

## Convertidor CD/CA/CA Para la Interconexión de Sistemas Fotovoltaicos a la Red en Media Tensión

M. Barrios\*, V. Cárdenas\*, J.M. Sandoval\*, H. Miranda\*

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Departamento de Ingeniería, SLP, MX,  
Av. Dr. Manuel Nava 8, 78290, San Luis Potosí, México:  
e-mail: barrios.mx@gmail.com, vcardena@uaslp.mx, josem\_sandoval@yahoo.com.mx, hmirandav@uaslp.mx

**Resumen:** En este trabajo se presenta el análisis de una configuración para interconectar granjas fotovoltaicas de gran escala a la red en media tensión. Se analiza el esquema básico en una configuración monofásica de tres niveles a la salida, y posteriormente la configuración trifásica multinivel con acoplamiento en media frecuencia y conversión CA/CA directa. Se presenta un esquema de control para la configuración propuesta. Se incluyen simulaciones y resultados preliminares de un prototipo experimental.

**Palabras claves:** Convertidor multinivel fotovoltaico, electrónica de potencia, aislamiento magnético en media frecuencia, fuentes alternas de energía.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las granjas fotovoltaicas (PV) conectadas a la red se han desarrollado significativamente en la última década, principalmente por la reducción de costos de los módulos fotovoltaicos y los incentivos gubernamentales para el uso de energías renovables. Desde mediados de la década del 2000, las granjas solares de tamaño medio (0.1-5MW) y gran tamaño (>5MW) se han convertido en una realidad. La estabilidad y control de estas granjas fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica ha abierto nuevos retos en el área de investigación. La transmisión de esta energía mediante la interconexión a la red de media tensión (MT de 6 a 36 kV) (Islam et al., 2014) requiere de transformadores de acoplamiento en baja frecuencia, lo que involucra una compleja instalación, tamaño, peso y mantenimiento (Fig. 1). Un reto es maximizar la modularidad del sistema, así como una reducción en el tamaño, peso y mantenimiento del sistema.

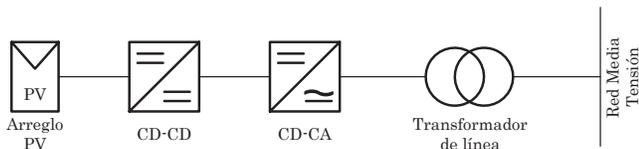


Fig. 1. Sistema fotovoltaico convencional de gran escala acoplado a la red eléctrica.

A todos los sistemas fotovoltaicos conectados a la red se les reconoce su contribución a la generación eléctrica limpia. Algunas de las características de estos sistemas son: inyectar potencia a la red eléctrica, mantener el punto de generación de máxima potencia en los PV, mantener bajos perfiles en la frecuencia de conmutación y alta fiabilidad en el sistema en general.

Actualmente, la tecnología más usada para la interconexión de granjas fotovoltaicas con la red es el convertidor de electrónica de potencia alimentado por varias cadenas de PV de dos niveles a la salida (Brando et al., 2010), (Islam et al., 2014).

De manera convencional los sistemas fotovoltaicos en media y alta tensión están formados por un numeroso arreglo de paneles conectados en una estructura serie – paralelo, los cuales se combinan para alimentar un inversor centralizado, que se conecta a la red eléctrica a través de un transformador de baja frecuencia. Este esquema presenta varias desventajas, entre ellas que la tensión en CD está limitada por normatividad a 1000V para Europa y 600V para Norteamérica. Esto implica que en granjas fotovoltaicas con grandes capacidades de potencia se tienen que manejar altos niveles de corriente en baja tensión, lo cual se traduce en pérdidas por cableado además de altos costos por el cobre. También el filtro de potencia a la salida del inversor se ve afectado por estas altas corrientes, ya que la operación del sistema no es en una estructura multinivel que pudiera optimizar el diseño del filtro al elevar la frecuencia de conmutación (J. Rodriguez et al., 2002), (N. Mohan et al., 2003).

En los últimos años las topologías multinivel están siendo usadas para aplicaciones fotovoltaicas (Villanueva et al., 2009). Este tipo de topologías generan una alta calidad en sus formas de onda de tensión. Entre algunas estructuras basadas en topologías multinivel se encuentran los sistemas basados en el convertidor con diodos de enclavamiento (NPC) (Kuoro et al., 2010), (Wu et al., 2014), topologías con transformador de estado sólido (SST), apropiada para el convertidor de potencia, el Convertidor Multinivel Modular (MMC) y algunas topologías multinivel en cascada (Akagi et al., 2010), (Calais et al., 1998).

Además de los retos asociados a la operación de la electrónica de potencia existen otros relacionados con el sistema de control. Entre ellos se puede destacar la necesidad de mantener en la salida del convertidor una tensión regulada a pesar del efecto del nublado parcial en alguno de los diferentes enlaces de CD.

En este trabajo se analiza una topología que es capaz de enfrentar los retos mencionados: convertidor escalable, aislamiento eléctrico, operación en media frecuencia (MF), alta eficiencia y una alta calidad en sus formas de onda a la salida.

La estructuración del trabajo es la siguiente: La sección 2 se describe la estructura del convertidor. La sección 3 analiza y discute sobre los objetivos de control y así como de posibles algoritmos. La sección 4 presenta algunas simulaciones del convertidor propuesto. En la sección 5 se presentan algunos resultados experimentales. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones.

## 2. ESTRUCTURA DEL CONVERTIDOR

Se considera un convertidor multinivel (Fig. 2) para acoplar un sistema fotovoltaico a la red eléctrica en media tensión con enlace en media frecuencia (MF). Se ha elegido este convertidor debido a que presenta menores esfuerzos en los semiconductores y presenta múltiples enlaces de CD, lo cual permite un seguimiento independiente del MPPT. Esta propuesta elimina la etapa de rectificación mejorando la eficiencia del sistema.

En comparación con otras topologías, en esta estructura se propone la eliminación de la etapa de rectificación a la salida del secundario del transformador de media frecuencia, lo cual mejora la eficiencia global del sistema, pero vuelve más compleja la etapa de modulación.

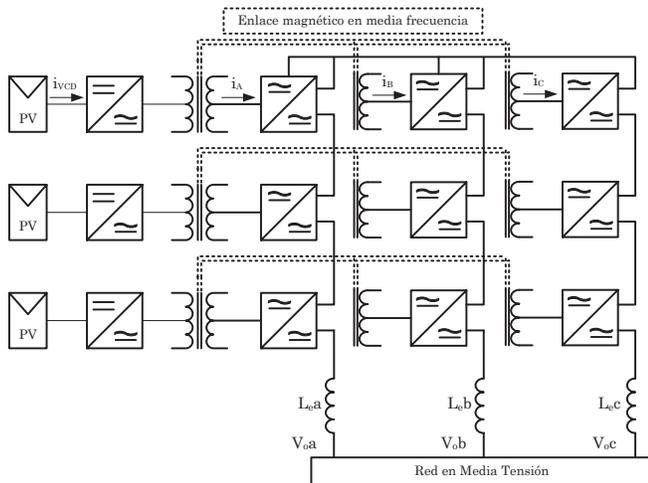


Fig. 2. Diagrama de bloques del convertidor propuesto en configuración trifásica multinivel.

En el diagrama de la Fig. 2 se observa que el convertidor está compuesto de varios módulos conectados entre sí a través de un transformador de múltiples devanados. Este transformador

de media frecuencia genera un enlace magnético que permite el aislamiento y eleva la tensión de ser necesario, esto en caso de que la configuración multinivel no alcance a los niveles de tensión requeridos por la red de media tensión. Más aún, la configuración multinivel permite tener formas de onda de alta calidad las cuales dependen del número de niveles a utilizar. En este trabajo se consideran siete niveles a la salida, esto es, tres convertidores en cascada, en el cual las portadoras están desfasadas entre sí  $360^\circ/n$ , donde  $n$  es el número de convertidores en cascada.

Debido a que la salida es trifásica, las moduladoras tendrán que estar desfasadas  $120^\circ$ . Para comprender la operación de este convertidor se explicará el funcionamiento de uno de los módulos de la figura 2.

En la Fig. 3 se muestra a manera de diagrama de bloques la estructura básica de la etapa monofásica considerada para su análisis. En esta etapa los arreglos fotovoltaicos son conectados a un convertidor de CD a CA, el cual está encargado de transformar la tensión CD en una tensión CA a media frecuencia (en este caso se generará una onda cuadrada), la etapa anterior se conecta al devanado primario de un transformador de media frecuencia; el secundario del transformador alimenta a un convertidor matricial puente H y la salida de éste se conecta a la red.

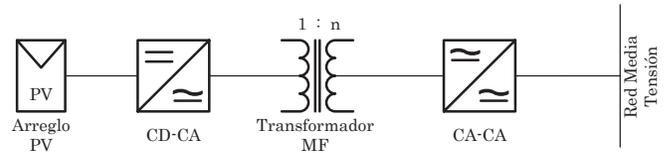


Fig. 3. Diagrama de bloques del convertidor propuesto en configuración monofásica.

En la (Fig. 4) se aprecia con más detalle cada una de las secciones de la etapa monofásica. El convertidor Push-Pull es el encargado de la conversión de tensión en CD a tensión en CA en media frecuencia. Este convertidor se conecta al primario de un transformador; el devanado secundario del transformador es conectado a un convertidor (CA-CA matricial) puente H y la salida de éste puede ir conectada a una carga o a un filtro no disipativo, para así obtener a la salida una tensión sinusoidal.

Respecto a la Fig. 4, a partir de la tensión en el panel fotovoltaico, el convertidor Push-Pull mediante los interruptores  $Q_1$  y  $Q_2$  sintetizan una señal cuadrada en los devanados primarios del transformador ( $V_1$ ), esta señal cuadrada es escalada por la relación de transformación ( $1:n$ ) al devanado secundario ( $V_2$ ). Enseguida el convertidor matricial CA-CA tendrá que sintetizar la señal cuadrada en una señal tal que al ser filtrada se obtengan formas de onda para la tensión y corriente que puedan útiles para la interconexión con la red eléctrica.

La etapa de modulación debe ser capaz de que el puente H convierta la señal cuadrada ( $V_2$ ) generada por el Push-Pull en una señal equivalente a una modulación SPWM, y ambos convertidores sincronizados y conmutando a la misma frecuencia.

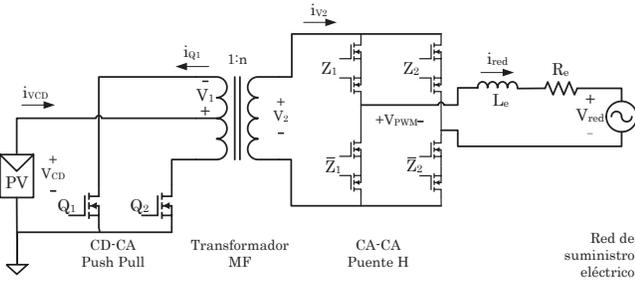


Fig. 4. Circuito del convertidor propuesto en configuración monofásica.

De la Fig. 6 se observa que la salida es unipolar, ésta se genera de la misma manera que para un inversor puente H con modulación SPWM. De la comparación resultan dos señales de control que activan los interruptores  $Z_1$  y  $Z_2$  y sus negados en el convertidor matricial puente H.

Si se permite que la modulación SPWM trabaje en el convertidor matricial, se obtendrían a la salida formas de onda no útiles para ésta propuesta. Por tanto, se requiere procesar el patrón de conmutación antes de que ingrese a los interruptores.

El encendido del interruptor  $Z_1$  depende de la condición de tres parámetros: interruptor  $Q_1$  del convertidor Push-Pull y los estados de las dos señales de control que genera la modulación SPWM para el convertidor matricial.

### 3. SISTEMA DE CONTROL

En la Fig. 5 se muestra la propuesta para llevar a cabo el control de la configuración de la sección anterior. Cuando se tiene nublado parcial en algunos de los arreglos PV la potencia del sistema entero es afectada, esto es  $m$  inversores de los  $n$  inversores totales recibe una potencia reducida y como consecuencia el vector de la tensión de salida es menor. En sistemas de gran escala los arreglos PV bajo nublado parcial harán que su inversor asociado maneje menos potencia que otros inversores en los cuales sus arreglos PV tienen mayor radiancia.

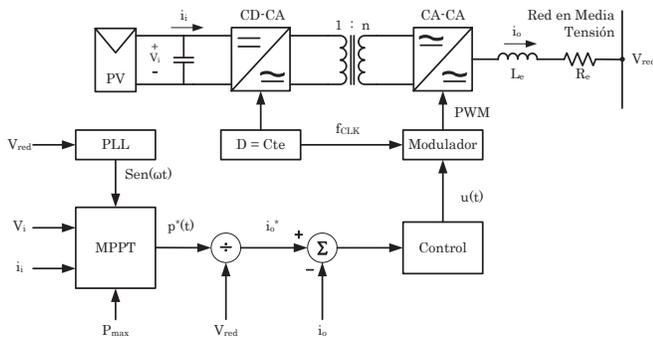


Fig. 5. Diagrama a bloques del algoritmo de control del convertidor propuesto en la sección anterior.

El problema planteado en el párrafo anterior podría ser solucionado si cada inversor pudiese manejar diferentes

cantidades de potencia, pero manteniendo la misma corriente. Lo anterior es posible a través de la variación de la magnitud y el ángulo de fase de la tensión de salida. Habiendo planteado lo anterior, en esta propuesta se considera que no existe nublado parcial entre los arreglos PV y, además, que solo se va a transferir potencia activa.

En la mayoría de los convertidores fotovoltaicos se requiere un algoritmo para el seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT), en este trabajo, se implementó el algoritmo "Perturba y Observa (P&O)" en cada arreglo PV. A diferencia de otras propuestas este algoritmo no controla el convertidor CD-CA, en su lugar permite generar la señal de error que opera con el algoritmo de control. Este algoritmo de seguimiento se encarga de calcular la potencia real disponible del arreglo PV.

Debido a que este convertidor se va a conectar a la red, es necesario que todo el sistema este sincronizado con ésta, un PLL realiza esta función, y envía esta información al algoritmo MPPT. Como protección y característica adicional, se coloca la potencia máxima ( $P_{MAX}$ ) a extraer de los arreglos PV como parámetro de entrada al algoritmo MPPT. Una vez se tiene esta información el algoritmo se encarga de generar la potencia instantánea de referencia [ $p^*(t)$ ], ésta última se divide entre la tensión de la red ( $V_{red}$ ) para así obtener la corriente deseada de salida ( $i_o^*$ ). Ahora bastará restar esta corriente de referencia con la corriente de salida ( $i_o$ ) del convertidor para obtener la señal de error que entra al algoritmo de control.

El algoritmo se encarga de calcular la potencia real y con los datos medidos (tensión y corriente de los arreglos PV) calcula la magnitud y ángulo de fase para de la tensión de salida. Por último, los valores calculados se envían al modulador PWM, el cual genera el patrón necesario para encender y apagar los transistores en el convertidor matricial.

### 4. SIMULACIONES

Para validar el correcto funcionamiento del sistema se realiza una simulación; los parámetros de la simulación del convertidor en configuración monofásica de tres niveles se detallan en la Tabla 1.

Tabla I. Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
Potencia	1 kW
Tensión de entrada	120 $V_{CD}$
Tensión de salida	127 $V_{RMS}$
Frecuencia de conmutación	9.960 kHz
Inductor	1.8 mH
Condensador	3.5 $\mu F$

A la salida del puente H se coloca un filtro de segundo orden no disipativo con frecuencia de corte 2 kHz para obtener una forma de onda completamente sinusoidal de amplitud 127 $V_{RMS}$  a 60Hz. En la Fig. 6 se puede observar en el trazo superior la salida del convertidor matricial antes del filtrado ( $V_{PWM}$ ), en el segundo trazo se muestra la misma señal

después de ser filtrada ( $V_o$ ). En el tercer y cuarto trazo se observan las principales formas de onda de la corriente, en el bus de CD ( $i_{vCD}$ ) y en el devanado secundario ( $i_{v2}$ ) del transformador respectivamente. Como se aprecia la corriente de la fuente de CD es solo positiva, lo cual es óptimo para la implementación de PV debido a que éstos solo pueden entregar tensión y corriente positiva, pues no contienen elementos de almacenamiento de energía.

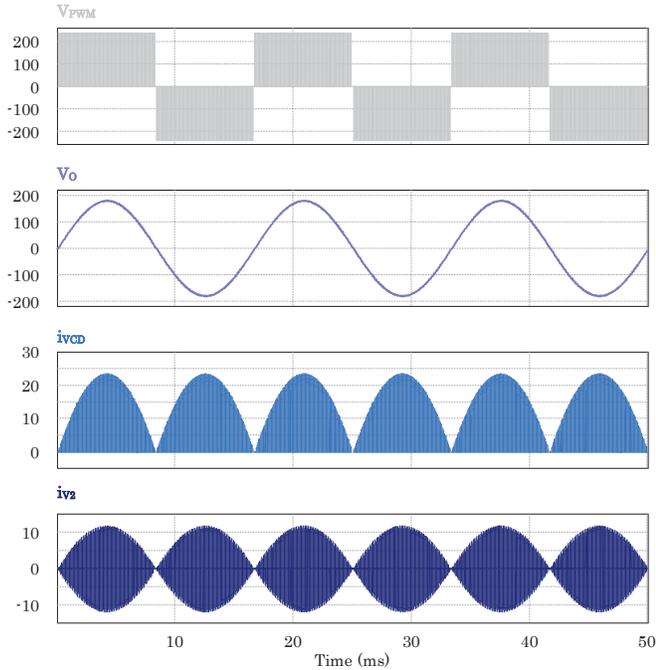


Fig. 6. Formas de onda características de la configuración propuesta.

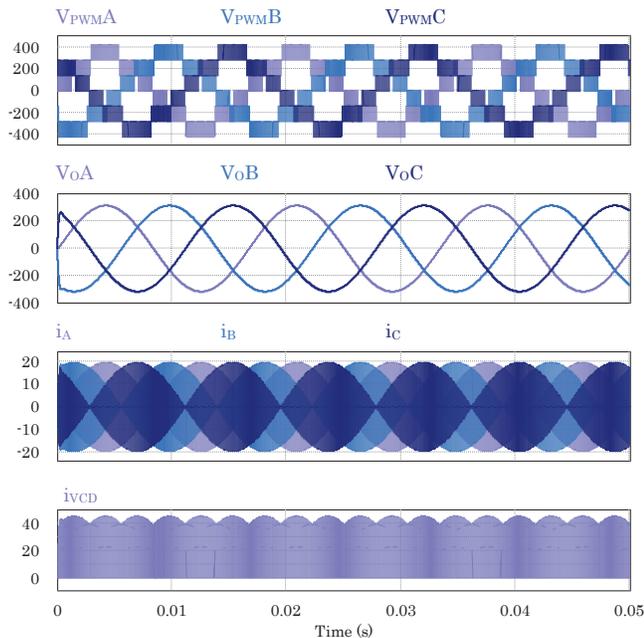


Fig. 7. Simulación del esquema propuesto trifásico multinivel.

La simulación (Fig. 7) presenta las formas de onda de la topología completa en su configuración trifásica multinivel

(siete niveles). Del diagrama del convertidor propuesto (Fig. 2) se puede observar que se requiere de tres convertidores trifásicos en cascada para obtener la salida multinivel, esto implica que se tendrán tres enlaces de CD, por lo tanto, se requerirá de tres transformadores trifásicos. Como es de esperarse los siete niveles de salida presentan una baja THD (antes del filtro de salida: 24.9%) comparada con la de la figura 4 (antes del filtro de salida: 83.7%). Además, permite la selección de semiconductores con menores esfuerzos en tensión, así como de componentes pasivos más pequeños para la etapa de filtrado. En contraste el número de componentes a controlar es alto, por lo tanto, la modulación se vuelve más compleja. Respecto a las formas de onda de la Fig. 7, el primer trazo es para las tensiones PWM ( $V_{PWM A}$ ,  $V_{PWM B}$ ,  $V_{PWM C}$ ) a la salida de los convertidores en cascada. El trazo siguiente muestra las tensiones anteriores des pues de ser filtradas ( $V_{oA}$ ,  $V_{oB}$ ,  $V_{oC}$ ). En el tercer trazo se tienen las corrientes en el secundario de los tres transformadores trifásicos. Y, por último, la corriente en el arreglo PV del primer transformador.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Un prototipo experimental monofásico de tres niveles fue construido para validar el diseño y la modulación del convertidor propuesto (Fig. 8).

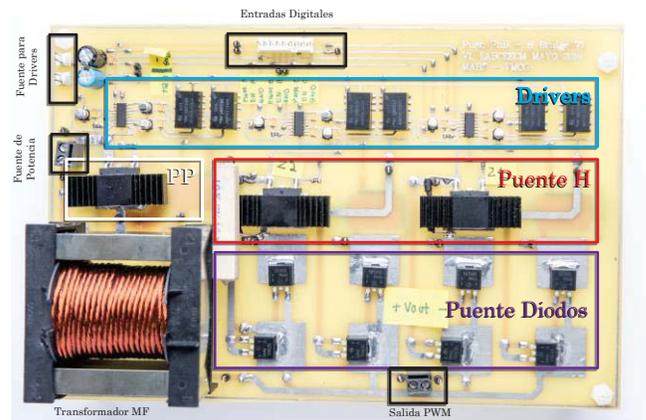


Fig. 8. Prototipo construido a 1KW. 90% de los componentes son de montaje superficial.

Las principales formas de onda se muestran en la Fig. 9. En el trazo superior (Ch3) se puede observar la tensión en el devanado secundario del transformador, la cual es una señal cuadrada con un ciclo de trabajo del 50% y su amplitud depende de la tensión del arreglo PV. Para el segundo trazo (Ch4) se observa claramente el patrón PWM de tres niveles a la salida del convertidor sin filtro con una tensión pico a pico de 480 V. Por último, en el trazo inferior (Ch2) se muestra la corriente a través de una carga resistiva de 800 ohms.

En la figura 10 se observa el comportamiento real de la corriente en  $i_{vCD}$ , el cual corresponde con la simulación en la figura 6. En los canales 2 y 3 se muestra la tensión PWM y la tensión en uno de los interruptores del convertidor Push-Pull respectivamente.

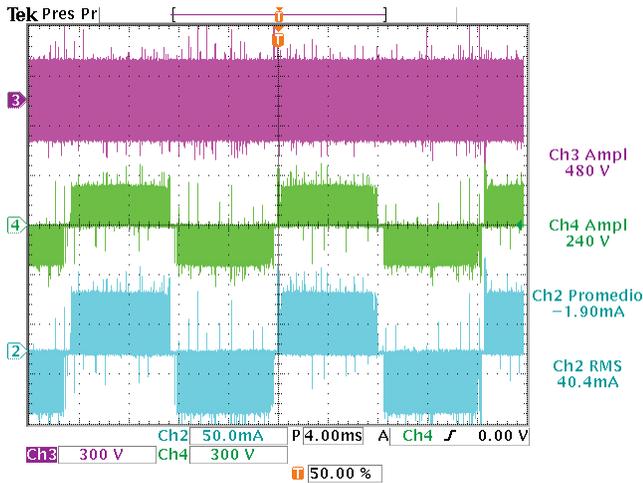


Fig. 9. Formas de onda sin filtro a la salida: Ch 2: Corriente en la carga (resistencia de 800  $\Omega$ ). Ch3: Tensión en el secundario del transformador. Ch4: Tensión en la carga.

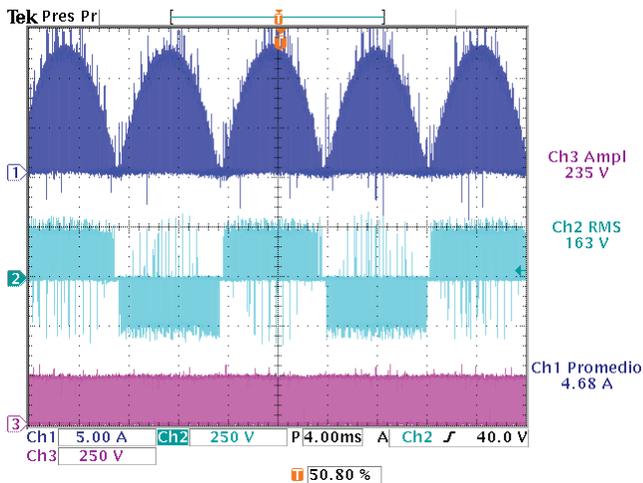


Fig. 10. Ch1: Corriente en la fuente de CD. Ch2: Tensión  $V_{PWM}$ . Ch4: Tensión D-S en  $Q_1$ .

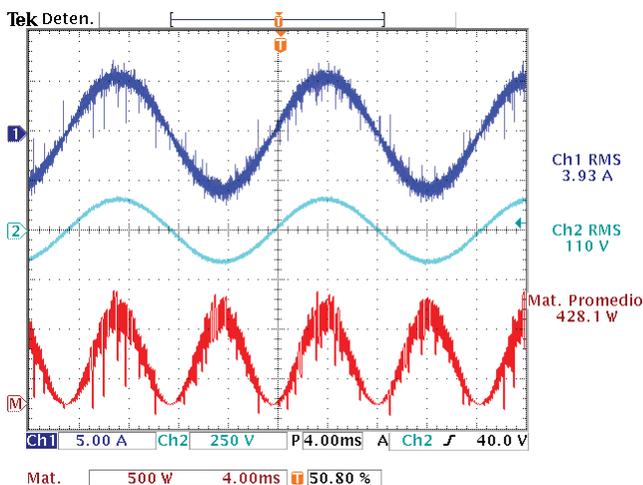


Fig. 11. Formas de onda de la configuración propuesta. Ch1: Corriente en la carga resistiva de 30 Ohms. Ch2: Tensión sinusoidal en la carga. ChMat: Potencia extraída del convertidor.

En la Fig. 11 se muestran las formas de onda, considerando un filtro no disipativo con frecuencia de corte aproximadamente de 2kHz, la disposición de los canales se muestra al pie de la figura. Se hizo una medición del THD del canal 2 de las figuras 9 y 10 dando como resultado un THD de 5.83% y 1.89% respectivamente. Para la medición del THD se tomó en consideración la suma de los armónicos hasta llegar al armónico 25.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el análisis de un convertidor para sistemas PV multinivel, con aislamiento en media frecuencia y conexión a media tensión. Se planteó una estrategia de modulación y se construyó un prototipo experimental preliminar para validar la técnica de modulación, así como algunos de los problemas de electrónica de potencia. Este prototipo tiene una eficiencia del 90% y las mayores pérdidas se registraron en el convertidor matricial, donde cada uno de los interruptores registraron una disipación de 8.295 W.

## REFERENCIAS:

Akagi H., "Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (MMCC)", in Proc. Int. Power Electron. Conf., 2010, pp. 508-515.

Brando G., Dannier A., Del Pizzo A. y Rizzo R., "A High Performance Control Technique of Power Electronic Transformers in Medium Voltage Grid-Connected PV Plants", de XIX International Conference on Electrical Machines, Rome, 2010.

Calais M. and Agelidis V. G., "Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview," in Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron., 1998, vol. 1, pp. 224-229.

Chan-Puc Freddy, Calleja G. Hugo, Sánchez H. Víctor, Acosta O. Roberto, Torres M. Emmanuel, "Tendencias Actuales en el Diseño de Convertidores de Potencia para Aplicaciones en Fuentes de Energía Renovables", RIEE&C, Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, vol. 7, n° 2, pp. 1-7, Diciembre 2009.

Daher Sergio, Schmid Jürgen, Antunes Fernando., "Multilevel Inverter Topologies for Stand-Alone PV Systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, n° 7, pp. 2703-2711, July 2008.

Essakiappan Somasundaram, Krisgnamoorthy Harish S., Enjeti Prasad, Balog Robert S., Ahmed Shehab, "Multilevel Medium-Frequency Link for Utility Scale Photovoltaic Integration", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, n° 7, pp. 3674-3683, July 2015.

Islam Rabiul, Guo Youguang, Zhu Jianguo, "A Multilevel Medium-Voltage Inverter for Step-Up-Transformer-Less Grid Connection of Photovoltaic Power Plants", IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 4, n° 3, pp. 881-888, 2014.

- J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug 2002.
- Kuoro S., Asfaw K., Goldman R., Snow R., Wu B., and Rodriguez J., "NPC multilevel multistring topology for large scale grid connected photovoltaic systems," in Proc. 2nd IEEE Int. Symp. Power electron. Distrib. Gener. Syst., 2010, pp. 400-405.
- N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, "Switch-Mode dc-ac Inverters," in *Power Electronics Converters, Applications, and Design*, 3th ed. New York: Wiley, 2003, pp. 177-218.
- Samir Kouro B. W., "Control of a cascaded H-bridge multilevel converter for grid connection of photovoltaic systems", Industrial Electronics Society Conference, Oporto, Portugal, 2009.
- Villanueva E., Correa P., Rodríguez J. y Pacas M., "Control of a Single-Phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter for Grid-Connected Photovoltaic Systems", *IEEE Transaction Industrial Electronics*, vol. 56, nº 11, pp. 4399-4406, 2009.
- Wu J. C. and Chou C. W., "A solar power generation system with a seven-level inverter", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 7, pp.2454-2462, Jul. 2014.