

**AN IMPROVED MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT)
ALGORITHM FOR AUTONOMOUS SENSOR NODE APPLICATIONS**

**PROPUESTAS DE UN ALGORITMO DE RASTREO DE MÁXIMA POTENCIA
(MPPT) PARA APLICACIONES DE NODOS SENSORES AUTÓNOMOS**

**MSc. Mónica María Salazar Cardona,
PhD. Alejandro Marulanda Tobón**

Universidad EAFIT

Escuela de ciencias, Departamento de ciencias físicas
Ciudadela Universitaria. Medellín, Antioquia, Colombia.
Tel.: 57-4-2619500
E-mail: mmsalazarc@eafit.edu.co

Abstract: MPPT techniques implemented with solar panels are expensive and not very accurate in low power applications such as autonomous sensor nodes. In this article, we propose an MPPT technique that addresses these disadvantages by comparing voltages of both the converter and the node energy storage device. We simulate the solar panel and the autonomous sensor node using the Matlab / Simulink program. Here we present the panel characteristic curves, the power and efficiency curves delivered by the converter with the perturb and observe (P&O) technique, and the proposed technique. These results showed that the proposed technique allows to obtain greater efficiency at the converter. Also, the maximum power point tracking operation of the proposed technique was proved. Furthermore, with this technique's implementation, a lower cost of the autonomous sensor node is anticipated.

Keywords: Energy harvesting, autonomous sensor node, MPPT control, solar energy

Resumen: Las técnicas MPPT implementadas con paneles solares son costosas y no muy precisas en aplicaciones de bajo consumo de energía como los nodos sensores autónomos. En este artículo, proponemos una técnica MPPT que aborde estas desventajas, mediante la comparación de voltajes tanto del convertidor como del dispositivo para almacenar energía del nodo. La metodología empleada consiste simular el panel solar y el nodo sensor autónomo mediante el programa Matlab/Simulink. Como resultados de la investigación se presentan las curvas características del panel, las curvas de potencia y eficiencia entregada por el convertidor, para un control MPPT con técnica perturbar y observar (P&O) y con la técnica propuesta. Se demuestra que el algoritmo propuesto permite obtener una mayor eficiencia para la estrategia y se verifica su funcionamiento como técnica de rastreo del punto de máxima eficiencia. Además, con la implementación de esta técnica se anticipa un menor costo del nodo sensor autónomo.

Palabras clave: Energía renovable, nodo sensor autónomo, control MPPT, energía solar.

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar es utilizada para alimentar aplicaciones con bajos consumos de energía, como es el caso de los nodos sensores autónomos,

dispositivos compuestos por nodos sensores, una fuente de energía renovable, una unidad de almacenamiento de energía y un convertidor DC-DC. En implementaciones recientes de estos dispositivos, se presentan consumos de corriente

que van de $0.5A$ a $1.0A$ para voltajes entre $3.3V$ a $5.0V$ (Adu-Manu *et al.*, 2018; Garcia-Lesta *et al.*, 2017). Debido a estos bajos consumos de energía, hoy se plantea como posible utilizar la energía solar para mantener la operación continua de los nodos con una fuente renovable e inagotable (Frezzetti *et al.*, 2015). Esta realidad, puede observarse en las aplicaciones de nodos sensores autónomos, los cuales han utilizado paneles solares con potencias desde $330\mu W$ (Abella *et al.*, 2019) hasta $5W$ (Wang *et al.*, 2012). Los desempeños de estos paneles son suficientes como una consecuencia de que estos están conectados a convertidores DC-DC con controladores diseñados para modificar su ciclo de trabajo, según la potencia entregada por el panel. Un ejemplo de esto es el control MPPT, sobre el cual centramos nuestro estudio en el presente artículo.

Debido a que la implementación de los nodos sensores autónomo depende del costo de sus componentes, entre ellos el controlador, a estos se han integrado técnicas MPPT de bajo costo, por ejemplo, la técnica P&O. Esta técnica consiste en realizar medidas sucesivas de voltaje y corriente para posteriormente compararlas, como se presenta en la figura 1. Su implementación requiere de sensores de corriente, divisores de voltaje y al menos una unidad para procesar información. El costo de este tipo de implementaciones se justifica para sistemas que manejan altas potencias (Penella *et al.*, 2009), sin embargo, para el caso de los nodos sensores autónomos, esto genera costos de implementación semejantes a los costos de su implementación (Toh *et al.*, 2014). Además del algoritmo P&O, otras técnicas se han implementado, no obstante, reportan mayores costos o menor eficiencia (Bendib *et al.*, 2015). Debido a que el uso del control MPPT permite mantener una operación eficiente del nodo sensor autónomo (Li *et al.*, 2019), en este artículo se propone un nuevo algoritmo con el cual se reducen los costos de implementación, y se acota el rango de rastreo del punto de máxima potencia, sin sacrificar la eficiencia del convertidor que hace parte del nodo sensor autónomo.

Cuando se trata de implementar un algoritmo MPPT, dos son las problemáticas por abordar. La primera es que una vez el control alcanza el punto de máxima potencia, se generan oscilaciones a su alrededor y posteriormente se presenta una caída en la energía que entrega el convertidor (Ahmed *et al.*, 2015). El segundo problema es que una vez se presenta un cambio en la irradiancia, esta técnica presenta un punto de operación divergente al punto de máxima potencia, si la potencia entregada por el panel aumenta durante el cambio de irradiancia (Ahmed *et al.*, 2015). Para abordar este problema se ha propuesto modificar el

tamaño de la perturbación en el controlador (Ahmed *et al.*, 2015) o generar controles a dos pasos (Mamarelis *et al.*, 2014). Sin embargo, hasta el momento no se ha propuesto una solución que se implemente teniendo en cuenta los parámetros de diseño de la aplicación en la cual se utilizan dichos controles. Hoy en día, los controladores MPPT son eficientes para aplicaciones con altos o medianos consumos de energía, sin embargo, para aplicaciones de baja potencia, como lo son los nodos sensores autónomos, la implementación de dichos controles puede conllevar a gastos innecesarios. Es por lo anterior que en el presente trabajo abordamos las anteriores problemáticas descritas mediante el diseño de un control MPPT mediante la propuesta de una nueva técnica, la cual se desarrolla con base a los parámetros considerados para el diseño del nodo sensor autónomo, alimentado con energía solar. Para esto trabajamos con el modelo teórico para un panel fotovoltaico (Bellia *et al.*, 2014), las ecuaciones del convertidor reductor utilizando el concepto de resistencia de máxima potencia (Ayop *et al.*, 2018) y lo que hasta el momento se ha desarrollado al respecto de las técnicas MPPT, en especial, el algoritmo P&O (Karami *et al.*, 2017). Por lo tanto, en la sección 2 se presenta la metodología trabajada, en la sección 3 los resultados y discusiones y finalmente las conclusiones se exponen en la sección 4.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los controladores MPPT son dispositivos que permiten identificar el par de valores de voltaje y corriente entregados por el panel solar, los cuales corresponden a la máxima potencia. Estos controladores pueden implementarse con diferentes técnicas, cada una de ellas asociadas a un algoritmo particular. El uso de una u otra técnica puede depender tanto de la aplicación a la cual se dirige la implementación del controlador, como a la complejidad que se quiere alcanzar con el control. Las técnicas más comunes e implementadas en los controladores MPPT son P&O, conductancia incremental, gradiente de temperatura, entre otros (Karami *et al.*, 2017). De las anteriores, la técnica P&O se registra como una de las técnicas más eficientes, en tanto esta es simple, precisa y su implementación es de bajo costo en comparación con las demás técnicas (Alik *et al.*, 2018). Como anteriormente se mencionó en este trabajo se presentará una comparación entre la técnica P&O y una nueva técnica que aquí se propone, esto con el objeto de identificar cuál de las dos presenta una mayor eficiencia y menores costos de implementación. Para realizar dicha comparación se simuló el panel solar y el nodo sensor autónomo en el programa Simulink/Matlab y se obtuvieron las

curvas características del panel y la potencia y eficiencia entregada por el convertidor con ambas técnicas MPPT. A continuación, se detalla este proceso.

2.1 Control MPPT con el algoritmo P&O

Un control P&O corresponde a la implementación del algoritmo que se presenta en la figura 1. Esta figura nos muestra que las medidas requeridas para dicha implementación son los valores del voltaje y corriente en el punto donde queremos evaluar la eficiencia del sistema. En este caso, este punto corresponde a la señal de salida del convertidor reductor. Estas medidas son realizadas de forma sucesiva, se almacenan y se asignan con rótulos de n a la medida más actual y $n-1$ a la medida anterior. Del producto de los valores medidos para el voltaje y la corriente se obtiene el valor de la potencia en un tiempo n y un tiempo $n-1$, valores que posteriormente se comparan para definir el valor de la perturbación ΔD , la cual corresponde al aumento o disminución del ciclo de trabajo del convertidor (Khaligh *et al.*, 2017).

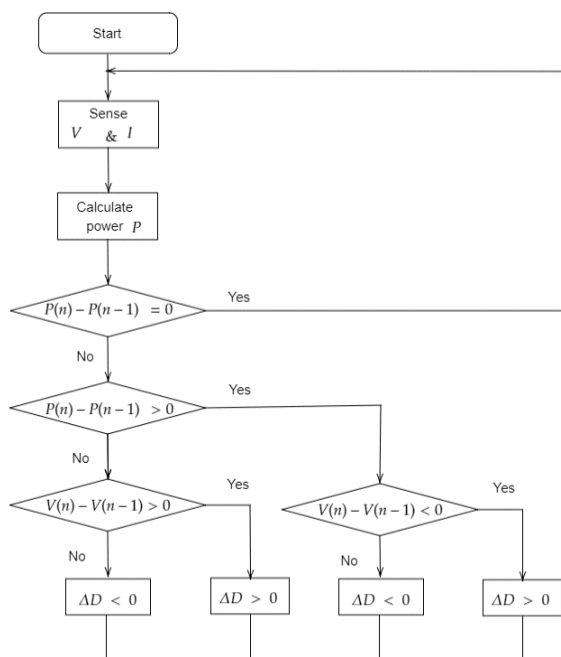


Fig. 1. Diagrama de flujo de control MPPT con técnica P&O. Fuente: elaboración propia

Al utilizarse este algoritmo se obtiene un consumo de energía asociado al consumo requerido por el sensor de corriente y el microcontrolador, siendo este último el dispositivo en donde se programa el algoritmo y se procesan los datos medidos con los sensores. En el contexto del diseño e implementación de nodos sensores autónomos, utilizar esta técnica resulta costoso, debido a que su implementación es aproximadamente equivalente a la del nodo sensor, por requerirse al

menos una unidad de procesamiento y sensores. Además, esta técnica ha mostrado ser eficiente para aplicaciones donde los paneles fotovoltaicos doblan el valor de la potencia entregada por los paneles utilizados en las aplicaciones de nodos sensores autónomos, anteriormente mencionadas. Otras desventajas de implementar la técnica P&O en estos nodos son las dificultades que se han identificado en escenarios más generales, como un seguimiento deficiente del punto de máxima potencia, en situaciones de cambios repentinos de irradiancia (Macaulay *et al.*, 2018) y costo de mantenimiento (Mousa *et al.*, 2019). En la simulación, se implementó esta técnica y se obtuvieron los valores de voltaje, corriente y potencia a la salida del convertidor, para una señal de irradiancia en el panel solar variando entre 800 W/m² y 1000 W/m².

2.2 Control MPPT con el algoritmo propuesto

Debido a las desventajas expuestas de la anterior técnica de control, en el contexto de aplicaciones de nodos sensores autónomos, se propone una nueva técnica MPPT. Su algoritmo se plantea como una modificación del algoritmo P&O. La diferencia fundamental radica en que para su implementación no se requiere de los sensores de corriente. En su lugar, se propone realizar una comparación entre los voltajes del panel fotovoltaico, la unidad de almacenamiento de energía del nodo, el voltaje de máxima potencia y el voltaje a la salida del convertidor. En esta técnica, cuando el voltaje de las baterías es mayor al voltaje de descarga mínima en las baterías y si este último no sobrepasa el valor de máxima potencia promedio del panel, se compara el voltaje de salida del convertidor en un instante y un instante anterior, para modificar el ciclo de trabajo. En la figura 2 se presenta el diagrama de flujo del anterior procedimiento descrito, el cual corresponde al algoritmo asociado a la técnica MPPT propuesta. Este algoritmo también nos indica que, para las demás situaciones, la señal de control desconecta el panel de la unidad de almacenamiento de energía y por lo tanto previene futuros malos funcionamientos del nodo sensor como una consecuencia de un mal manejo de sus componentes. Los voltajes máximos y mínimos tanto del panel se obtienen mediante la simulación del panel solar y del nodo sensor autónomo. También se utiliza la información de fábrica del dispositivo de almacenamiento del nodo.

En este algoritmo propuesto no se requiere realizar medidas de corriente, debido a que el nodo sensor solo se conecta al controlador, una vez el voltaje del panel sobrepasa el punto de la máxima potencia. En su lugar, las técnicas P&O son utilizadas para aplicaciones operando en un voltaje que oscila entre valores menores y

mayores a este máximo (Alik *et al.*, 2018). También se puede observar que, con esta propuesta la divergencia reportada en este tipo de implementaciones no se presenta, puesto que el rango de valores de voltaje en el cual se trabaja corresponde a un intervalo donde el cambio de la potencia es negativo. Además, debido al rango de valores del voltaje en el cual se trabaja, las oscilaciones del control se reducen a la mitad. Los valores identificados del diseño del nodo sensor autónomo y utilizados en la simulación del control propuesto, se presentan en la tabla 1. Con la anterior propuesta se reducen los costos de la implementación del nodo sensor autónomo ya que no se requiere implementar sensores de corriente, lo cual también reduce el consumo de energía del nodo, y por consiguiente aumenta su tiempo de vida.

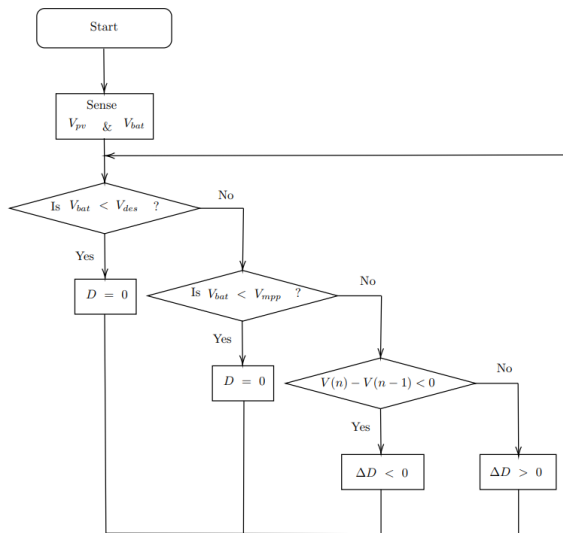


Fig. 2. Diagrama de flujo de control MPPT con técnica propuesta. Fuente: elaboración propia

Tabla 1: Características del panel fotovoltaico y control implementado en el nodo sensor autónomo

Símbolo	Cantidad	Valor
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto	10.23V
I_{sc}	Corriente de cortocircuito	0.43A
V_{bc}	Voltaje de conexión de baterías	6.5V
V_{bd}	Voltaje de desconexión de baterías	8.0V
G_{max}	Irradiancia máxima	1010 W/m ²
G_{min}	Irradiancia mínima	800 W/m ²
D_{max}	Ciclo de trabajo máximo	100%
D_{min}	Ciclo de trabajo mínimo	900%

3.1 Simulación del panel solar y el control MPPT

Con el objeto de identificar la eficiencia de las técnicas P&O y la propuesta, se realiza simulación con el programa Simulink/Matlab del panel fotovoltaico, el convertidor reductor y el control MPPT. En los anexos A2 y A3 se puede encontrar en más detalle los bloques utilizados para llevar a cabo dichas simulaciones, los cuales se obtuvieron siguiendo metodologías propuestas previamente (Toh *et al.*, 2014). Los valores definidos para estos bloques se obtuvieron tanto para el panel solar como para el convertidor. En el primer caso, fue necesario conocer los valores de referencia del panel seleccionado y realizar medidas de voltaje y corriente, los cuales fueron utilizados en el modelo utilizado para la descripción del panel solar simulado, el cual corresponde a la conexión de celdas cuyo circuito equivalente se presenta en la figura 3.

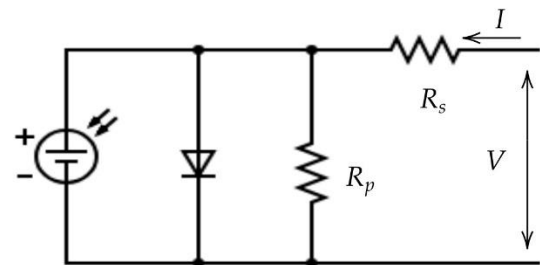


Fig. 3. Circuito equivalente de celda fotovoltaica del modelo trabajado para la descripción del panel solar. Fuente: elaboración propia

En el modelo de las celdas trabajado para la simulación del panel, la corriente entregada I , se determina mediante la ecuación 1, la cual corresponde a una ecuación de primer orden y no lineal. En esta, la corriente I depende de magnitudes como el voltaje V en el panel, la irradiancia G , la temperatura T , el coeficiente de temperatura μ_{sc} , el factor de idealidad A , el número de celdas N_s y las constantes de Boltzmann K y de los portadores de carga q . Otros valores requeridos en la simulación fueron, el voltaje de circuito abierto V_{oc} , la corriente de corto circuito I_{sc} , la irradiancia de referencia G_{ref} , la temperatura de referencia T_{ref} y la fotocorriente de referencia $I_{ph,ref}$, (Bellia *et al.*, 2014). En la simulación del panel, se realiza un barrido de los posibles valores de voltaje a los cuales puede estar el panel y se obtienen los correspondientes valores de corriente. Posteriormente con estos datos se grafican las curvas características del panel, PV e IV, las cuales se presentan en el anexo A1.

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1)$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (T_{ph,ref} + \mu_{sc} + \Delta T) \quad (2)$$

$$I_d = I_0 e^{\frac{q(V+R_s)}{nKT N_s}} \quad (3)$$

Para implementar el anterior modelo con el programa Simulink/Matlab, se realizaron medidas de voltaje de circuito abierto y corriente de corto circuito con el panel solar físico. También se midió el voltaje y la corriente entregada por este, utilizando un conjunto de resistencias de potencia, cuyos valores estuvieron entre 30Ω y 100Ω . Posteriormente se utilizó el método de Newton Raphson, para calcular los valores de las resistencias en serie R_s y paralelo R_p de las celdas, utilizando las medidas de voltaje y corriente realizadas (Bellia *et al.*, 2014). Estas dos resistencias, representan las pérdidas de potencia de cada celda debido a corrientes de fuga y los contactos óhmicos de los materiales, respectivamente (Penella-López *et al.*, 2017).

En el segundo caso, se obtuvieron los valores del capacitor de entrada $10\mu F$, de salida $136\mu F$, y del inductor $464\mu H$ del convertidor, mediante las ecuaciones 4, 5 y 6 del convertidor reductor (Rashid, 2017) y utilizando el concepto de resistencia de máxima potencia (Ayop *et al.*, 2018). En estas ecuaciones D es la señal de control y su cambio corresponde a la perturbación presentada en los diagramas de flujo de las dos técnicas MPPT, con las cuales se desarrolla la simulación propuesta.

$$L = \frac{R}{2f} (1 - D) \quad (5)$$

$$C = (1 - D) / \left(\frac{8Lf\Delta V_0}{V_0} \right) \quad (6)$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (7)$$

En el convertidor simulado, se utiliza una señal de ciclo de trabajo variable, según cambios de irradiancia medidos con el piranómetro SEAWARD, durante una semana. Esta señal se presenta en la figura 4. Los controles MPPT también fueron implementados mediante diagramas de bloques, siguiendo los algoritmos propuestos en las figuras 1 y 2. En la simulación, ambos controles realizan un rastreo del punto de la máxima potencia, con la diferencia de que la técnica propuesta utiliza parámetros de diseño del nodo sensor para realizar la asignación del cambio en el ciclo de trabajo del convertidor, en lugar de implementar sensores de corriente. A la salida del convertidor se conecta una resistencia que varía entre 30Ω y 80Ω , valores que corresponden a la

resistencia equivalente del sistema nodo y dispositivo de almacenamiento de energía, que en nuestro trabajo correspondió a un par de baterías recargables de LI-ion. Con la simulación se obtuvieron las curvas de la potencia de salida y la eficiencia del diseño propuesto, utilizando ambos controles simulados. Con estas curvas se realiza posteriormente una comparación que permite concluir sobre la metodología propuesta para implementar un control MPPT en nodos sensores autónomos, alimentados con energía solar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El perfil de irradiancia utilizado en la simulación se presenta en la figura 4. En esta figura se puede observar cómo durante un día la energía entregada por el sol presenta un pico en la mitad del día y valores menores al final de la mañana y final de la tarde. Este perfil de irradiancia fue realizado en exteriores y condiciones de no nubosidad.

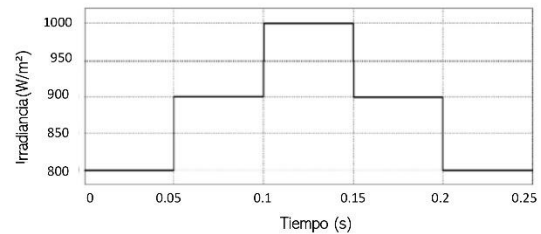


Fig. 4. Perfil de irradiancia obtenido con las medidas realizadas con el piranómetro. Fuente: elaboración propia

Con la simulación se obtuvieron las curvas características del panel fotovoltaico simulado, las cuales se presentan en el anexo A1. En la figura 5 se presenta las curvas PV del panel para irradiancias de $800W/m^2$ en azul y los $1000W/m^2$ en naranja. Estas curvas también se obtuvieron para irradiancias de $900W/m^2$, $700W/m^2$ y $400W/m^2$, con lo cual se identificó que para valores menores de $800W/m^2$, el panel no entrega la potencia requerida para el funcionamiento del nodo sensor. Con estas curvas también se obtuvo el valor promedio del voltaje de máxima potencia del panel de 7.8V. En la figura 5 las zonas limitadas por las franjas café, blanco y amarillo indica el rango de valores para los cuales el panel se desconecta, se conecta y se vuelve a desconectar del nodo, respectivamente. Esto se debe a los valores de diseño del nodo sensor autónomo, requeridos para garantizar un tiempo de funcionamiento mayor a los 5 años. Este rango de valores en los cuales debe operar el control MPPT, limita las oscilaciones que se puedan presentar alrededor del punto de máxima potencia y da cuenta de la necesidad de proponer nuevas técnicas de control en las cuales se tengan en cuenta los parámetros de diseño de dispositivos

con bajos consumos de potencia, como lo son los nodos sensores autónomos.

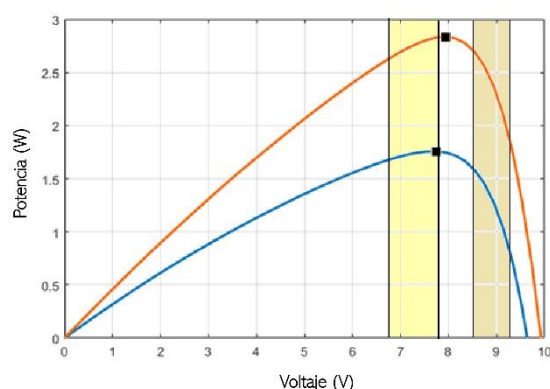


Fig. 5. Curvas características del panel solar para irradiancias de 800W/m² en azul y 1000W/m² en naranja. Fuente: elaboración propia

Posteriormente se obtuvieron las gráficas de potencia y eficiencia, para cada una de las simulaciones. Estas curvas se presentan en las figuras 6 y 7. En la figura 6 se identifica que potencia entregada por el convertidor es mayor para el control MPPT implementado con la técnica propuesta que con la técnica P&O. En consecuencia, la figura 7 muestra que la eficiencia alcanzada con la técnica propuesta es mayor en comparación con la eficiencia obtenida con la técnica P&O convencional. Lo anterior demuestra que además de haberse alcanzado una mayor eficiencia con un control MPPT en el caso particular de aplicaciones de nodos sensores autónomos, la implementación de la técnica propuesta corresponde a una implementación de menor costo.

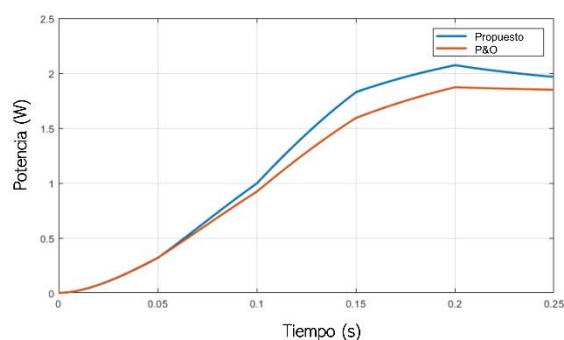


Fig. 6. Potencia a la salida del convertidor reductor con la técnica P&O y la técnica propuesta. Fuente: elaboración propia

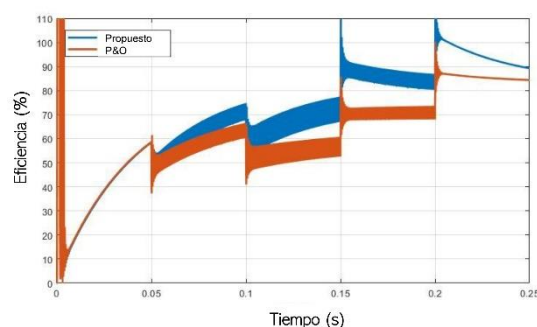


Fig. 7. Eficiencia a la salida del convertidor reductor con la técnica P&O y la técnica propuesta. Fuente: elaboración propia

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una nueva técnica para implementar el control MPPT que permite mejorar la eficiencia del nodo sensor alimentado con un panel solar. La implementación de esta nueva técnica disminuye los costos de la implementación del nodo sensor autónomo, así como también generar un impacto de mayor tiempo de vida en este. Con la metodología propuesta, se verificó que la eficiencia alcanzada con la técnica propuesta es mayor que la obtenida con una técnica P&O, en aplicaciones de nodos sensores autónomos. Esta propuesta se realizó con el objeto de atender a las problemáticas encontradas en el funcionamiento de los controladores MPPT, previamente mencionados y como una consecuencia de los requerimientos de asignación de modificación del ciclo de trabajo en el convertidor del nodo sensor. Cabe anotar que, el contexto en el cual la presentada técnica tiene validez corresponde a dispositivos con bajo consumo de corriente y alimentados con un panel solar, los cuales cuentan con un convertidor reductor cuyo voltaje de conexión sea mayor al voltaje del punto de la máxima potencia. Otras aplicaciones diferentes a los nodos sensores autónomos pueden estudiarse con el objeto de trabajar metodología propuesta en el presente artículo, incluso cuando la fuente de energía no sea un panel solar, aunque si se requiere que se pueda implementar un control MPPT.

En el presente artículo se presentaron como resultados de la simulación las curvas características del panel solar, el perfil de irradiancia determinado para la simulación y las curvas de potencia y eficiencia a la salida del convertidor. El presente trabajo puede continuarse considerando condiciones de nubosidad. Los aportes que se hacen además de solucionar un problema expreso en el campo de trabajo en el cual se enmarca la presente investigación también cobijan el desarrollo de nodos sensores con bajos costos, lo cual es un tema que también se trabajará en futuros trabajos.

REFERENCIAS

- Abella, C. S., Bonina, S., Cucuccio, A., D'Angelo, S., Giustolisi, G., Grasso, A. D., ... & Pennisi, S. (2019). "Autonomous energy-efficient wireless sensor network platform for home/office automation". *IEEE Sensors Journal*, **Vol. 19**, No. 9.
- Adu-Manu, K. S., Adam, N., Tapparello, C., Ayatollahi, H., & Heinzelman, W. (2018). "Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks (EH-WSNs) A Review". *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, **Vol. 14**, No. 1.
- Ahmed, J., & Salam, Z. (2015). "An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency". *Applied Energy*, **Vol. 150**.
- Alik, R., & Jusoh, A. (2018). "An enhanced P&O checking algorithm MPPT for high tracking efficiency of partially shaded PV module". *Solar Energy*, **Vol. 163**.
- Ayop, R., & Tan, C. W. (2018). "Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications". *Solar Energy*, **Vol. 160**.
- Bellia, H., Youcef, R., & Fatima, M. (2014). "A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB". *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, **Vol. 3**, No. 1.
- Bendib, B., Belmili, H., & Krim, F. (2015). "A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **Vol. 45**.
- Frezzetti, A., Manfredi, S., & Pagano, M. (2015). "A design approach of the solar harvesting control system for wireless sensor node". *Control Engineering Practice*, **Vol. 44**.
- Garcia-Lesta, D., Cabello, D., Ferro, E., Lopez, P., & Brea, V. M. (2017). "Wireless sensor network with perpetual motes for terrestrial snail activity monitoring". *IEEE Sensors Journal*, **Vol. 17**, No. 9.
- Karami, N., Moubayed, N., & Outbib, R. (2017). "General review and classification of different MPPT Techniques". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **Vol. 68**.
- Khaligh, A., & Onar, O. C. (2017). *Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems*. CRC press, Primera edición, Boca Raton.
- Li, Q., Zhao, S., Wang, M., Zou, Z., Wang, B., & Chen, Q. (2017). "An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm based on a PV module four-parameter model for higher efficiency". *Applied Energy*, **Vol. 195**.
- Macaulay, J., & Zhou, Z. (2018). "A fuzzy logical-based variable step size P&O MPPT algorithm for photovoltaic system". *Energies*, **Vol. 1**, No. 6.
- Mamarelis, E., Petrone, G., & Spagnuolo, G. (2014). "A two-steps algorithm improving the P&O steady state MPPT efficiency". *Applied Energy*, **Vol. 113**.
- Mousa, H. H., Youssef, A. R., & Mohamed, E. E. (2019). "Variable step size P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of multi-phase PMSG based wind generation system". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **Vol. 108**.
- Penella-López, M. T. y Gasulla-Forner, M., "Powering autonomous sensors: an integral approach with focus on solar and RF energy harvesting", Springer Science & Business Media, 2011.
- Penella, M. T., Albasa, J., & Gasulla, M. (2009, May). Powering wireless sensor nodes: Primary batteries versus energy harvesting. En 2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference.
- Rashid, M. H. (Ed.). (2017). *Power electronics handbook*. Butterworth-Heinemann.
- Toh, W. Y., Tan, Y. K., Koh, W. S., & Siek, L. (2014). "Autonomous wearable sensor nodes with flexible energy harvesting". *IEEE sensors journal*, **Vol. 14**, No. 7.
- Sharma, H., Haque, A., & Jaffery, Z. A. (2018). "Modeling and optimisation of a solar energy harvesting system for wireless sensor network nodes". *Journal of Sensor and Actuator Networks*, **Vol. 7**, No. 3.
- Wang, C. H., Huang, Y. K., Zheng, X. Y., Lin, T. S., Chuang, C. L., & Jiang, J. A. (2012, December). "A self sustainable air quality monitoring system using WSN". En 2012 Fifth IEEE International Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA).

ANEXOS

A continuación, se presentan las figuras que corresponden a las curvas características del panel solar, es decir, las curvas PV e IV, los diagramas de bloques implementados para la simulación del panel solar y el nodo sensor autónomo. Estas simulaciones se desarrollaron con el programa Simulink/Matlab. Para más detalles ir a la sección de materiales y metodología.

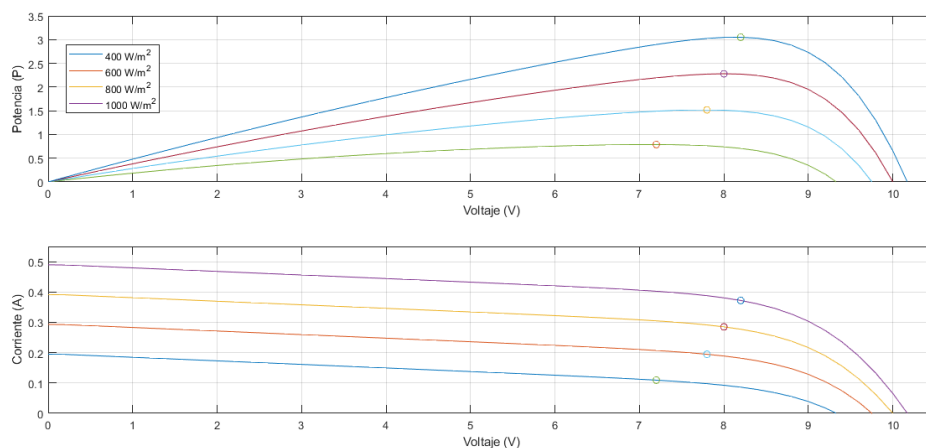


Fig. A1. Curvas características del panel solar simulado

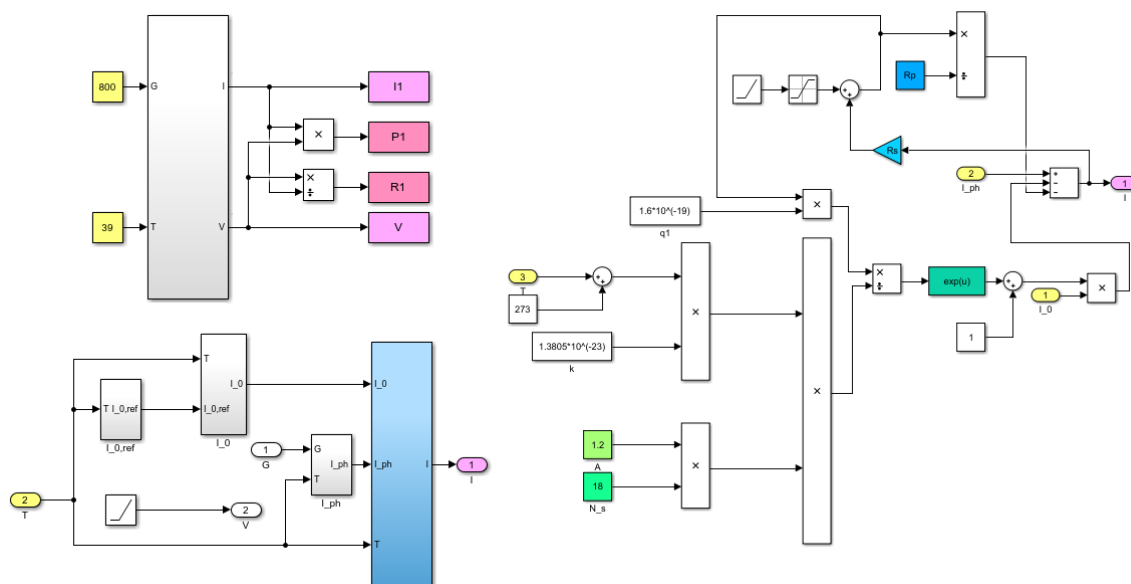


Fig. A2. Diagrama de bloques de la simulación del panel solar

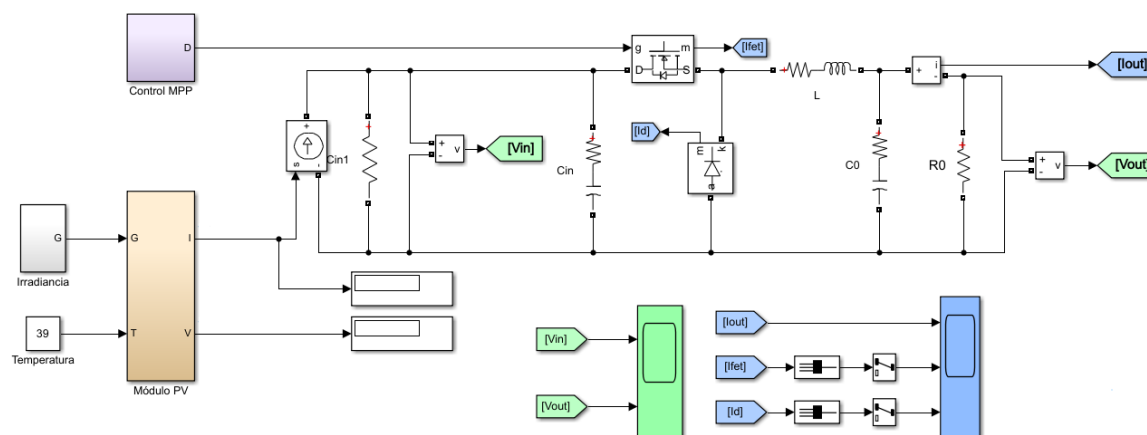


Fig. A3. Diagrama de bloques que componen la simulación del nodo sensor autónomo