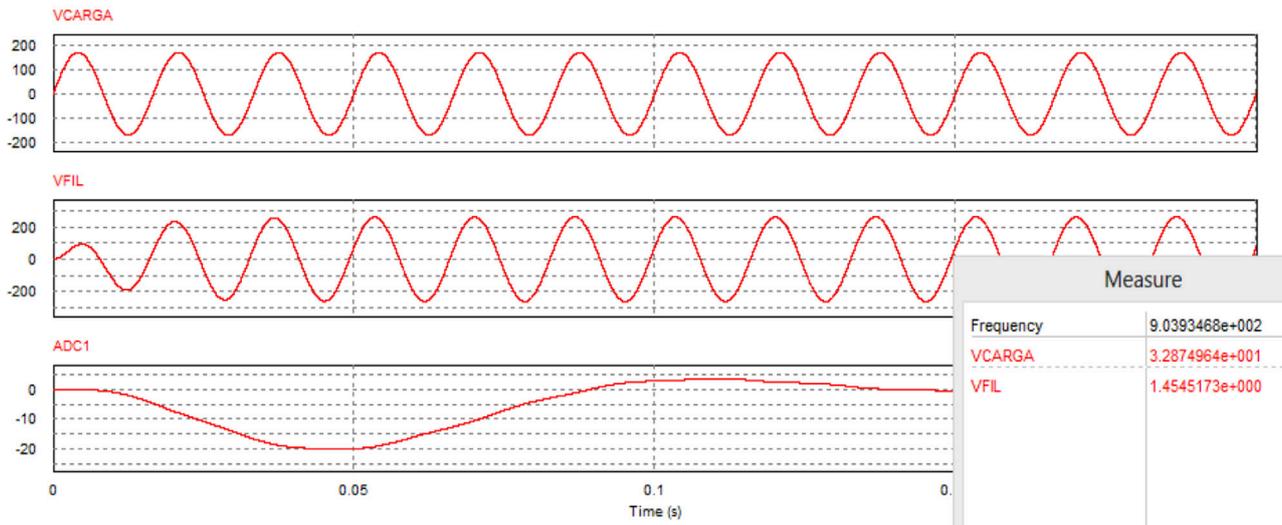


Fig. 29. Regreso de energía desde la red (transitorio negativo).

En un futuro se puede aplicar una técnica de control en lazo cerrado para variar los parámetros del voltaje y frecuencia de conmutación. De esta forma se puede adaptar el transformador a cargas con diferentes valores de voltaje nominal. Se pueden hacer pruebas con otros convertidores que conforman el TES utilizando fuentes de corriente continua para compararlos con aquellos sistemas de producción de energía alternativa.

### Conclusiones y trabajos futuros

El desplazamiento de fase lo que realiza es que la frecuencia fundamental disminuya poco a poco en magnitud para que de esta forma se pueda variar el voltaje de salida.

Es muy importante trabajar a frecuencia de conmutación con valores múltiples a la frecuencia fundamental.

El cambio en la relación de trabajo puede ayudar a la conversión de energía si esta es ceo o uno. Con estos valores se puede obtener una onda senoidal pura sin variación de amplitud.

El uso del filtro complementa la acción realizada por el convertidor en su misión de disminuir la amplitud, sin embargo, la frecuencia de corte debe ser cercana a la fundamental y adicionalmente un filtro de orden mayor a uno puede aliviar los problemas de armónicos.

Se puede observar que se generan un gran número de componentes armónicos que cambian el valor de la onda de salida de forma drástica ya que se presentan componentes armónicas de gran magnitud. Por lo tanto, no se recomendaría tener una frecuencia de conmutación muy alta en la arquitectura matricial propuesta en este reporte.

Cuando se conectó el convertidor a la red se observó que hay que buscar un valor específico de desplazamiento en el que se pueda transferir la energía desde el suministro auxiliar hacia la fuente, pero en la práctica este valor resultó ser único ya que con otros valores lo que se estaría haciendo es variar la amplitud del voltaje del TES, siendo este menor que el de la red y haciendo que la red ingrese energía al convertidor y no de forma contraria.



## Referencias

1. Kolar, J. W., & Ortiz, G. (2014, May). Solid-state-transformers: Key components of future traction and smart grid systems. In Proceedings of the International Power Electronics Conference-ECCE Asia (IPEC 2014) (pp. 18-21). IEEE.
2. Hannan, M. A., Ker, P. J., Lipu, M. S. H., Choi, Z. H., Rahman, M. S. A., Muttaqi, K. M., & Blaabjerg, F. (2020). State of the art of solid-state transformers: Advanced topologies, implementation issues, recent progress and improvements. *Ieee Access*, 8, 19113-19132.
3. Abu-Siada, A., Budiri, J., & Abdou, A. F. (2018). Solid state transformers topologies, controllers, and applications: State-of-the-art literature review. *Electronics*, 7(11), 298.
4. Mogorovic, M., & Dujic, D. (2018). Sensitivity analysis of medium-frequency transformer designs for solid-state transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(9), 8356-8367.
5. Shamshuddin, M. A., Rojas, F., Cardenas, R., Pereda, J., Diaz, M., & Kennel, R. (2020). Solid state transformers: Concepts, classification, and control. *Energies*, 13(9), 2319.
6. Zheng, L., Kandasamy, K., Kandula, R. P., & Divan, D. (2018, September). Impact of transformer leakage inductance on the soft-switching solid-state transformer. In 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (pp. 1125-1132). IEEE.
7. Saleh, S. A., Ozkop, E., Alsayid, B., Richard, C., Onge, X. F. S., McDonald, K. M., & Chang, L. (2019). Solid-state transformers for distribution systems—part II: Deployment challenges. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), 5708-5716.
8. Gómez, C. D., & Pineda Cadena, E. S. (2021). Diseño e implementación de un transformador electrónico de estado sólido (TES) trifásico para su uso en microrredes eléctricas.
9. Ruiz, F., Perez, M. A., Espinosa, J. R., Gajowik, T., Stynski, S., & Malinowski, M. (2020). Surveying solid-state transformer structures and controls: Providing highly efficient and controllable power flow in distribution grids. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 14(1), 56-70.
10. Xue, Y., Starke, M., Dong, J., Olama, M., Kuruganti, T., Taft, J., & Shankar, M. (2018, June). On a future for smart inverters with integrated system functions. In 2018 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG) (pp. 1-8). IEEE.
11. Soomro, J. B., Akhtar, F., Hussain, R., Ahmed Ansari, J., & Munir, H. M. (2022). A Detailed Review of MMC Circuit Topologies and Modelling Issues. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2022.
12. Chikondra, B., Muduli, U. R., & Behera, R. K. (2019, September). Fault-tolerant dtc technique for five-phase three-level npc inverter-fed induction motor drive with an open-phase fault. In 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (pp. 5281-5287). IEEE.



13. Rivera, S., Lizana, R., Kouro, S., Dragičević, T., & Wu, B. (2020). Bipolar dc power conversion: State-of-the-art and emerging technologies. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(2), 1192-1204.



# BIOENGINEERING



