

Convertidores electrónicos de potencia de los sistemas fotovoltaicos autónomos de 300 w instalados en Cuba

Power electronic converters of 300 w stand-alone photovoltaic systems installed in Cuba

Mercedes Canasí Piñero¹, Eduardo Rodríguez Álvarez¹, Daniel Ravelo Artiles¹, Yandry Rodríguez Domínguez¹, Raynel Díaz Santos¹

¹Universidad Tecnológica de la Habana, José Antonio Echeverría, CUJAE, La Habana, Cuba

*Autor de correspondencia: mcanasi@electronica.cujae.edu.cu

Recibido: 2 de enero de 2023

Aprobado: 6 de marzo de 2023

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ABSTRACT

En el “Plan de Desarrollo y Uso Eficiente de la Energía hasta el 2030” en Cuba, se encuentra la utilización de los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFVA) para el suministro de energía eléctrica. En el presente trabajo se realiza un análisis de las topologías de los convertidores electrónicos de potencia que conforman los SFVA de 300W. Se estudian tanto el regulador de carga con seguimiento del punto de máxima potencia como la etapa inversora desde la simulación y las mediciones en puntos de interés de la instalación. Los resultados obtenidos de forma experimental permiten afirmar que el regulador de carga está compuesto en todos los casos por un convertidor reductor sincrónico que maneja el control del punto de máxima potencia en el proceso de carga de la batería. Un convertidor CD-CD tipo *Push-Pull* junto a un convertidor tipo puente completo monofásico con modulación sinusoidal se encargan de suministrar la corriente alterna a la salida.

Palabras clave: Sistemas Fotovoltaicos Autónomos, Convertidores Electrónicos de Potencia.

In the "Plan for the Development and Efficient Use of Energy until 2030" in Cuba, the use of autonomous photovoltaic systems (APVS) for the supply of electric energy is included. In the present work, an analysis of the topologies of the electronic power converters that make up the 300 W APVS is carried out. Both the charge regulator with maximum power point tracking and the inverter stage are studied from simulation and measurements at points of interest of the installation. The results obtained experimentally allow us to affirm that the charge regulator is composed in all cases by a synchronous step-down converter that manages the control of the maximum power point in the battery charging process. A push-pull DC-DC converter, together with a single-phase full-bridge converter with sinusoidal modulation, is in charge of supplying the alternating current at the output.

Key words: Stand-Alone Photovoltaic Systems, Electronic Power Converters.

INTRODUCCION

Con el transcurso del tiempo, las emisiones de gas de efecto invernadero (GEI) hacia la atmósfera se han incrementado considerablemente. En la actualidad, la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado aproximadamente en un 145%, con respecto a los niveles existentes antes de la Revolución Industrial. Con el acelerado crecimiento de la población mundial y de las economías emergentes, se predice que, para el año 2050, el consumo global de recursos naturales será de hasta 3 veces mayor que el actual [1], lo cual influirá de manera notable en el cambio climático. Estudios realizados han demostrado que el aumento de la temperatura en el planeta coincide con el inicio de la quema de carbón, petróleo y gas natural de manera masiva. Todo esto también ha influido en la acumulación de CO₂ en la atmósfera, viéndose reflejado de maneras significativas en el aumento de la temperatura de los fondos oceánicos, el incremento del nivel del mar por la dilatación térmica del agua, así como la disminución de los glaciales y de la superficie de hielo ártico [2–6].

Cómo citar este artículo:

Mercedes Canasí Piñero y otros. Convertidores electrónicos de potencia de los sistemas fotovoltaicos autónomos de 300 w instalados en Cuba. Ingeniería Energética. 2023. 44(1), enero/abril. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

Dentro de las tecnologías desarrolladas para mitigar estos efectos se encuentra el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía (FRE), a partir de convertidores electrónicos de potencia que permiten almacenar y distribuir la energía proveniente del sol. Dichos sistemas se pueden clasificar en autónomos, conectados a la red e híbridos, siendo estos primeros el objeto de estudio del presente trabajo. En la figura 1, se muestra la estructura en bloque de un sistema fotovoltaico autónomo, en el cual queda representados los elementos principales que lo conforman: el arreglo de paneles fotovoltaicos (*PV array*), el controlador de carga (*charge controller*) y el inversor (*inverter*); destinados al manejo y conversión de la energía proveniente de los paneles, las baterías (*battery*) y las cargas.

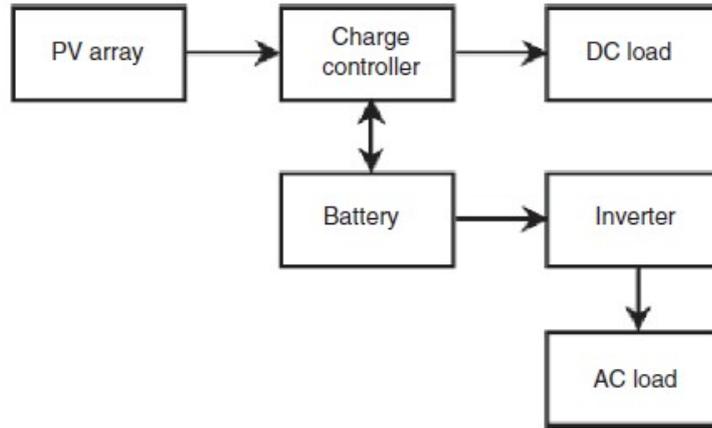


Fig. 1. Diagrama en bloques de un sistema fotovoltaico autónomo [7]

Las fuentes renovables aportan alrededor del 4,5 % del total de la generación en Cuba, pero se estima que sean las de mayor crecimiento en los años venideros, dado que implica para la nación mayor soberanía e independencia energética. Igualmente se avanza en la electrificación de las zonas rurales mediante sistemas fotovoltaicos autónomos, que entre los instalados y en proyección beneficiarían a miles de viviendas en todo el país [8].

Características de los sistemas fotovoltaicos autónomos instalados

La figura 2, muestra la estructura de los sistemas fotovoltaicos y los correspondientes convertidores utilizados. Un convertidor de Corriente Directa a Corriente Directa (CD-CD) se encarga del proceso de carga de las baterías de 12 V, controlado por un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés) de los paneles solares. La etapa inversora está constituida por un convertidor CD-CD aislado con excitación bidireccional del núcleo *Push-Pully* un inversor monofásico puente completo. El convertidor *Push-Pull* permite, a partir del nivel de tensión proporcionado por las baterías, obtener la tensión necesaria a la entrada del inversor la cual es de magnitud similar a la de salida del sistema; a este punto se le denominó bus de CD (VCD). Es de señalar que de no detectarse baterías conectadas no se generan señales de control y por consiguiente no se suministra energía a las cargas.

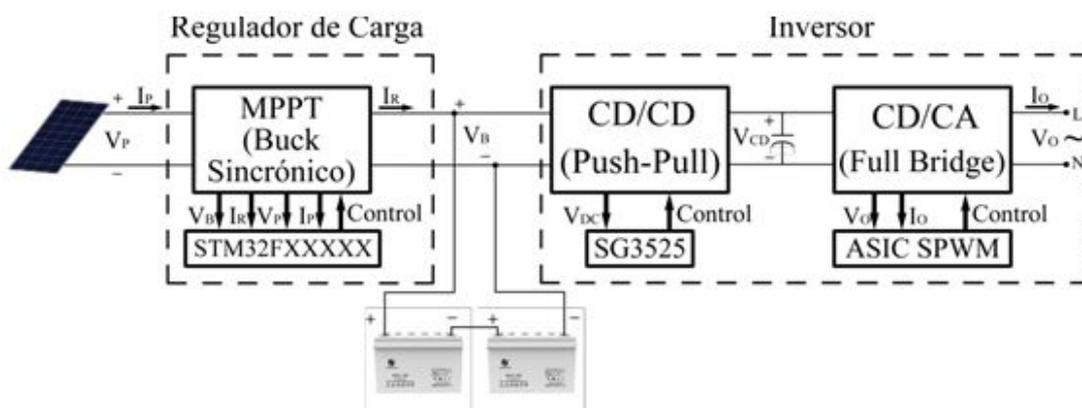


Fig. 2. Convertidores Electrónicos de Potencia utilizados

El convertidor *Buck Sincrónico*, cuyo esquema se muestra en la figura 3, adecua el nivel de tensión a la salida del panel fotovoltaico V_p al requerido por las baterías V_B , garantizando una elevada eficiencia dado por su propia estructura como por la estrategia de control MPPT utilizada. Este tipo de convertidor utiliza un MOSFET (Q02) en lugar de un diodo Schottky dado que su caída en conducción es muy pequeña e inferior a la tensión umbral típica de un diodo de potencia.

Los MOSFET Q01 y Q02 trabajan de forma complementaria. No obstante, dada la necesidad de incluir un tiempo muerto en el funcionamiento del convertidor, la corriente del inductor fluiría a través del diodo propio del MOSFET Q02 durante este tiempo, lo que afecta la eficiencia. El diodo Schottky D01 se incorpora para minimizar las pérdidas durante el tiempo muerto, o sea, cuando ambos transistores Q01 y Q02 están apagados; ya que su caída en conducción es considerablemente menor a la del diodo del MOSFET [9].

Los transistores Q03 y Q04 se utilizan para proteger el convertidor de conexión con polaridad invertida del panel y las baterías respectivamente. El control de este convertidor con la implementación del seguimiento del punto de máxima potencia se lleva a cabo por diferentes procesadores de la familia de micro controladores STM32F que incorporan un núcleo de alto rendimiento ARM Cortex-M3 de 32bits.

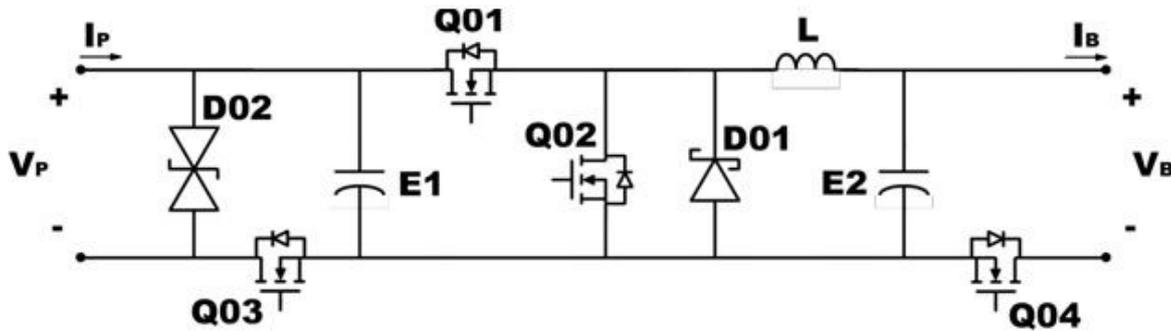


Fig. 3. Esquema del convertidor Buck Sincrónico

El convertidor *Push-Pull* queda conformado por un transformador de ferrita elevador con relación de vueltas N_2/N_1 y un rectificador onda completa tipo puente y se prescinde de un filtro inductivo a la salida, todo lo cual se observa en la figura 4. El ciclo útil de trabajo D determina la tensión de salida V_{CD} [8, 9] y se puede predecir a partir de las mediciones realizadas de: Ver ecuaciones (1 y 2).

$$V_{CD} = 210 \text{ V} \quad (1)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = 9,1 \quad (2)$$

El ciclo útil D queda determinado según la ecuación (3), como:

$$D = \frac{V_{CD}}{2 \cdot V_B \cdot \frac{N_2}{N_1}} = \frac{210}{2 \cdot 24 \cdot 9,1} = 0,48 \quad (3)$$

Como se observa, se trabaja muy cercano al ciclo útil máximo permitido para esta topología de convertidor, teniendo en cuenta el tiempo muerto requerido entre las conmutaciones de los semiconductores de potencia. Este resultado confirma el uso solamente del filtro capacitivo E2.

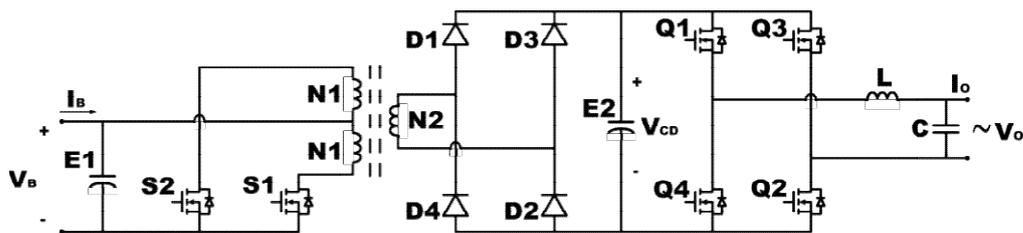


Fig. 4. Convertidores de la etapa inversora

El circuito integrado SG3525 (ver figura 2), es un regulador PWM que provee dos salidas en configuración *totem-pole*, que pueden ser usadas para controlar el ciclo útil en convertidores CD-CD. Es un circuito monolítico que dispone de una tensión de referencia para uso interno y externo, arranque suave, control del tiempo muerto, protección por baja tensión, terminal que permite inhibir las salidas y el arranque suave y control del ciclo útil a través de un amplificador de error. La frecuencia de trabajo se define mediante resistor y condensador externo. En esta aplicación se utilizan valores que fijan la frecuencia a 40kHz.

En el control del inversor monofásico se utilizan circuitos integrados también de propósito específico que implementan estrategias de modulación sinusoidal a alta frecuencia (ver figura 2), utilizando algunos componentes que definen sus características de funcionamiento.

RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

Para la obtención de las mediciones en los diferentes componentes y terminales de los convertidores se utiliza un osciloscopio de almacenamiento digital de la serie TPS2024B del fabricante Tektronix.

Cuando el panel comienza a generar, o en caso de una perturbación en su punto de trabajo, el algoritmo del regulador de carga ejecuta una secuencia para buscar el punto de máxima potencia. Se incrementa paulatinamente el ciclo útil del transistor Q01 y, por tanto, aumenta la corriente extraída del panel, de modo que el punto de trabajo se mueve por la curva característica de Potencia contra Tensión.

El control MPPT permite buscar el punto de máxima potencia de los paneles solares. Para realizar esta tarea en cada período de muestre o semi de la tensión y corriente del panel, calculando con estos valores la potencia que entrega. Básicamente el control se basa en la comparación de la potencia y la tensión con el valor medido en la iteración anterior respectivamente. La figura 5, muestra un diagrama en bloques del control MPPT.

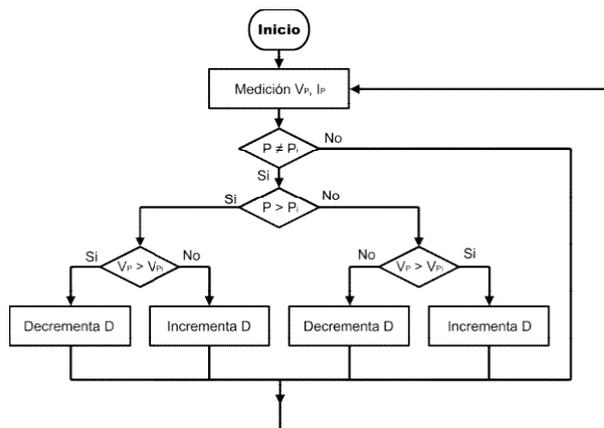


Fig. 5. Diagrama en Bloques del Algoritmo MPPT

En la figura 6, se observa el proceso de búsqueda del punto de máxima potencia a partir de tres mediciones realizadas, donde se observa el incremento del ciclo útil de Q01 mientras que en el avance de este proceso se mantiene constante el ciclo útil de Q02. La última imagen de la secuencia muestra las señales de control de ambos transistores, una vez establecido el punto de máxima potencia.



Fig. 6. Señales de control de Q01 y Q02 durante el proceso de búsqueda del punto de máxima potencia

En la figura 7a, se muestran las señales entre "gate-source" aplicadas a los transistores S1 y S2 del convertidor *Push-Pull*. Como se observa trabajan en contrafase, con un ciclo útil similar al calculado y frecuencia de conmutación alrededor de 40 kHz. Se puede apreciar el tiempo muerto entre las señales que impide que ambos semiconductores entrenen conducción a la misma vez. En la figura 7b, se observa el comportamiento bidireccional de este convertidor.

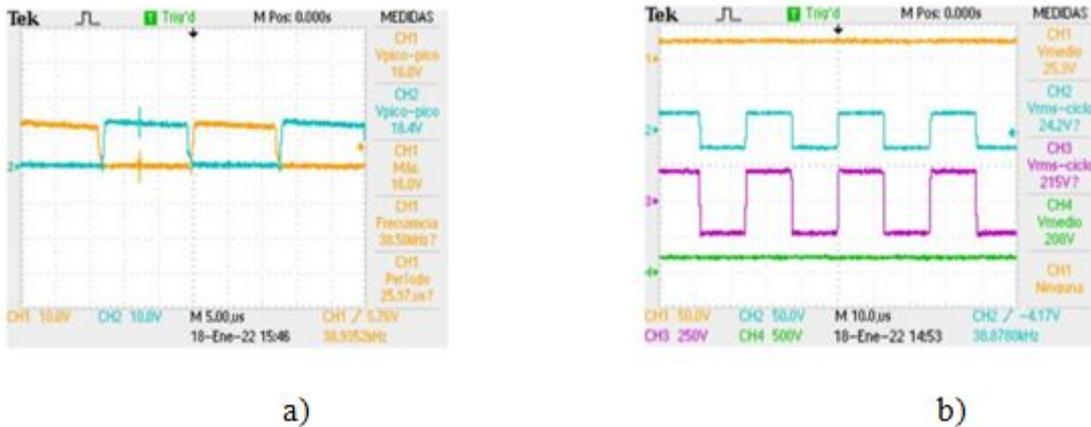


Fig. 7. a) Señales de control de los transistores S1 y S2 b) Tensión a la entrada, Tensión en elprimarioy secundario del transformador y a la salida del *Push-Pull*

Las características de la modulación PWM sinusoidal implementada se observan en la figura 8. En cada diagonal un transistor trabaja a la frecuencia de salida deseada de 60Hz mientras el otro conmuta a una frecuencia de 23kHz aproximadamente (figura8a). Este tipo de estrategia se conoce como modulación PWM híbrida [10]. Las señales mostradas en la figura8b, se corresponden a la tensión de salida antes y después del filtro LC. Como resultado se obtiene una señal de alterna cuyo valor efectivo es 118 V a una frecuencia de 60Hz.

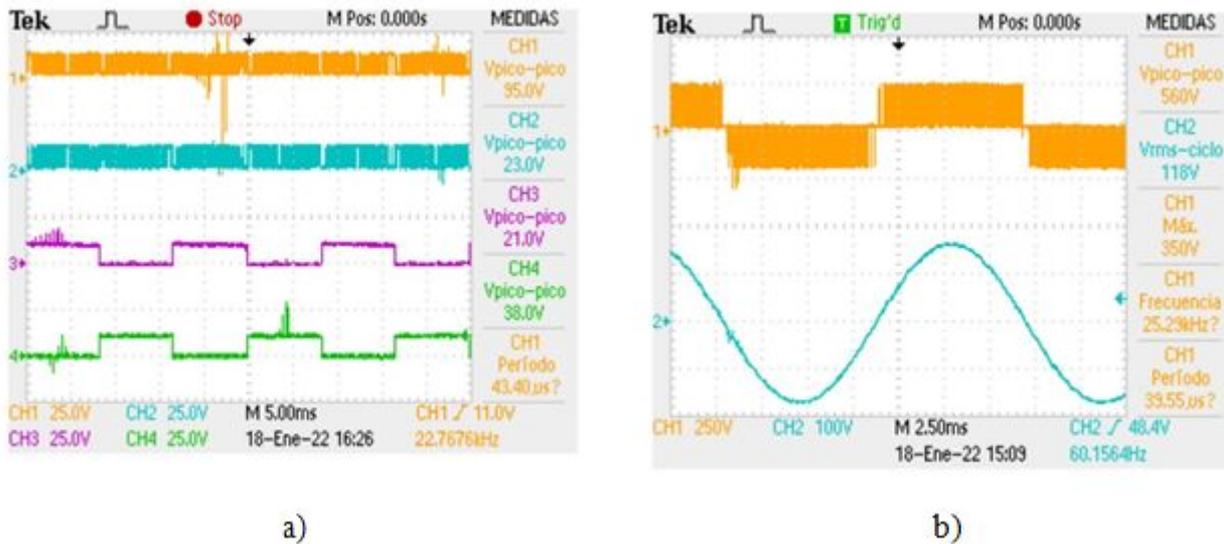


Fig. 8.a) Señales de control de los transistores b) Tensión de salida delinversor

Simulaciones realizadas

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la modelación y simulación del regulador de carga y la etapa inversora en el software MATLAB. Disponer de esta herramienta posibilita evaluar el comportamiento del sistema ante variaciones de la carga y para diferentes condiciones de trabajo de los paneles solares y las baterías. Se han utilizado los valores de resistencia del canal en conducción de los MOSFET ($R_{DS(ON)}$) y de caída de tensión en sentido directo de los diodos (V_F) declarados por el fabricante de las componentes. Los resultados obtenidos de la simulación del modelo del regulador de carga ante diferentes valores de irradiancia, en correspondencia con los datos reales del panel, demuestran lo significativo del uso de un algoritmo MPPT en lo que a eficiencia se refiere. En la figura 9ylafigura 10,se observan los valores de potencia entregada por el panel, los cuales coinciden con el punto de máxima potencia para cada condición (ver figura11).

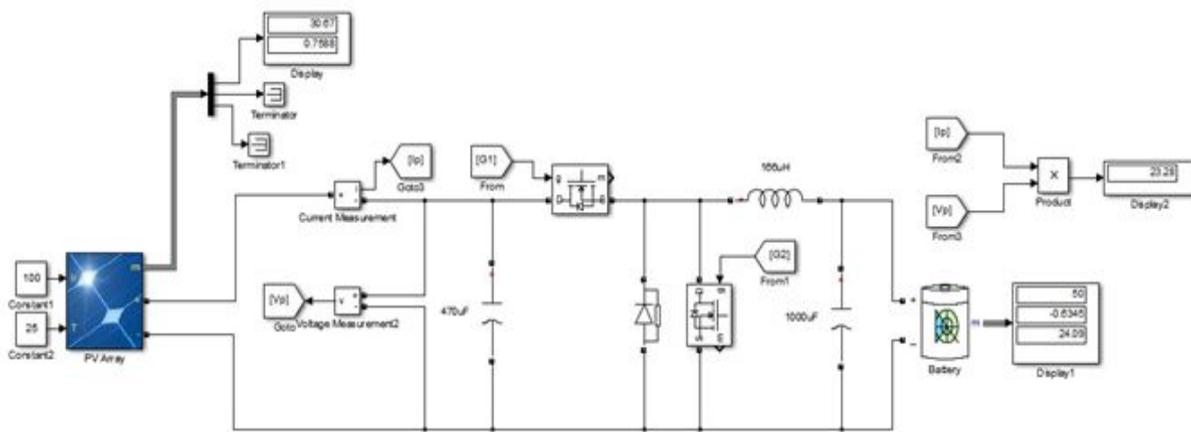


Fig. 9. Modelo y simulación en MATLAB del regulador de carga para una Irradiancia de 1000W/m2

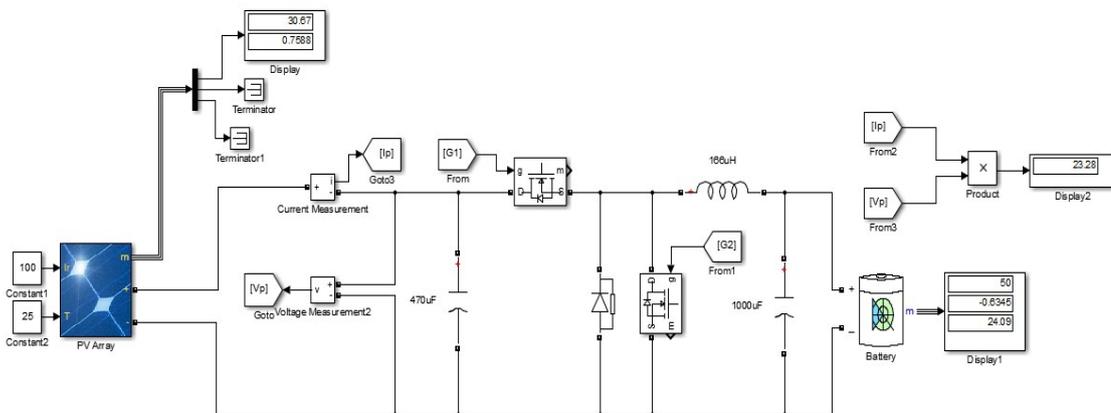


Fig. 10. Modelo y simulación en MATLAB del regulador de carga para una Irradiancia de 100W/m2

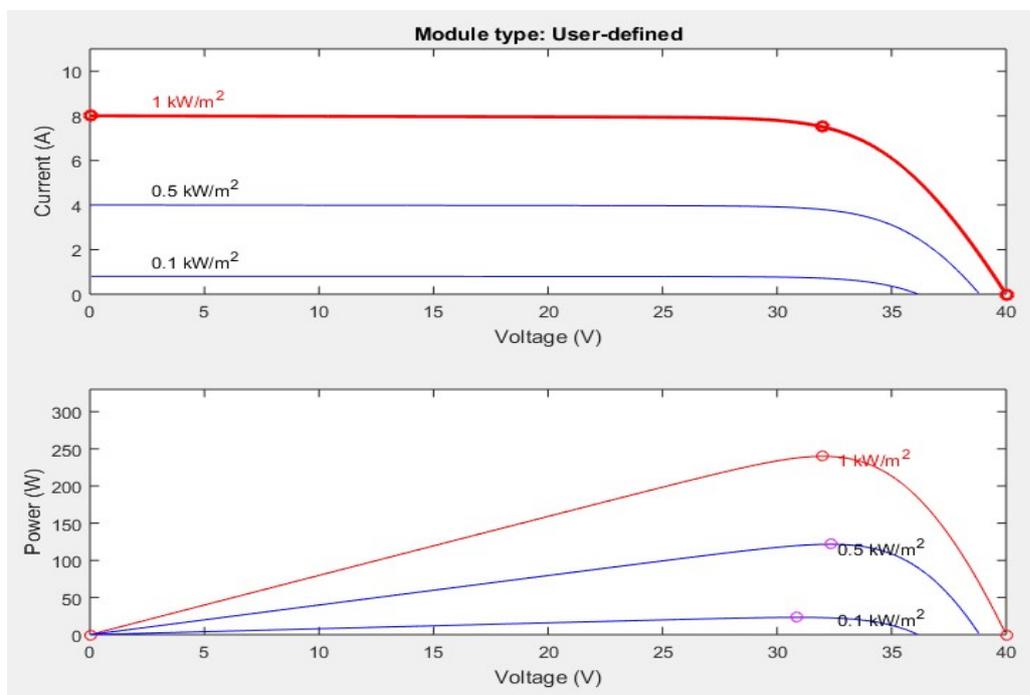


Fig. 11. Curvas características del panel utilizado para diferentes valores de irradiancia

La figura12 y figura13, muestran el modelo de la etapa inversora y los resultados de la simulación a carga nominal, obteniéndose una tensión de salida sinusoidal de 120V.

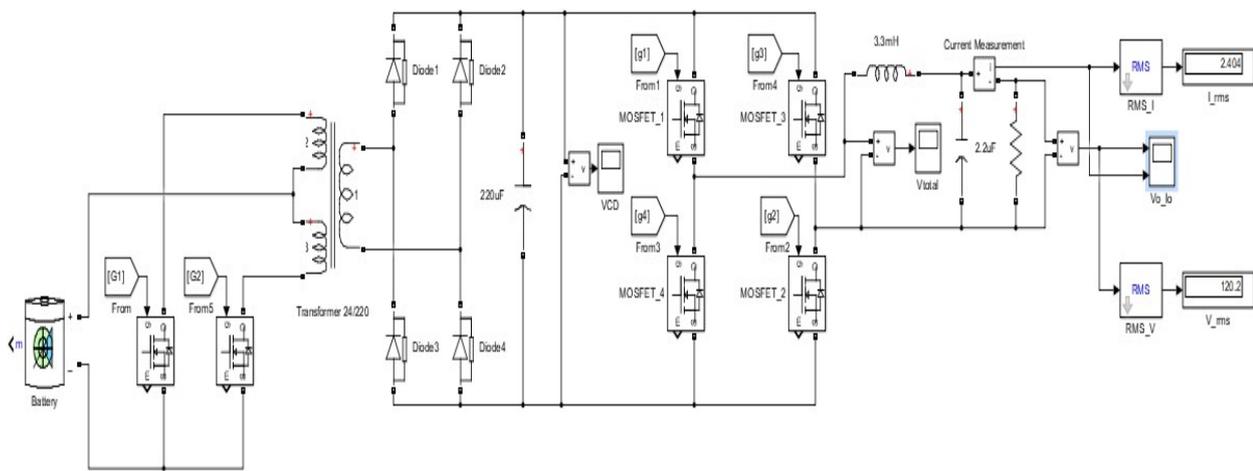


Fig. 12. Modelo en MATLAB de la etapa inversora

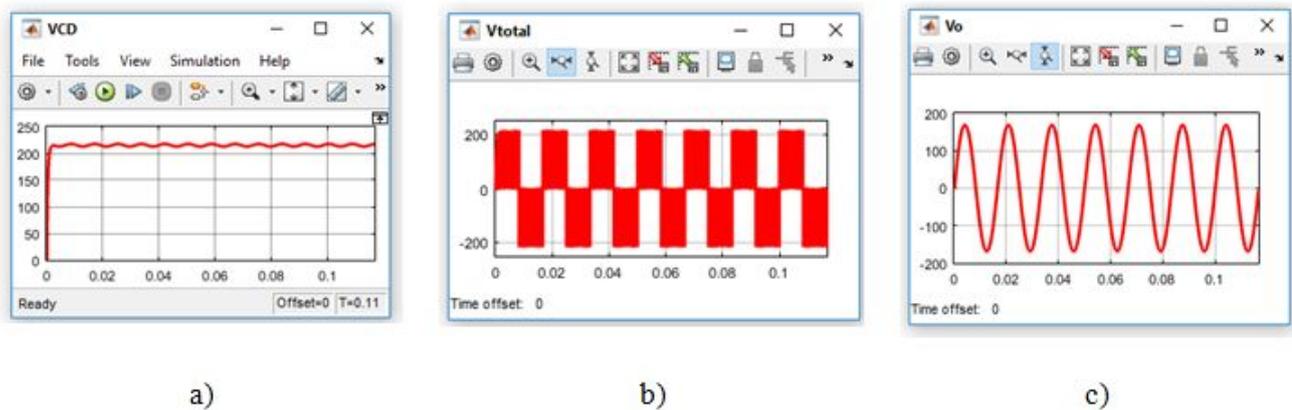


Fig. 13 a) Tensión a la salida del convertidor *Push-Pull* b) Tensión en el inversor sin filtrar c) Tensión de salida del sistema

En una vista ampliada de la tensión de salida del convertidor *Push-Pull* se observa como la tensión de rizado es de aproximadamente 6V a potencia nominal sin afectar el funcionamiento del sistema (ver figura14).

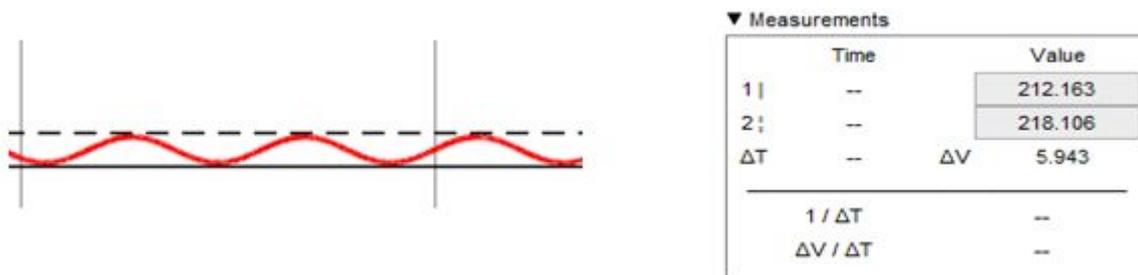


Fig. 14. Tensión de rizado a la salida del *Push-Pull*

Los resultados de la simulación de la etapa inversora con carga resistiva inductiva (R-L) permiten asegurar que no existe gran distorsión de armónicos en la tensión y corriente para dicho tipo de carga. (Ver figura15).

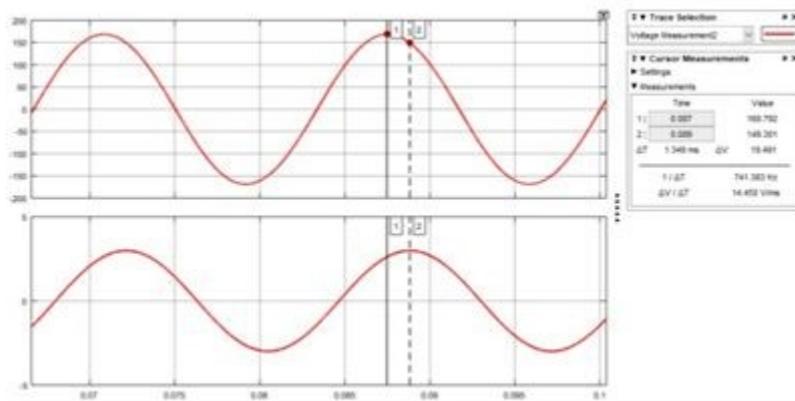


Fig. 15. Tensión y corriente a la salida con carga R-L

CONCLUSIONES

En Cuba se han instalado una gran cantidad de este tipo de sistemas fotovoltaicos en diferentes geografías, dando solución a la no disponibilidad del Sistema Eléctrico Nacional y en la actualidad existen planes de incrementar su uso, debido a las necesidades aún no cubiertas. Los resultados del trabajo contribuyen a elevar, en los profesionales que se encargan de su puesta en marcha y mantenimiento, el conocimiento sobre las características y funcionamiento de dichos sistemas lo que abre la posibilidad de reparación en nuestro país. Adicionalmente, fomenta el cumplimiento de la ansiada meta del diseño y construcción de sistemas fotovoltaicos de producción nacional.

REFERENCIAS

- [1]. Torres-Cuevas, Eduardo and González-Díaz, Patricia. "Las ciencias en la construcción de la sociedad y la cultura cubanas". Tesis de debate. La Habana, Cuba: Imágen Contemporánea, 2021. ISBN 978-959-293-054-4. [Consultado el 12 de Septiembre de 2022]. Disponible en: <http://media.cubadebate.cu/wp-content/uploads/2021/02/tesis-lista-con-cubierta.pdf>
- [2]. Santer, Benjamin D., et al. "Tropospheric warming over the past two decades". *Scientific reports*. 2017, vol. 7, n. 1, p.1–6. [Consultado el 15 de Septiembre de 2022]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-02520-7>
- [3]. Levitus, Sydney, Antonov, et al. "World ocean heat content and thermohaline sea level change (0–2000m), 1955–2010". *Geophysical Research Letters*. 2012, vol. 39, n.10. [Consultado el 20 de Julio de 2022]. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012GL051106>
- [4]. Oerlemans, Johannes. "Extracting a climate signal from 169 glacier records". *Science*. 2005, vol. 308, n. 5722, p. 675–677. [Consultado el 18 de Julio de 2022]. Disponible en: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1107046>
- [5]. Arctic sea ice 2017. "Tapping the brakes in September". Arctic Sea Ice News and Analysis. [Consultado el 24 de enero de 2022]. Disponible en: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/2017/10/arctic-sea-ice-2017-tapping-the-brakes-in-september/>
- [6]. Lüthi, Dieter, et al. "High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present". *Nature*. May 2008, vol. 453, n. 7193, p. 379–382. [Consultado el 15 de Septiembre de 2022]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/nature06949>
- [7]. Rashid, M. H. "Power electronics handbook: devices, circuits, and applications". 3ra edición. Elsevier Inc., 2011. ISBN 978-0-12-382036-5. [Consultado el 16 de Mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780123820365/power-electronics-handbook>
- [8]. Unión Eléctrica. "Unión Eléctrica: producir energía de modo más sostenible". *Opciones*. [Consultado el 9 de Julio de 2022]. Disponible en: <http://www.opciones.cu/cuba/2021-03-17/union-electrica-producir-energia-de-modo-mas-sostenible>
- [9]. Kazimierczuk, M. K. "Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters". 2nd Edition. Wiley, 2016. ISBN 978-1-119-00954-2. [Consultado el 16 de Mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.wiley.com/en-us/Pulse+Width+Modulated+DC+DC+Power+Converters,+2nd+Edition-p-9781119009542>
- [10]. Teodorescu, Remus, Liserre, Marco and Rodríguez, Pedro. "Grid converters for photovoltaic and wind power systems". John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-470-06670-4. [Consultado el 16 de Mayo de 2022]. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470667057>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Mercedes Canasí Piñeiro: <https://orcid.org/0000-0001-5620-3374>

Diseño de la investigación, búsqueda bibliográfica, recopilación de datos, corrida del software, análisis de los resultados, redacción del artículo y revisión crítica del contenido hasta su aprobación final.

Eduardo Rodríguez Álvarez: <https://orcid.org/0000-0002-4122-2668>

Diseño de la investigación, recopilación de datos, reprogramación y adaptación del algoritmo, programación y corrida del software, análisis de los resultados, redacción del artículo y revisión crítica del contenido y aprobación final.

Daniel Ravelo Artilles: <https://orcid.org/0000-0001-5963-8955>

Búsqueda bibliografía, recopilación de datos, corrida del software, análisis de los resultados y revisión del contenido del artículo y aprobación final.

Yandry Rodríguez Domínguez: <https://orcid.org/0000-0002-2990-1596>

Búsqueda bibliografía, recopilación de datos, corrida del software, análisis de los resultados y revisión del contenido del artículo y aprobación final.

Raynel Díaz Santos: <https://orcid.org/0000-0003-3134-1871>

Búsqueda bibliografía, recopilación de datos, corrida del software, análisis de los resultados y revisión del contenido del artículo y aprobación final.