

MICRO-INVERSORES: PRINCIPALES TOPOLOGÍAS.

Ing. Pedro Cossoli, Dr. Andres Firman, Dr. Manuel Cáceres, Dr. Arturo Busso (*)

RESUMEN: Este trabajo presenta una revisión bibliográfica de las diferentes configuraciones para Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red (SFCR) y las diversas topologías utilizadas en el diseño de micro-inversores (MI). Las topologías para MI que se presentan se encuentran clasificadas en tres grupos: MI con vínculo de corriente continua, MI con pseudo vínculo de corriente continua y MI sin vínculo de corriente continua. Como parte del reporte, se expondrán las configuraciones circuitales que adoptan las etapas de potencia de las diferentes topologías así como también sus principales características.

Palabras clave: Sistemas fotovoltaicos conectado a red, Micro-inversores, Acoplamiento arquitectónico, seguimiento del punto de máxima potencia.

INTRODUCCIÓN

La utilización de módulos fotovoltaicos (FV) para conversión de energía solar en energía eléctrica se encuentra muy difundida a nivel mundial y es objeto de estudio desde hace décadas. Un módulo FV genera energía en corriente continua (CC) la cual puede utilizarse directamente por cargas en CC o puede ser transformada para alimentar cargas en corriente alterna (CA). Un

conjunto de módulos FV eléctricamente interconectados (generador FV) junto con los equipos adicionales de conversión e interconexión constituyen un sistema FV, los cuales se dividen en dos topologías principales: Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFA) y Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red eléctrica (SFCR). Los SFA precisan de un medio de almacenamiento de energía, como bancos de baterías, para su posterior utilización. Por otro lado, los SFCR precinden de tales sistemas de almacenamiento dado que toda la energía que generan los módulos FV es inyectada a la red eléctrica a la cual se conectan. Así, en los SFCR el costo tanto de mantenimiento como de equipos adicionales es menor, elevando la confiabilidad del sistema.

La capacidad de los SFCR de inyectar energía en cualquier punto de la red los constituye como sistemas de generación distribuida (GD). Se observan dos escenarios de GD, por un lado en plantas de generación FV, con grandes áreas cubiertas de módulos, y por otro lado, sistemas de generación de pequeñas potencias, los cuales pueden estar instalados en entornos urbanos, e incluso, acoplados arquitectónicamente a estructuras o edificios ya existentes.

Independientemente de la potencia del

(*) GER – Grupo en Energías Renovables - FaCENA – UNNE. Av. Libertad 5470 – 3400 Corrientes. Argentina.
Tel/Fax: (0379) 4473931 e-mail: pcossoli@ger-unne.com.ar

SFCR todos poseen un componente en común: un convertidor CC-CA o también denominado inversor, el cual se encarga de la transferencia de energía entre el generador y la red eléctrica. En el mercado actual existen diversidad de inversores, de diferentes potencias y topologías, pero todos ellos cumplen dos funciones principales. En primer lugar deben convertir la tensión CC generada por los módulos en CA compatible con la red eléctrica para ser inyectada. En segundo lugar, debido a que la potencia entregada por el generador FV depende de factores como temperatura de célula FV y radiación solar, dichos inversores son capaces de polarizar los generadores en su punto de máxima potencia. Para ello, implementan algoritmos de seguimiento de punto de máxima potencia (*Maximum Power Point Tracking, MPPT*).

El objetivo principal de este trabajo es introducir al estudio de inversores a modo de revisión de la bibliografía existente, en particular de micro-inversores para conexión a red.

A continuación se presentará una clasificación general de los SFCR, con sus diferentes topologías, beneficios y puntos en contra. Seguidamente, se dará una revisión de las principales topologías disponibles para la etapa de potencia de los micro-inversores, presentando sus principales características.

CLASIFICACIÓN DE LOS SFCR

La interconexión de módulos FV, ya sea en serie o paralelo o combinación de ambos, permite obtener SFCR de la potencia deseada. Debido a esto podemos realizar una clasificación de los mismos basándonos en la disposición del generador y el o los inversores presentes.

Inversor centralizado (Centralized Inverters)

Esta configuración se muestra en la Figura 1a. La misma presenta un único inversor que realiza la interfase entre los módulos FV y la red eléctrica. Este generador FV se configura convenientemente para obtener niveles de tensión y potencia necesario para el inversor. En esta configuración se presentan algunos inconvenientes; por un lado, transportar grandes corrientes en CC implica que, para disminuir las pérdidas, se debe aumentar la sección de los cables lo que produce un aumento de costo y complica la instalación. Luego, debido a las características eléctricas disímiles de los módulos FV interconectados, pueden presentarse pérdidas por desadaptación eléctrica (*mismatch losses*). Esto provoca una caída en la potencia de entrada al inversor y dificulta el seguimiento del punto de máxima potencia, por lo cual la eficiencia del sistema se ve afectada.

Inversor de cadena (String Inverters)

La interconexión de módulos FV en serie se denomina Cadena FV o *String* (del término en inglés). Un generador FV puede estar compuesto por varias cadenas. Cuando cada una de las cadenas es conectada a la red mediante un inversor individual, se está en presencia de una configuración de tipo "inversor de cadena" o "*String Inverters*". Esta configuración se muestra en la Figura 1b. El uso de varios inversores en lugar de uno solo permite mejorar la eficiencia del sistema, ya que se cuenta con un sistema de MPPT para cada cadena, haciendo posible polarizar cada una de ellas en su punto óptimo, reduciendo las pérdidas por desadaptación eléctrica. Aún con esta mejora es posible que el espacio requerido para el equipamiento adicional y su cableado en CC conduzcan

a un incremento en el costo del sistema.

Configuración de cadenas múltiples (Multi-String Inverters)

En la Figura 1c se muestra una versión desglosada de la configuración de un inversor de cadena. En este caso se utiliza, un convertidor CC-CC para cada cadena, esto presenta la ventaja de reducir los niveles de tensión requeridos en bornes del arreglo FV (menor riesgo eléctrico) y conducir hacia el inversor de conexión a red tensiones mayores, por ende corrientes menores, disminuyendo la sección de conductor necesaria. Finalmente, cada convertidor se conecta a la red mediante un único inversor. Nuevamente, se obtiene una mayor eficiencia como en el caso de inversor de cadena, debido a que cada convertidor CC-CC implementa su propio MPPT.

Micro-inversores

En la Figura 1d se muestra la configuración que adoptan los micro-inversores (MI). En este caso cada módulo FV cuenta con su propio inversor para conexión a

red. En la literatura también se refieren a esta configuración como “módulos-CA”. En la actualidad dicha configuración tiene gran aplicación en casos donde es necesario implementar SFCCR en entornos urbanos, aprovechando estructuras o edificios existentes. En cuanto a la potencia, los MI trabajan en un rango que va desde los 100 W a 500 W, debido principalmente a la potencia máxima de los módulos comerciales

Entre las ventajas se destaca principalmente su fácil interconexión. Debido a que cada inversor implementa su propio MPPT, la eficiencia del sistema mejora y se evitan las pérdidas debido la desadaptación eléctrica. Por otro lado, favorece el acoplamiento arquitectónico y facilita la ampliación del sistema de ser necesario. Como desventaja se puede mencionar que los micro-inversores resultan en sistemas más costosos que en las configuraciones anteriores, pero, el costo de instalación es menor, ya que no se requiere sistemas de protección de CC de potencias más elevadas (como en los otros casos) ni personal especializado para su instalación.

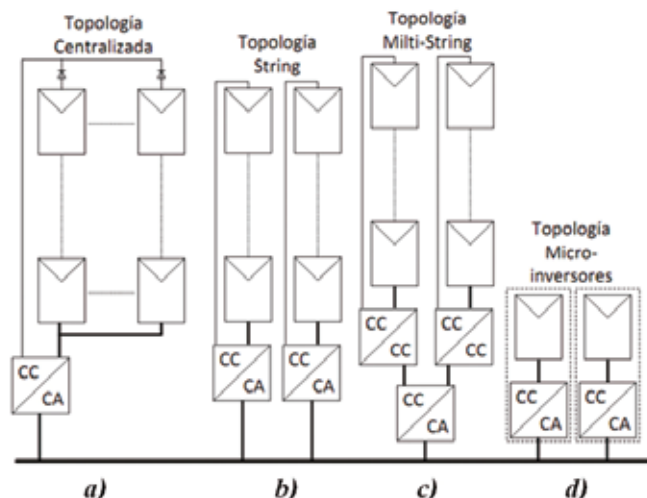


Figura 1: a) Configuración con inversor centralizado. b) Configuración con inversor de cadena. c) Configuración con inversor por cada cadena. d) Configuración con micro-inversor

ETAPAS DE CONVERSIÓN DE POTENCIA PARA MICRO-INVERSORES

Uno de los principales desafíos en el diseño de MI es lograr la tensión de red a la salida (220 VCA para países como Argentina) a partir de la tensión de entrada del módulo FV, alrededor de los 21 a 36 VCC para módulos FV comerciales.

Petreuş *et al.* (2013) reporta un MI de una única etapa de potencia, en la cual se realizan todas las tareas: elevación de tensión, MPPT, ondulación y control de corriente inyectada.

Otra opción resulta de generar CA de baja tensión y elevarla mediante el uso de un transformador convencional de baja frecuencia. Esta solución no es la más recomendada, debido principalmente al volumen de los transformadores y a sus pérdidas en las inductancias de dispersión. Por otro lado, es posible utilizar un convertidor elevador tipo “Boost” para obtener la tensión necesaria y luego ondularla e inyectarla a la red. Esta configuración se denomina de múltiples etapas (*multi-stage*).

TOPOLOGÍAS PARA MICRO-INVERSORES

A continuación se realiza una revisión de las principales topologías empleadas en las etapas de los MI, repasando sus principales características y las eficiencias alcanzadas. Estas topologías estarán agrupadas en tres categorías: MI con vínculo de corriente continua (*DC-link*), MI con pseudo vínculo de corriente continua (*pseudo DC-link*) y MI sin vínculo de corriente continua (*DC-link less*).

Micro-inversor con vínculo de CC (DC-link)

De manera general en un micro-inversor con vínculo de CC, la potencia instantánea en CA inyectada por el inversor hacia la red es igual a la potencia media en CC proporcionada por el módulo FV. Esto hace necesario algún dispositivo de almacenamiento de energía, que permita un desacople de potencia entre el módulo y la red y que la libere cuando sea requerida. Como se muestra en la Figura 2a un capacitor lleva a cabo dicha tarea. La principal desventaja de este tipo de desacople es su poca durabilidad y las alteraciones que se producen en su valor nominal como consecuencia de la temperatura de trabajo. Por otro lado, poseen un gran volumen debido a las tensiones a las cuales están sometidos.

El resto de las etapas de la Figura 2a, indican una etapa CC-CC en la que se implementa el MPPT y que eleva la tensión del módulo FV a un nivel cercano al valor pico de la tensión de red. Luego, la última etapa convierte dicha tensión de CC en CA a la frecuencia de red. Esto se realiza mediante algún tipo de modulación como por ejemplo: modulación senoidal por ancho de pulso (*Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM*).

En la Figura 2b se muestra un MI el cual posee un vínculo de CC, el convertidor CC-CC esta basado en un elevador de tensión tipo *boost* denominado “ZETA”. El punto clave aquí es que, dada la secuencia de conmutación del convertidor, la energía almacenada en las inductancias de dispersión de N1 y N2 es aprovechada mejorando así la eficiencia. Esta topología fue descrita por Chen *et al.*, (2013). Para micro-inversores de alrededor de 200 W conmutando a frecuencias del orden de 50 kHz se pueden obtener eficiencias cercanas al 95%. También se encuentran configuraciones con vínculo de CC con transformador de

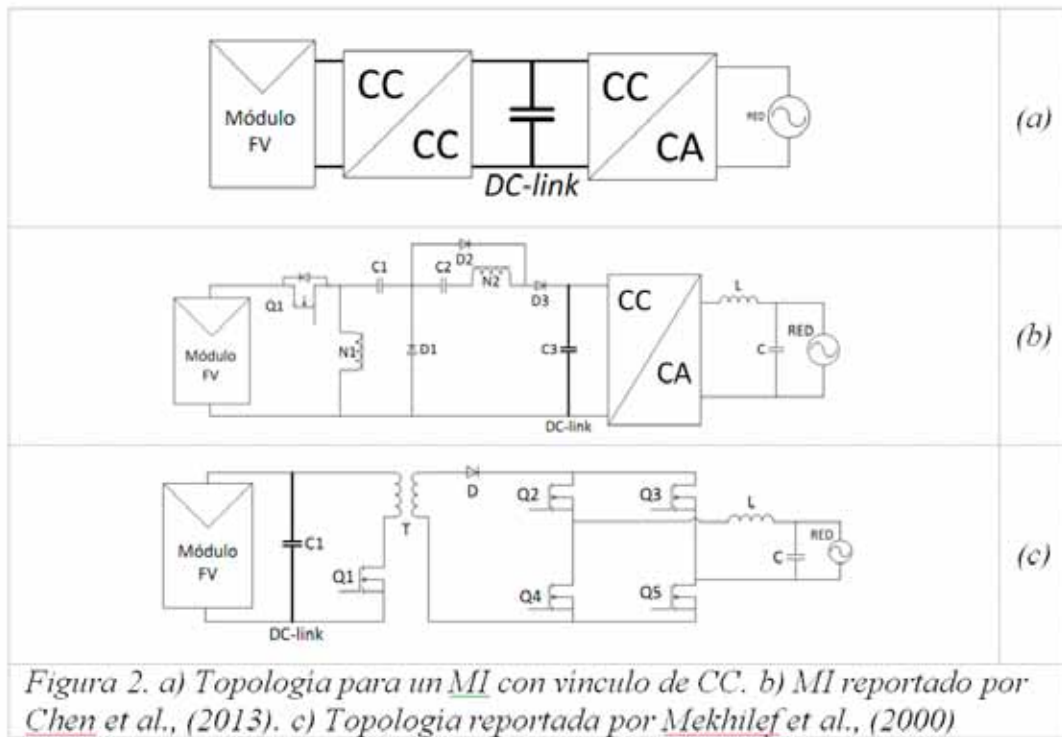


Figura 2. a) Topología para un MI con vínculo de CC. b) MI reportado por Chen *et al.*, (2013). c) Topología reportada por Mekhilef *et al.*, (2000)

mayores frecuencias como se muestra en la Figura 2c. Esta topología es reportada por Mekhilef *et al.*, (2000) y consiste en un convertidor tipo *flyback* en modo de conducción continua con transformador elevador de tensión. Luego, una etapa inversora en puente completo (Full-bridge) con una modulación tipo SPWM. Una de las desventajas de esta topología es que emplea una técnica de conmutación denominada “dura”, a diferencia de los casos anteriores, su implementación es más simple, pero las pérdidas por conmutación en los dispositivos semiconductores son mayores.

Los MI *con vínculo de CC* poseen por lo general dos etapas. La etapa CC-CC se encarga de amplificar la tensión y polarizar al módulo FV en su punto de máxima potencia. Mientras que la etapa CC-CA produce la corriente senoidal a la frecuencia de red con una fase tal para obtener un factor de potencia unitario. Sin embargo, este tipo de técnica presenta dos inconvenientes principales:

1- El convertidor CC-CA requiere un control particular para satisfacer los requerimientos de contenido armónico en la corriente inyectada.

2- Por otro lado, si solo se utiliza una conmutación PWM simple (conmutación dura), las pérdidas en los semiconductores tienden a aumentar a medida que aumenta la frecuencia.

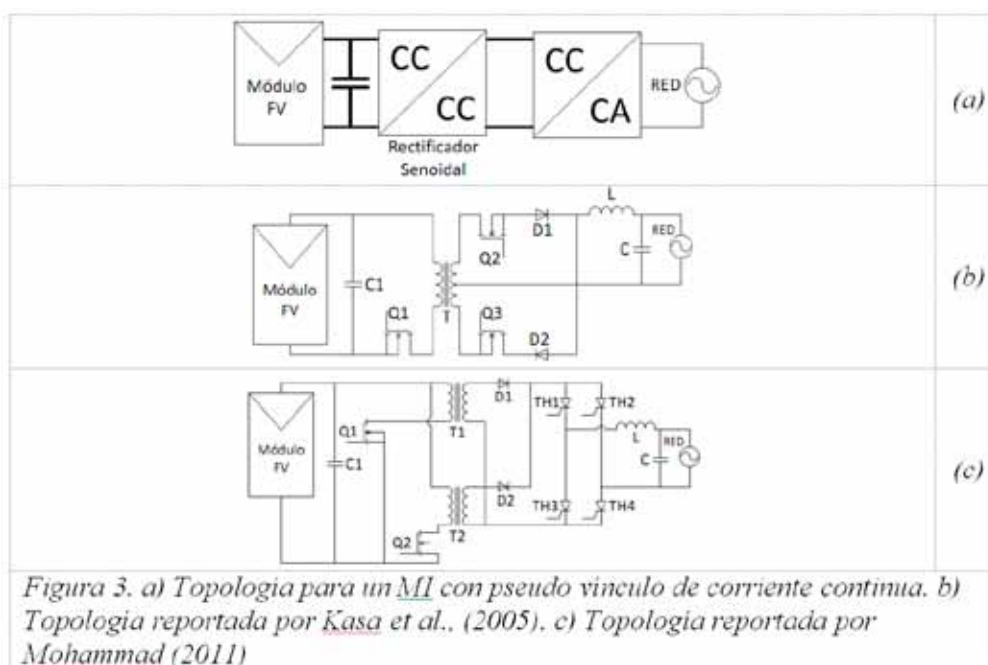
Para solucionar estos inconvenientes pueden utilizarse técnicas de conmutación especiales, aunque no siempre son simples de implementar y pueden conducir a un aumento en la cantidad de componentes necesarios, tamaño y costo. Por otro lado, debido a la alta tensión que el capacitor de desacople debe soportar, su volumen es mayor, lo cual dificulta lograr altas densidades de potencia.

MI con pseudo vínculo de corriente continua (Pseudo DC-link)

Los MI que emplean topología con pseudo vínculo de corriente continua tienen al menos dos etapas de potencia, la primera produce una señal senoidal rectificadora de alta frecuencia, cuya envolvente es del doble de la frecuencia de red. En la segunda etapa se produce un desdoblamiento de la señal y se genera una señal de corriente senoidal, que luego es inyectada a la red. En la Figura 2a se presenta esque-

máticamente esta topología. Li y Wolfs (2008) presentan varios diseños circuitales con esta topología, donde la mayoría de ellos utilizan transformador con lo cual ofrecen también aislamiento galvánico.

La topología mostrada en la Figura 3b consiste en un convertidor tipo *flyback* que eleva la tensión del módulo FV mediante un transformador de alta frecuencia. Una modulación PWM es utilizada para producir



una señal senoidal rectificadora. Luego, la siguiente etapa desdobra la corriente y se obtiene una corriente senoidal a la frecuencia de red. Como ventaja podemos mencionar una baja cantidad de componentes comparado con otras topologías, simplicidad en el circuito y incorporando aislamiento galvánico. Por otro lado, la falta de conmutación suave aumenta las pérdidas durante la conmutación y reduce la eficiencia del sistema. Con topologías de este tipo se pueden alcanzar eficiencias del 96% para valores de potencia en el rango de los 200 W.

En la Figura 2c se presenta una configuración que suaviza la ondulación en la corriente de entrada. Esto se logra mediante dos convertidores tipo *flyback* en paralelo, esta técnica se denomina "interleaving" o intercalación. Esta configuración permite alcanzar una eficiencias del orden del 94% (Mohammad, 2011). Este aumento de frecuencia conlleva a la disminución en su tamaño, a costa de una leve reducción de eficiencia.

A primera vista, las topologías con pseudo vínculo de corriente continua evitan el problema de utilizar capacitores elec-

trolíticos de gran tamaño. Sin embargo, presentan problemas en cuanto al contenido armónico de las señales que producen. Aunque esto puede mejorarse con técnicas especiales de conmutación de los semiconductores, lo que eleva la complejidad del diseño y la implementación.

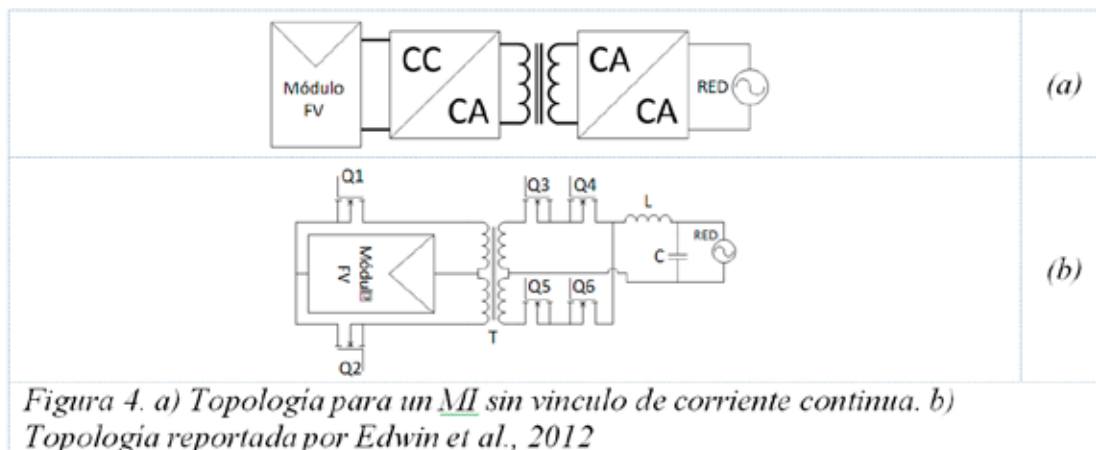
MI sin vínculo de corriente continua (DC-link less)

En esta topología también se tienen al menos dos etapas de conversión de potencia. En la primera de ellas la tensión CC de entrada es transformada a una tensión senoidal de alta frecuencia y elevada mediante un transformador también de alta frecuencia. Luego, la segunda etapa consiste en un cicloconvertidor que genera la tensión alterna a la frecuencia de red a

partir de tensión de entrada. En la Figura 4a se muestra un esquema general de esta topología. De esta manera se consigue disminuir el peso y el volumen debido a las frecuencias mayores de trabajo.

En la Figura 4b se muestra un MI sin vínculo de corriente continua, donde la primera etapa es un convertidor tipo *push-pull* conmutando a 40 kHz y mediante un transformador adecuado se eleva la tensión al nivel deseado. La etapa de salida está implementada mediante un cicloconvertidor de conmutación forzada (Edwin *et al.*, 2012)

Las topologías sin vínculo de corriente continua, pueden prescindir de capacitores voluminosos, pero precisan de técnicas de control más sofisticadas dadas las formas de onda de las señales en cada etapa.



También, debido a eso, ya no es posible conseguir etapas totalmente independientes, lo cual complica nuevamente el diseño del MI.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una revisión bibliográfica sobre la clasificación de SFCR en base a la disposición de los módulos

los FV y sus inversores. Por otro lado, también se introdujo al estudio de las diferentes topologías existentes para la implementación de MI. Por último se presentó una breve discusión sobre las diferentes técnicas para implementar algoritmos de MPPT.

En la Tabla I se presenta de forma sintetizada las principales características de las topologías descritas en este trabajo. Donde

es posible realizar una comparación teniendo en cuenta el número total de semiconductores requeridos en cada topología y las eficiencias obtenidas. En primer lugar podemos observar que, a pesar de la topología, el número de llaves activas utilizadas varía significativamente de una topología a otra, al igual que la cantidad de diodos empleados. Por otro lado, vemos que las topologías de tipo *DC-Link less* emplean mayor cantidad de arrollamientos de cobre, es decir inductores o transformadores, lo cual implica una mayor complejidad en el diseño. En cuanto a la frecuencia de conmutación

la mayoría trabaja en el rango de 20-50 kHz. Por último, de todas las topologías descritas solo la correspondiente a la Figura 2b emplea conmutación suave y es una de las que reporta mayor eficiencia. Cabe señalar entonces que el uso de técnicas especiales de conmutación ayuda a disminuir las pérdidas y obtener eficiencias mayores.

Por último, este trabajo sirve como referencia para ayudar al diseñador a rever y a optar por la topología que más se adecue, como paso previo para el desarrollo de un Micro-Inversor.

Topología	<i>DC-link</i>		<i>Pseudo DC-link</i>		<i>DC-link less</i>
	Fig. 2b	Fig. 2c	Fig. 3b	Fig. 3c	Fig. 4b
Potencia máxima recomendada	200 W	250 W	200 W	195 W	30 W
Número de llaves activas	>6	5	3	6	8
Número de diodos	>4	3	2	2	0
Número de arrollamientos de cobre	>3	3	3	5	7
Número de núcleos magnéticos	>1	1	1	2	1
¿Conmutación suave?	Si	No	No	No	No
Frecuencia de conmutación	25 kHz	50 kHz	32 kHz	173 kHz	20 kHz

Tabla 1 – Comparación de MI con diferentes topologías: *DC-link*, *pseudo DC-link* y *DC-link less*

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chen, S. M., Liang, T. J., Yang, L. S., & Chen, J. F. (2013). A boost converter with capacitor multiplier and coupled inductor for AC module applications. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 60(4), 1503-1511.

Edwin, F., Xiao, W., & Khadkikar, V. (2012, October). Topology review of single phase grid-connected module integrated converters for PV applications. In *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 821-827). IEEE.

Kasa, N., Iida, T., & Chen, L. (2005). Flyback inverter controlled by sensorless current MPPT for photovoltaic power system. *Industrial Electro-*

ronics, IEEE Transactions on, 52(4), 1145-1152.

Li, Q., & Wolfs, P. (2008). A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different DC link configurations. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 23(3), 1320-1333.

Mekhilef, S., Rahim, N. A., & Omar, A. M. (2000). A new solar energy conversion scheme implemented using grid-tied single phase inverter. In *TENCON 2000. Proceedings (Vol. 3, pp. 524-527)*. IEEE.

Petreuş, D., Daraban, S., Ciocan, I., Patarau, T., Morel, C., & Machmoum, M. (2013). Low cost single stage micro-inverter with MPPT for grid connected applications. *Solar Energy*, 92, 241-255.