

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN INVERSOR MULTINIVEL ALIMENTADO POR UN GENERADOR FOTOVOLTAICO

Víctor H. Serrano, Maiver Villena, Daniel Hoyos, Carlos Cadena

Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO, UNSa-CONICET)
Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta (UNSa), Avenida Bolivia 5150, Salta
Tel. 0387-4255489 – Fax 0387-4255489. CP. 4400
E-mail serrano407@gmail.com

RESUMEN: En este trabajo se muestra la simulación de un sistema fotovoltaico con una topología compuesta por un generador conectado a un conversor reductor de corriente continua y como salida del sistema un inversor de 5 niveles. Se analizan estrategias de control para cada etapa con sus respectivas configuraciones y aplicaciones y para esta tarea se emplea el software PSCAD/EMTDC. Los resultados obtenidos de las simulaciones demuestran una amplia flexibilidad de interconexión entre los generadores fotovoltaicos y las etapas que componen los inversores, alentando su incorporación en la enseñanza de la electrónica de potencia y de los sistemas fotovoltaicos.

Palabras clave: Simulación. Generación fotovoltaica. Curva I/V. Curva P/V. Mppt. Inversor 5 niveles.

INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica ha tomado impulso a nivel mundial como generador de energía eléctrica limpia e inagotable. De manera paulatina muchos países la fueron adoptando para mejorar la calidad energética de distintos lugares o para sostener el sistema eléctrico actual, que suele verse superado en horas pico por el aumento de la demanda.

En la actualidad, son instalados nuevos parques solares pero las condiciones del terreno como el nivel de radiación incidente, topografía, condiciones atmosféricas y la disposición de las líneas de transmisión presentan dificultades en el proceso de instalación debido a su alto nivel de complejidad. Esta dificultad también se presenta cuando se requiere redimensionar las instalaciones ya existentes.

De todas las herramientas disponibles como Matlab/Simulink (Moler, 1984), Psim (Powersim, 1994) y Pscad (Manitoba Hydro International Ltd, 1986), que se utilizan para el diseño de instalaciones de diferentes escalas, simular circuitos eléctricos de potencia y también generadores fotovoltaicos o aerogeneradores, para este trabajo se utiliza el software Power System Computer Aided Design, PSCAD, para analizar y simular un sistema fotovoltaico compuesto por un inversor multinivel de 5 etapas alimentado por un generador fotovoltaico con control del punto de máxima potencia. Utilizando las librerías del software PSCAD se puede analizar detalladamente cada una de las etapas que componen el sistema propuesto. Con el uso de estas librerías se obtiene un aporte adicional en la enseñanza de las asignaturas de electrónica de potencia y de sistemas fotovoltaicos.

METODOLOGÍA

Cada etapa del sistema se trata como un caso de estudio independiente, finalizando con la unión de todas las etapas en una simulación en general.

Generador fotovoltaico: Un generador fotovoltaico está formado por la asociación de varios módulos, conectados en serie y/o paralelo, que permiten obtener niveles de tensión y corriente adecuados para alimentar una carga específica. Estas cargas pueden ser: motores, lámparas, inversores de corriente continua a corriente alterna, utilizados en emplazamientos aislados o en sistemas conectados a la red eléctrica.

En instalaciones de gran escala conectadas a la red eléctrica se presentan diferentes agrupaciones de módulos que alimentan a uno o a varios inversores. Las arquitecturas conocidas son:

a) Inversor central, b) Microinversor, c) *String*, d) Inversor central optimizado. (Gonzalez, 2019) y se muestran en la figura 1.

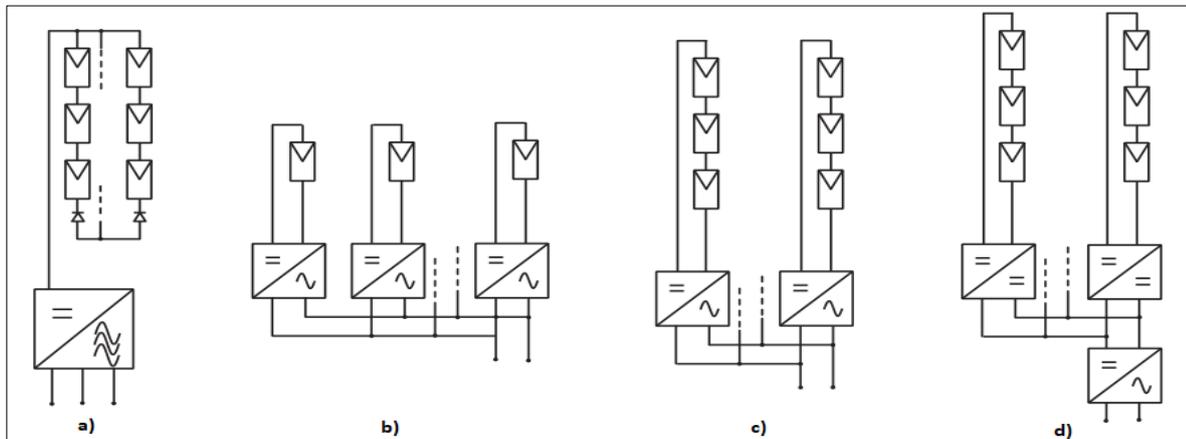


Figura 1: Esquema de diferentes arquitecturas utilizadas en instalaciones solares fotovoltaicas. a) Inversor central, b) microinversor, c) *String*, d) Inversor central optimizado.

En la figura 2 se muestra el esquema de un generador fotovoltaico para una arquitectura central conformada por 2 ramas conectadas en paralelo y 40 paneles conectados en serie.

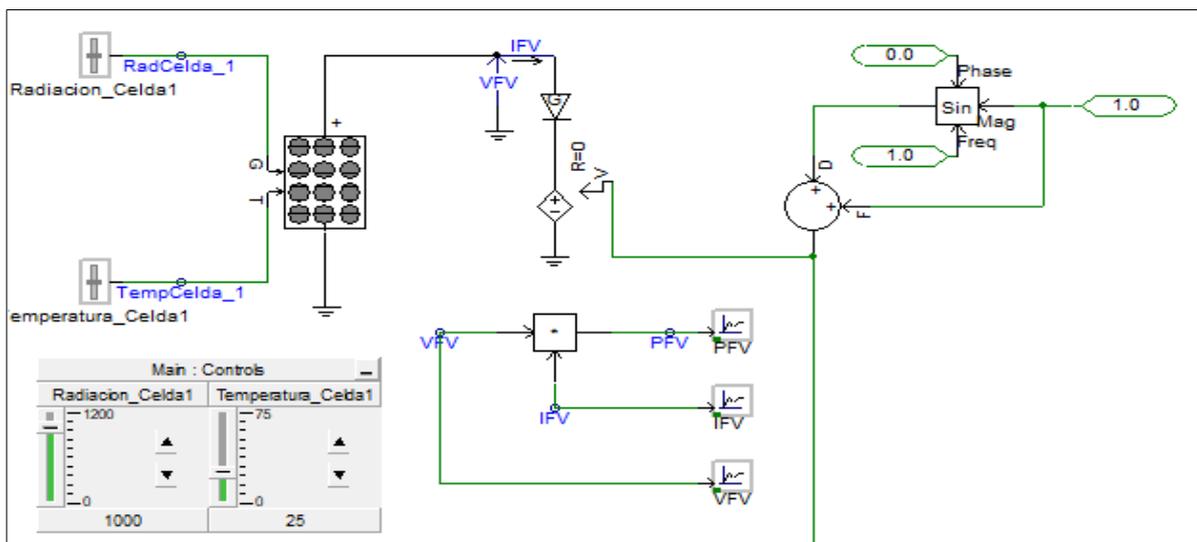


Figura 2: Esquema empleado para simular la curva I/V y P/V de un generador fotovoltaico.

Para controlar el nivel de radiación y temperatura, se agregan dos controles deslizantes (que pueden tomar valores enteros o reales) al componente que representa un módulo fotovoltaico. Los controles deslizantes mencionados deben estar asociados a un panel de control para poder funcionar adecuadamente. En el panel de control se pueden seleccionar los límites de las variables que se quieren controlar. (Manitoba Hydro International Ltd, 1986, 2018).

La carga electrónica se modela con una fuente de alimentación dependiente. En este componente se pueden seleccionar distintos tipos de impedancia interna: ideal, resistiva, capacitiva, inductiva, RLC y RRL.

El control de la carga electrónica se realiza con el componente "function" AM/FM/PM de tres entradas: frecuencia (*Freq*), fase (*Phase*), y magnitud (*Mag*), conectado a un punto suma. La frecuencia se integra con respecto al tiempo y toma valores entre $+2\pi$ y -2π . La fase es el argumento para la función seno o coseno a implementar. El resultado se multiplica por la magnitud.

La salida de la función se ingresa a un punto suma para conectarse a la entrada de la carga electrónica a controlar, tal como se puede apreciar en la figura 3.

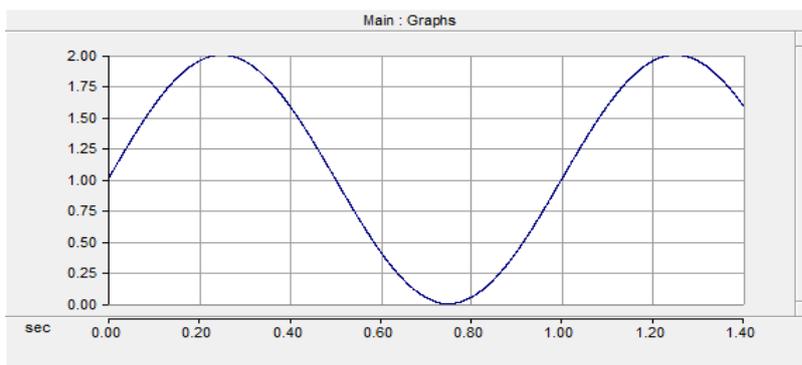


Figura 3: Señal de control de la carga electrónica.

Para evaluar la eficiencia de conversión, bajo condiciones normalizadas, de una celda o de un panel fotovoltaico, se debe trazar la curva característica de corriente/tensión, (*I/V*). El comportamiento del panel fotovoltaico conectado a una carga variable, preferiblemente una carga electrónica, permite obtener los valores de corriente y tensión que se trasladan a la curva característica.

Una curva *I/V* presenta los siguientes parámetros característicos: (Navntoft et al., 2019)

- Corriente de corto circuito, *I_{sc}* (*Short Circuit Intensity*).
- Tensión de circuito abierto, *V_{oc}* (*Open Circuit Voltage*).
- Corriente del punto de máxima potencia, *I_{mp}* (*Maximum Power Intensity*).
- Tensión del punto de máxima potencia, *V_{mp}* (*Voltage of Maximum Power*).
- Máxima potencia que entrega el panel, *P_{max}*.

En la figura 4, se observan las curvas características Corriente/tensión, (*I/V*) y Potencia/tensión, (*P/V*) que se obtuvieron con el esquema propuesto en la figura 2. Se muestra el comportamiento del modelo simulado para una radiación de 200W/m², 500W/m², 800W/m² y 1000W/m², para una temperatura de 25°C. Para una observación más clara de la forma de las curvas obtenidas, no se presentan los valores característicos mencionados anteriormente.

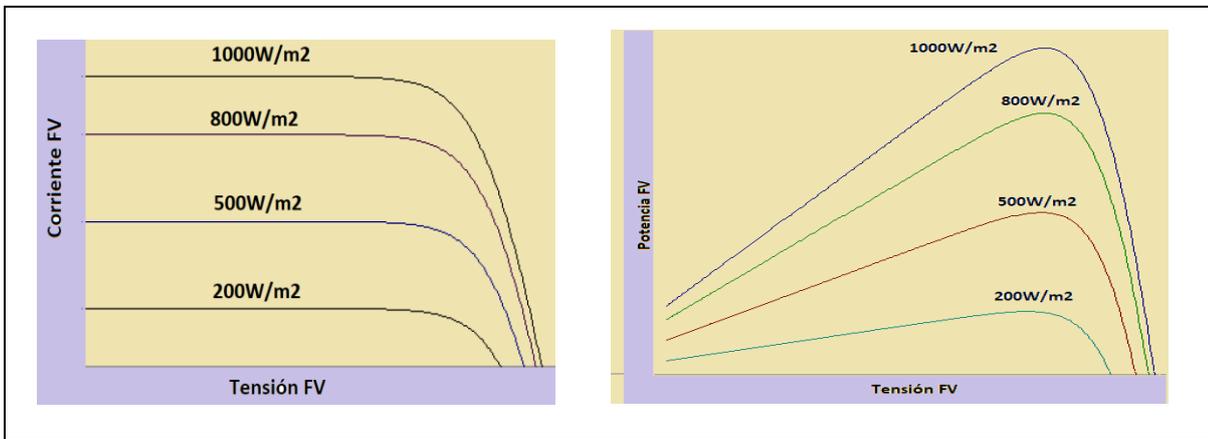


Figura 4: Simulación de curvas características para diferentes niveles de radiación a una temperatura de 25°C.

Seguimiento del punto de máxima potencia

El seguimiento del punto de máxima potencia, MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) es un método que busca transferir la máxima potencia de un panel fotovoltaico hacia la carga en condiciones ambientales cambiantes. Observando la curva de potencia de un panel fotovoltaico (figura 4), el máximo valor se encuentra en el codo de la curva.

Para simular el modelo del MPPT, se utiliza el esquema de la figura 5. La tensión, VFV y corriente, IFV, del generador fotovoltaico atraviesan un filtro pasa-bajo de primer orden de magnitud igual a 1. Las señales IFV y VFV filtradas, alimentan el bloque de control MPPT, configurado con el algoritmo de seguimiento de conductancia incremental. Este algoritmo compara la conductancia instantánea, I/V , con la conductancia incremental $\Delta I/\Delta V$.

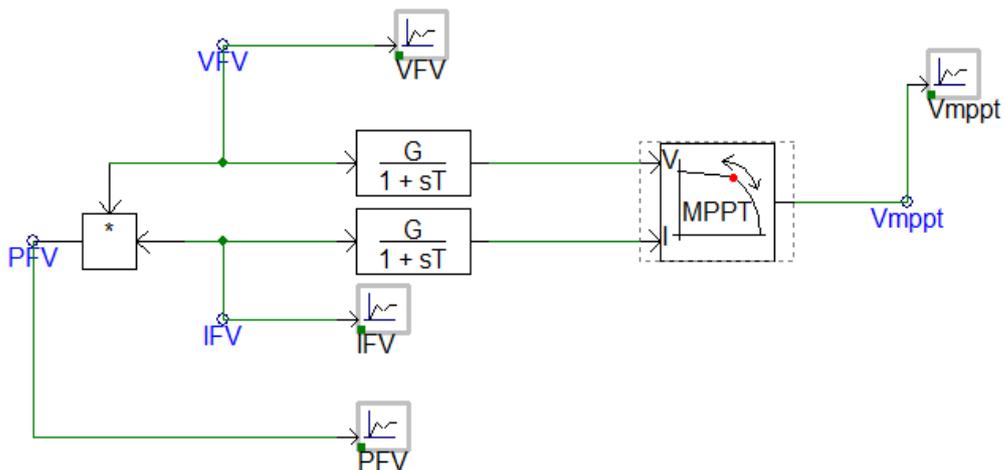


Figura 5: Esquema de seguimiento del punto de máxima potencia.

El algoritmo genera la tensión de referencia V_{mppt} que se utiliza como entrada al esquema de control que gobierna el convertidor de corriente continua, (CC). (figura 6)

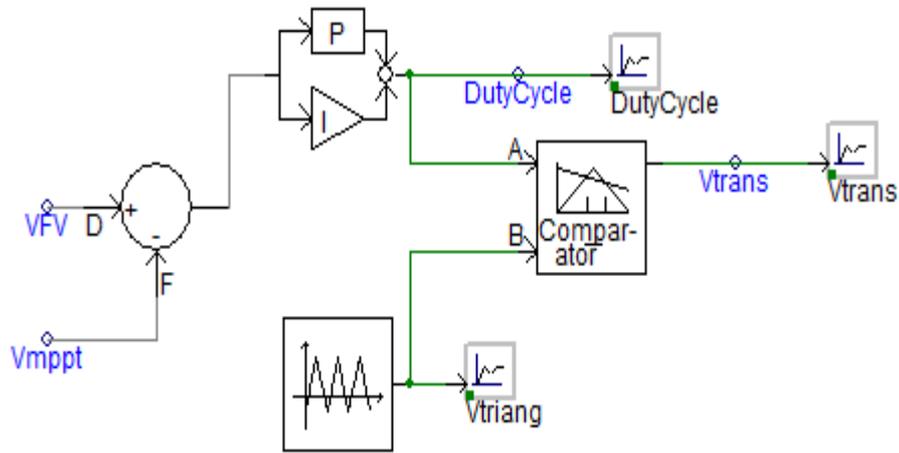


Figura 6: Esquema para el control del convertor de CC.

La diferencia entre la tensión VFV y Vmppt, se utiliza como entrada del control Proporcional Integral (PI) para generar el ciclo de trabajo (*Duty Cycle*) de la señal PWM que alimenta al transistor del convertor de corriente continua.

La señal PWM se obtiene al comparar el ciclo de trabajo con la señal triangular. La configuración del bloque comparador determina que la salida este a un nivel alto cuando la señal de la entrada A sea mayor que la entrada B.

Convertidor reductor

El principio de funcionamiento del convertidor reductor se explica con los intervalos de encendido y apagado del transistor.

Cuando se enciende el transistor circula corriente desde el generador fotovoltaico atravesando la inductancia hacia la carga. En este intervalo la inductancia almacena energía en su núcleo y el diodo G se comporta como una llave abierta al estar polarizado en forma inversa.

En el intervalo de apagado del transistor, el generador fotovoltaico ya no entrega energía a la carga y por el fenómeno de autoinducción la polaridad en los extremos del inductor se invierte, polarizando al diodo en forma directa. En este intervalo la corriente hacia la carga la provee el campo magnético almacenado previamente.

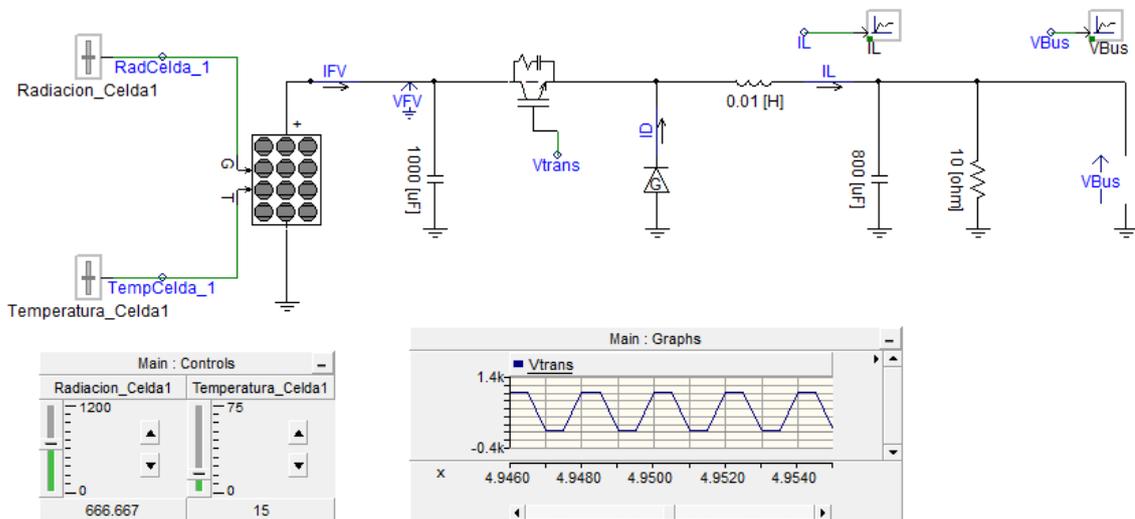


Figura 7: Esquema del convertidor reductor.

Inversor multinivel

Los inversores multinivel convierten corriente continua en corriente alterna. Están compuestos por transistores de potencia, del tipo MOSFET (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*) o IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) (Rashid, 1999) y condensadores para almacenar energía.

Este tipo de inversores trabajan como fijadores de niveles de tensión. La tensión alterna de salida se obtiene conmutando de manera sincronizada diferentes niveles de tensión continua, almacenada en los capacitores. Las ventajas que presentan contra los inversores de dos niveles, es una baja distorsión armónica, menor frecuencia de conmutación y menor fatiga de los transistores en conmutación ya que deben soportar únicamente la tensión correspondiente a su nivel. (Martínez Hernández, 2006).

Otra importante ventaja de los inversores multinivel es su aplicación en sistemas fotovoltaicos con conexión a la red eléctrica de media y alta potencia. Las características que presentan en estos sistemas son: conexión directa sin necesidad de transformadores de acoplamiento y mayor potencia de salida sin tener que conectar a los transistores en serie y/o paralelo. (Blanco et al., 2004).

Las topologías más reconocidas de estos inversores son:

- Diodo anclado al neutro (*Neutral-Point-Clamped (NPC) o Diode-Clamped*).
- Capacitor flotante (*Flying-Capacitor*).
- Conexión en cascada de puentes monofásicos (*Cascaded Full-Bridge Converter*).

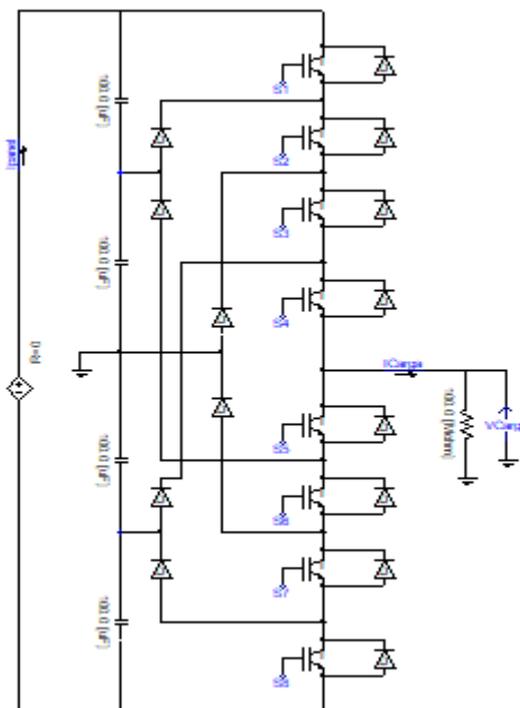


Figura 8: Esquema de simulación del inversor de 5 niveles.

Los capacitores dividen la tensión de la fuente de alimentación en partes iguales, cada una corresponde a un capacitor de una tensión igual a $\frac{1}{4}$ VDC, esta tensión es la que soporta cada transistor del arreglo. (Calaça, 2016).

Los capacitores funcionan como fuente de tensión conectadas en serie para obtener los distintos niveles de tensión que generan la tensión de salida. El requerimiento de los condensadores se obtiene mediante la fórmula:

$$C = m - 1 \quad (1)$$

donde:

C : Número de condensadores.

m : Cantidad de niveles.

De la ecuación 1 se desprende que el inversor de 5 niveles precisa 4 condensadores.

El esquema para activar los transistores se muestra en la figura 9. Se observa que para los 8 transistores solo se deben generar 4 señales y complementar las mismas para los transistores restantes.

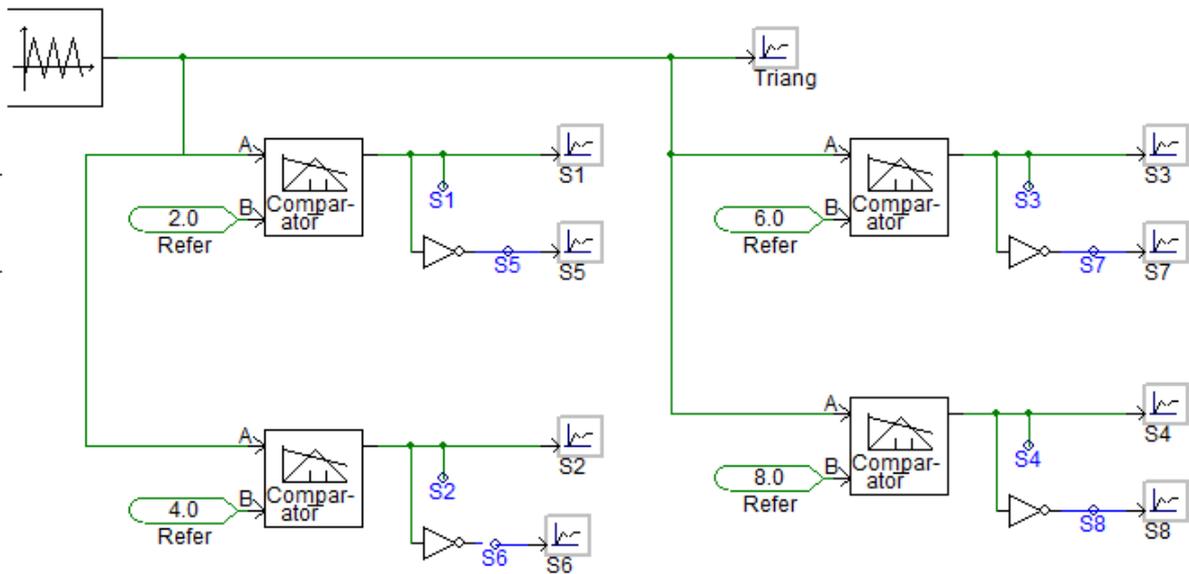


Figura 9: Esquema para activar los transistores de salida en PSCAD.

Secuencia de conmutación de los transistores para obtener los 5 niveles de tensión (ver tabla 1). En la columna de la izquierda se observan los niveles de tensión alcanzados y en las columnas restantes las señales de activación, en donde el número 1 corresponde a un transistor activo y el número 0, a un transistor apagado.

Niveles de tensión	Estado de los transistores							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
V5 = VDC	1	1	1	1	0	0	0	0
V4 = ¾ VDC	0	1	1	1	1	0	0	0
V3 = ½ VDC	0	0	1	1	1	1	0	0
V2 = ¼ VDC	0	0	0	1	1	1	1	0
V1 = 0	0	0	0	0	1	1	1	1

Tabla 1: Secuencia de conmutación para obtener 5 niveles de tensión.

En la figura 10 se muestran las señales de cada transistor con la forma de la tensión de salida obtenida. En esta figura se observan claramente los 5 niveles de tensión.

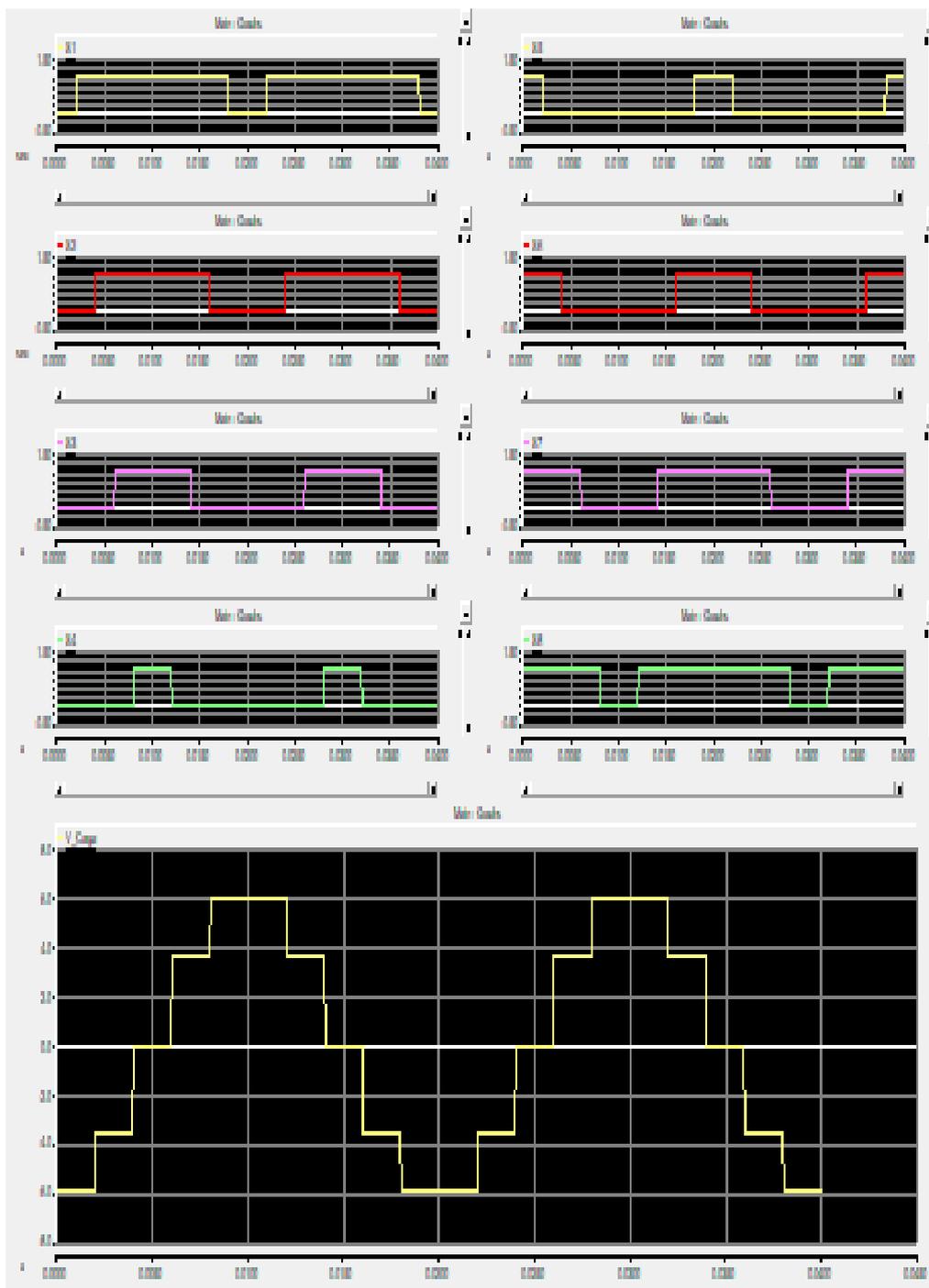


Figura 10: Tensión de salida del inversor de 5 niveles

RESULTADOS

En la figura 11 se presenta el esquema de simulación para un sistema conformado por un generador fotovoltaico, un convertor de CC y el inversor de 5 niveles. A la salida del inversor se conectó un filtro para suavizar la onda obtenida en el inversor que se muestra en la misma figura.

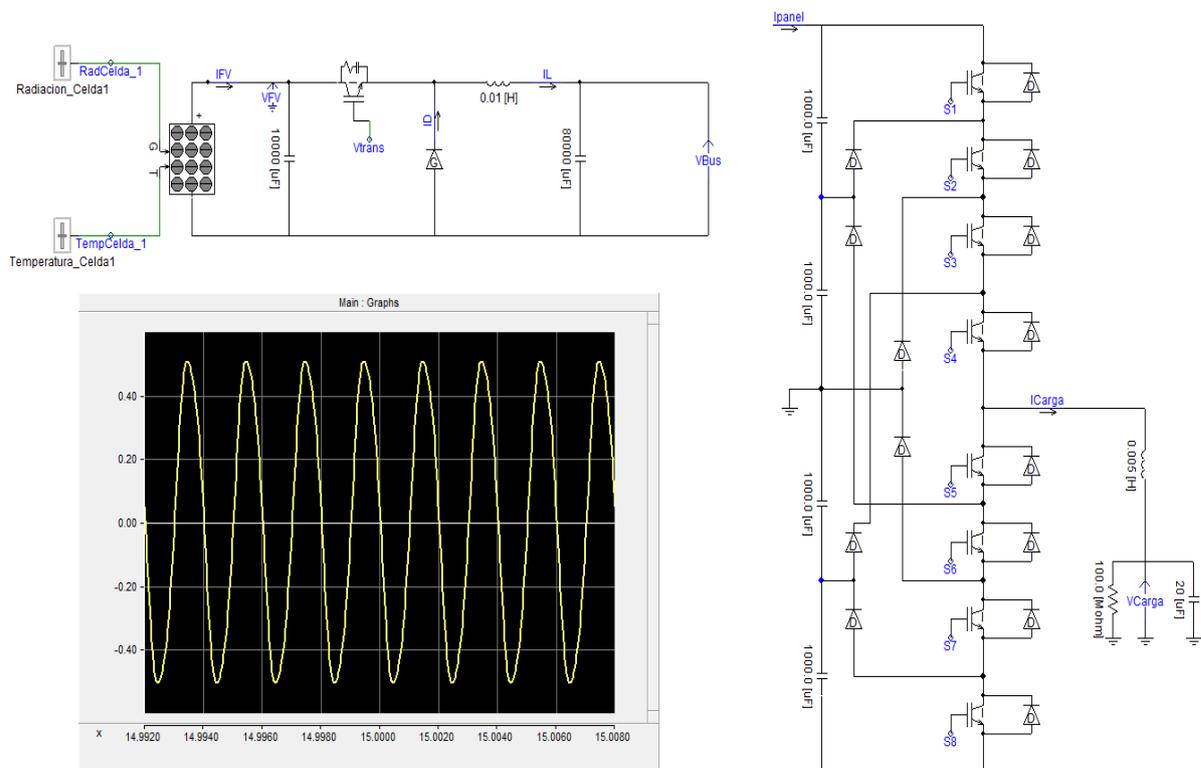


Figura 11: Esquema de simulación de generador fotovoltaico, convertidor de CC e inversor multinivel.

En la figura 11 se observa que para simular el generador fotovoltaico se escogió la topología con inversor central como propuesta inicial, pudiendo cambiar por otras topologías para observar y analizar en detalle su comportamiento.

Se seleccionó el algoritmo de Conductancia incremental para simular el control de seguimiento del punto de máxima potencia del cual se obtuvo características acordes a los modelos propuestos en la bibliografía.

Para convertir la corriente continua que entrega el generador fotovoltaico en corriente alterna, se optó por un inversor con 5 niveles. La salida del inversor alimenta las cargas independientes que trabajan con tensión o para el conexionado a la red eléctrica.

CONCLUSIONES

En este trabajo se utilizó una herramienta de simulación para analizar y probar distintas topologías a implementar en sistemas fotovoltaicos.

Se observa claramente que el resultado de la simulación permite obtener parámetros que se pueden comparar con los cálculos realizados previamente, permitiendo una mejor adecuación del proyecto a implementar.

El resultado obtenido alienta a continuar con esta metodología de análisis y se pretende implementar en la enseñanza de asignaturas de electrónica de potencia y de sistemas fotovoltaicos debido a su versatilidad y variedad de librerías que permiten una amplia área de estudio.

A futuro se propone ampliar la línea de investigación sobre inversores multiniveles de otras topologías y también aumentar la cantidad de niveles de la salida del inversor, para continuar en un trabajo posterior con la implementación práctica.

REFERENCIAS

- Blanco, I., Martínez, B., & Montiel, A. (2004). Inversores multinivel para aplicaciones de gran potencia. *Científica de Ingeniería Energética*, 25 (3), 37 - 44.
- Calaça, M. (2016). Projeto de um Sistema de Conversor Multinível para Painéis Fotovoltaicos. (Tesis de maestría) Universidad de Madeira, Brasil.
- De Silva, J., & Gustavsen, B. (2014) *Modeling of Frequency Dependent Characteristics in Power System Components and Sub-networks*. <https://www.pscad.com/knowledge-base/article/152>
- Gonzales, M., Siroit, G., & Morrone, M. (2019). *Estado del Arte de la Tecnología de generación de energía eléctrica utilizando la luz solar*. [PDF]. Recuperado el 18 de octubre de 2020 de www.argentina.gob.ar/sites/default/files/energia_solar_fotovoltaicaoctubre_2019.pdf
- Gustavsen, B., & De Silva, H.M.J. (2013) Inclusion of Rational Models in an Electromagnetic Transients Program: Y-Parameters, Z-Parameters, S-Parameters, Transfer Functions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28 (2), 1164 - 1174. Recuperado desde <https://ieeexplore.ieee.org/document/6480900/authors#authors>
- Manitoba Hydro International Ltd. (1986) Pscad (4.2.1) [Software]. Recuperado el 19 de octubre de 2020 de <https://www.pscad.com/software/pscad/free-edition>
- Manitoba HVDC Research Centre, Hydro International Ltd. (2018). *PSCAD User's Guide v4.6*. [PDF]. <https://www.pscad.com/knowledge-base/article/160>
- Martínez Hernández, D. (2006). *Control digital para convertidor multinivel alimentado con energía solar*. (Tesis de maestría) Universidad de las Américas. Puebla, México.
- Moler, C. (1984) Matlab. (9.9) [Software]. Recuperado el 18 de octubre de 2020 de <https://la.mathworks.com>
- Navntoft, C., Biurrún, N., Cristóbal, M., Cuccorese, S., Defferrari, I., & Raggio, D. (2019). *Manual de generación distribuida solar fotovoltaica*. [PDF] Recuperado el 18 de octubre de 2020 de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manual_de_generacion_distribuida_solar_fotovoltaica_nb2.pdf
- Powersim. (1994) PSIM. (10) [Software]. Recuperado el 18 de octubre de 2020 de <https://powersimtech.com/try-psim/>
- Rashid, M. (1999). *Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones*. (1ra ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana.

ABSTRACT: This paper shows the simulation of a photovoltaic system with a topology that includes a generator connected to a DC buck-converter and a 5level inverter as the system's outflux. This research analyses control strategies for each step with its own configuration and application. The PSCAD/EMTDC software was used to implement this task. The obtained results prove that both the photovoltaic generators and the stages that make up the inverters have a flexible interconnection which encourages its use in education, specifically in the fields of power electronics and photovoltaic systems.

KEYWORDS: Simulation. Photovoltaic generation. I/V curve. P/V curve. Mmpt. 5 levels converters.