



Evaluación de un prototipo de seguimiento solar fotovoltaico en regiones tropicales

Evaluation of a solar PV tracking prototype on tropic regions

Cristian Manuel Agudelo Restrepo¹ Oscar Daniel Díaz Castillo² Yimy Edison García Vera³

Para citar este artículo: Agudelo, C., Díaz O. y García, Y. (2016). Evaluación de un prototipo de seguimiento solar fotovoltaico en regiones tropicales. *Revista Redes de Ingeniería*. 7(1), 105-111. Doi: 10.14483/udistrital.jour.redes.2016.1.a10

Recibido: 9-febrero-2016 / **Aprobado:** 24-junio-2016

Resumen

El cambio climático es actualmente una gran preocupación para la sociedad humana, en particular debido a nuestra alta dependencia a los combustibles fósiles. Una cantidad considerable de esfuerzo investigativo se centra en los sistemas solares fotovoltaicos (PV). En dichos sistemas, la eficiencia en la conversión de energía es un tema de investigación activa y múltiples enfoques se están desarrollando para resolver este problema. Uno de estos enfoques son los sistemas de seguimiento solar, donde los paneles se mueven con respecto al sol con el fin de captar la máxima radiación solar directa. En este trabajo se propone un sistema de seguimiento solar fotovoltaico de un eje empleando como mecanismo de acción un servomotor y luego se realiza la comparación de su eficiencia energética con respecto a una instalación fotovoltaica fija. El sistema fue probado en la ciudad de Fusagasugá, Colombia, que se encuentra en una región tropical.

Palabras clave: energía solar fotovoltaica, energías renovables, región tropical, seguidor de un eje, seguidor solar.

Abstract

Nowadays climate change is a big concern for human society, due to our high dependence on fossil fuels. A great amount of research effort is focused in solar photovoltaic (PV) systems, particularly on the improvement of the conversion efficiency. One technique commonly used is the tracking systems, where the solar PV moves with the sun in order to capture the maximum direct solar radiation. This paper presents a solar PV single-axis tracking system prototype, and a comparison regarding its energy conversion efficiency with a fixed solar PV installation. The system was tested in Fusagasugá, Colombia, which is located in the tropics region.

Keywords: renewable energy, single-axis tracker, solar pv, solar tracker, tropic region.

1. Universidad de Cundinamarca; estudiante de Ingeniería electrónica, Universidad de Cundinamarca; investigador del semillero Kinestasis. Correo electrónico: cmagudelo@mail.unicundi.edu.co
2. Universidad de Cundinamarca, Ingeniería Electrónica; Universidad Nacional de Colombia; Sistemas Electrónicos Avanzados, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea; docente tiempo completo Universidad de Cundinamarca. Correo electrónico: odanieldiaz@mail.unicundi.edu.co ; odiaz@ieeee.org
3. Universidad de Cundinamarca, Ingeniería Eléctrica; Universidad Nacional De Colombia; master en energías renovables, Universidad San Pablo CEU; docente tiempo completo, Universidad de Cundinamarca. Correo electrónico: ygarcia@mail.unicundi.edu.co; ygarcia3@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Los sistemas fotovoltaicos (PV) se utilizan para convertir la luz solar en electricidad, son seguros, fiables y pueden sustituir la energía de fuentes no renovables que contaminan el medio ambiente. Lo ideal es que los módulos fotovoltaicos estén diseñados para ofrecer la mayor cantidad de energía a un costo mínimo; sin embargo, para obtener una salida de potencia alta, el generador fotovoltaico necesita capturar la máxima cantidad posible de radiación, por tanto, este sistema debe estar apuntando hacia el punto de mayor radiación solar. El rendimiento de los sistemas fotovoltaicos se ve afectado por el ángulo de orientación e inclinación, en tanto que estos parámetros determinan la cantidad de radiación solar recibida por la superficie de un módulo fotovoltaico en una región particular.

Los seguidores solares son sistemas automatizados diseñados para que sigan las trayectorias solares con el fin de aumentar la potencia de salida del generador. Dichos sistemas de seguimiento se pueden utilizar para varias aplicaciones, tales como celdas solares, sistemas de iluminación día solar y arreglos solares térmicos [1, 2].

Existe diversidad de trabajos relacionados con los sistemas de seguimiento solar en todo el mundo. Un documento interesante es el de Alexandru [2] el cual propuso un diseño y una simulación de un sistema de seguimiento en un eje para módulos fotovoltaicos. En el estudio de este prototipo virtual de seguimiento se integra el dispositivo mecánico y el sistema de control, en un concepto mecatrónico. Deepthi *et al* [3] propuso la comparación del sistema de seguimiento solar en un solo eje y de doble eje con un sistema solar fijo. En este trabajo, el sistema de seguimiento solar de doble eje obtuvo un mejor rendimiento que los sistemas de seguimiento solar de un solo eje durante los días nublados, pero estos eran más costosos. Otros autores como Mejía *et al* [4] presentan un algoritmo de

optimización para el seguimiento solar que mejoró la eficiencia del panel hasta en un 35%. Ghazali *et al* [5] estudió la eficiencia de tres módulos solares de silicio: poli-cristalino, mono-cristalino y silicio amorfo, se probó mediante la aplicación de un sistema de seguimiento solar de un solo eje bajo el clima húmedo tropical de Malasia. Huang *et al* [6] propuso un sistema de energía solar fotovoltaico que mejora la eficiencia mediante el uso de un eje único de seguimiento de tres posiciones. Este sistema obtuvo un aumento del 37% de la generación total de energía en comparación con la instalación fotovoltaica fija. Por otro lado, Stamatescu *et al* [7] presentó un algoritmo de seguimiento solar para el control del movimiento de los paneles fotovoltaicos; este algoritmo fue implementado y la plataforma experimental utilizó una estrategia de control triple posicional.

Tudorache *et al* [8] presentó un sistema de seguimiento solar fotovoltaico utilizando un motor de corriente continua controlado por una unidad de accionamiento inteligente que recibe las señales de entrada de los sensores de intensidad de luz. Los datos registrados demostraron que el panel de seguimiento solar producía alrededor de un 57,55% más de energía que el sistema de instalación fijo.

Los sistemas de seguimiento solar generan una mayor eficiencia en comparación con los sistemas de panel fijo, los cuales no tienen ningún tipo de movimiento para seguir las trayectorias solares.

Con respecto a los sistemas de seguimiento solar, hay dos clasificaciones principales de acuerdo a los ejes de rotación:

- *Eje de rotación único*: utiliza únicamente un grado de libertad, con lo cual el panel se mueve en una sola dirección. Estos sistemas utilizan una configuración mecánica simple con un solo motor. También, se utiliza un sencillo mecanismo de control para conducir el sistema de seguimiento; sin embargo, el seguimiento

del sol no se puede hacer con precisión en las regiones donde existen cambios estacionales. Estos sistemas son comúnmente utilizados en condiciones climáticas tropicales, donde el movimiento del sol se puede simplificar a una dimensión.

- *Eje de rotación dual:* usa dos grados de libertad con el fin de realizar el seguimiento de las trayectorias solares con mayor exactitud en el transcurso del día. La eficiencia de este sistema es mejor en comparación con el sistema de seguimiento en un solo eje; sin embargo, tales sistemas necesitan una configuración mecánica compleja con dos motores y requieren un sistema de control de dos dimensiones complejas.

En comparación con la configuración de un solo eje, los sistemas de doble eje tienen la gran desventaja de que son más costosos. Esta configuración de doble eje se adapta mejor en países con cambios estacionales, donde los movimientos del sol son más complejos. Una visión sobre las configuraciones de un solo eje y de doble eje se muestra en la figura 1.

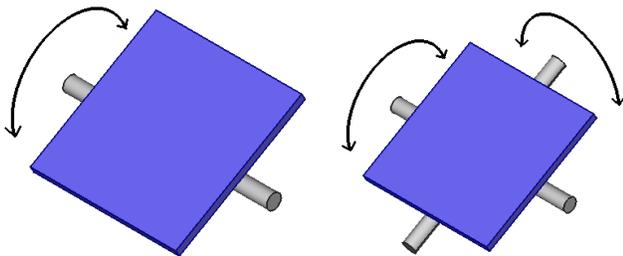


Figura 1. Configuraciones de un eje (izquierda) y de doble eje (derecha).

El prototipo diseñado se implementó con una configuración de un solo eje, probando el sistema en la ciudad de Fusagasugá, ubicada a una latitud de $4^{\circ}20'14''$ norte y a una longitud de $74^{\circ}21'52''$ oeste. Esta región tiene un clima de tipo tropical seco y, por lo tanto, posee condiciones climáticas favorables para la energía solar. La radiación media medida en la región es $4,82 \text{ kWh/m}^2$ por día [9,10], proporcionando una cantidad considerable de radiación solar.

MÉTODOS

El prototipo propuesto consta de dos partes. La primera parte es un sistema mecánico con un eje metálico, el cual permite la rotación del panel fotovoltaico, este va unido a un servomotor el cual se soporta sobre una estructura realizada en madera de balsa y MDF. Esta estructura es de 56 cm de largo, 24 cm de ancho y 26 cm de alto. El panel fotovoltaico tiene una superficie de 572 cm^2 y puede moverse en ángulos de -80° a $+80^{\circ}$ con respecto al eje vertical. El circuito de medición de potencia junto con el sistema de adquisición de datos (DAQ) se une a la estructura. El DAQ proporciona datos de medición a un PC con una aplicación desarrollada en LabVIEW para almacenar los datos y luego exportarlos a una hoja de cálculo para su posterior análisis. Un diagrama de bloques del prototipo se muestra en la figura 2.

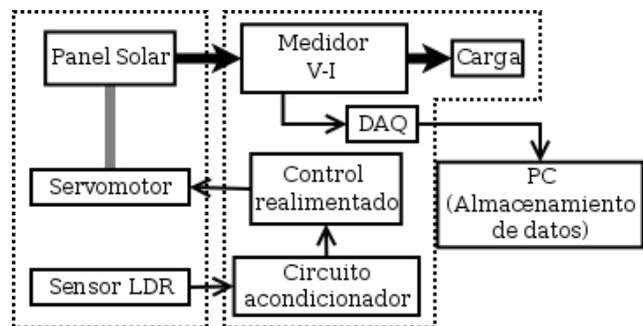


Figura 2. Diagrama de bloques del prototipo de seguimiento.

La estructura de base junto con el eje, el panel solar y el servomotor se muestra en las figuras 3 y 4. Además, una secuencia detallada del proceso de construcción del prototipo se muestra en la figura 5.

Los paneles fotovoltaicos que se utilizaron para el experimento fueron fabricados por la empresa INTI, sus características técnicas se resumen en la tabla 1. Se usaron dos paneles idénticos para el montaje experimental: uno de ellos se instaló en el sistema de seguimiento de un solo eje y el otro se

creó en una estructura de ángulo fijo configurable, también realizada en madera.

La segunda parte del seguidor solar fotovoltaico es el censado de la luz, para lo cual se realizó un arreglo a partir de fotorresistencias (LDR), con la cual se detectaba el punto de máxima iluminación solar en un eje. Este sensor se compone de una serie de cinco LDR en una estructura de arco de madera, como se muestra en la figura 6. Esta estructura es de 40 cm de largo, 20 cm de ancho y 27 cm de altura.

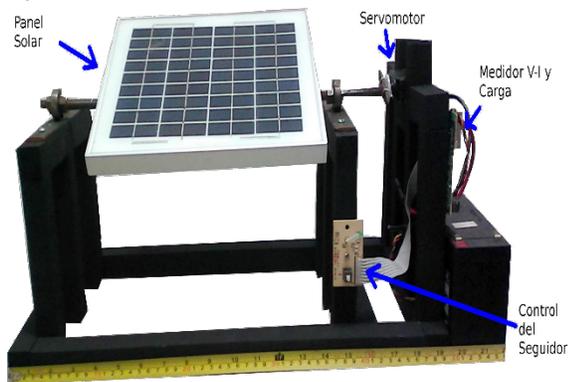


Figura 3. Detalles del sistema de seguimiento (vista frontal).

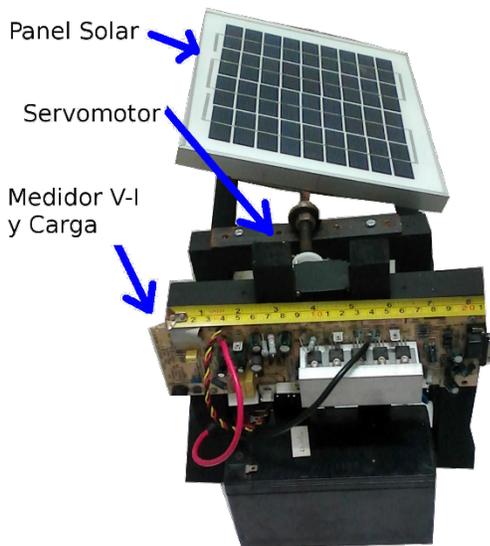


Figura 4. Detalles del sistema de seguimiento (vista lateral).



Figura 5. Detalles del proceso de construcción.

Tabla 1. Características del panel solar empleado.

Fabricante	INTI
Modelo	IPS 5
Tipo de celda	Poli-cristalino
Potencia máxima	5 W \pm 3%
Voltaje en máxima potencia	18.36 V
Corriente máxima	0.27A
Voltaje en circuito abierto	22 V
Corriente en corto circuito	0.29 A
Eficiencia de la celda	15.72 %
Dimensiones	260 mm x 220 mm x 18 mm
Temperatura de operación	-40 °C a 85 °C

Un circuito acondicionador convierte las señales del sensor en ángulos de seguimiento. Antes de tomar las mediciones, el sistema fue calibrado para devolver el ángulo de máxima radiación. Otras configuraciones con dos sensores se han utilizado en estudios previos [11], pero estos son más simples y menos precisos.

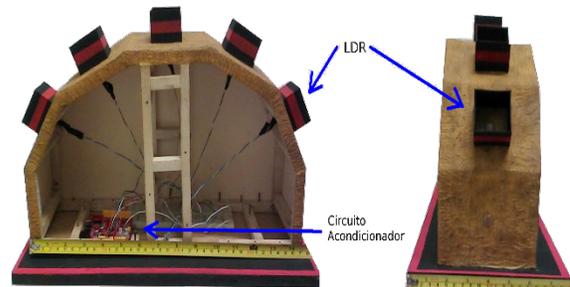


Figura 6. Detalles del arreglo de sensores LDR.

Se utilizó un sistema de control de realimentación sencilla para accionar el servomotor y este sistema

de control se ha configurado para establecer el vector normal del panel solar PV en el mismo ángulo de máximo brillo solar.

METODOLOGÍA

Con el fin de comparar el rendimiento de un sistema de seguimiento de un solo eje con respecto a una configuración de montaje fijo, se utilizaron dos paneles fotovoltaicos idénticos y se instalan en las siguientes maneras: un panel se montó con un ángulo de inclinación fijo de 15 grados hacia el este; y el segundo panel se montó en el sistema de seguimiento solar. Ambos paneles fotovoltaicos fueron alineados convenientemente, repasando la dirección este-oeste.

El dispositivo DAQ fue programado para efectuar mediciones en intervalos de diez minutos, con las muestras de corriente y tensión tomadas de ambos paneles fotovoltaicos. El voltaje medido es VOC en circuito abierto, que se mide cuando la celda solar no tiene carga. La corriente medida de cortocircuito ISC, se mide cuando la celda solar tiene una carga baja resistencia. Tanto el VOC como el ISC se pueden utilizar para calcular la potencia teórica PT de la celda, mediante el cálculo de $PT = VOC \cdot ISC$.

Las medidas se tomaron desde las 8:00 hasta las 18:00. Además, dado que la mayor diferencia en términos de poder se produce después de las 12:00, este rango de tiempo especial de 12:00 a 17:00 se considera para el análisis detallado. El sistema propuesto se puso a prueba en condiciones climáticas similares: Días soleados con pocas nubes. Este era el clima predominante durante el período en que los experimentos se llevaron a cabo.

RESULTADOS

Los primeros resultados se muestran en la figura 7; esta es la comparación de la potencia medida PT, tanto para la configuración fija como para el sistema implementado. Además, una comparación resumida se muestra en la tabla 2.

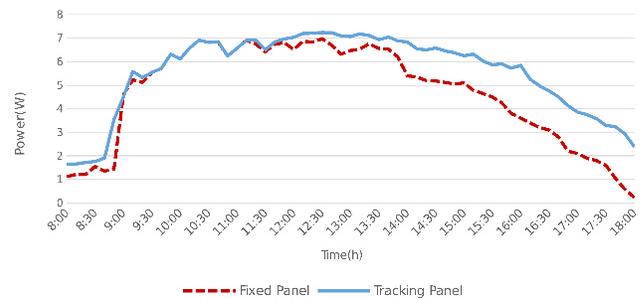


Figura 7. Comparación de potencia (PT).

Tabla 2. Comparación de los valores medidos

Variable	Panel fijo	Panel con seguidor
Voc	19.8 V	20.4 V
Isc	225.1 mA	272.1 mA
PT	4.5 W	5.6 W
Ganancia de potencia	---	24.5 %

La cifra de comparación de potencia también muestra que no hay diferencia significativa entre las configuraciones durante el periodo de la mañana (antes de las 12:00); sin embargo, después del mediodía la comparación de energía presenta diferencias más grandes. Lo anterior puede explicarse por el ángulo de inclinación del panel fijo; este tenía un ángulo de inclinación que favoreció la producción de energía en la mañana (más cerca al este), pero presentaba desventaja en la tarde.

Una comparación de voltaje VOC se muestra en la figura 8. Lo anterior demuestra que ambas configuraciones presentan una tensión relativamente constante (alrededor de 20 V) durante condiciones de luz diurna. Esto se puede explicar con la física fotovoltaica y el efecto fotoeléctrico; en el cual, la salida de tensión depende de la energía del fotón o frecuencia.

Una comparación de la ISC se muestra en la figura 9. Puesto que el VOC es casi constante, la curva de corriente es bastante similar a la figura 7, la cual muestra la curva de potencia.

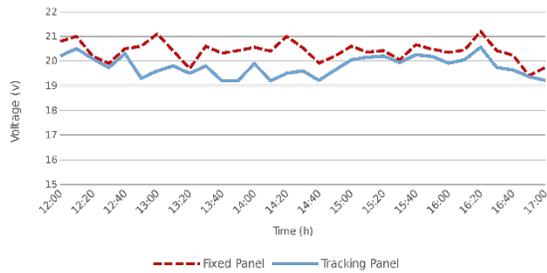


Figura 8. Comparación de voltaje (VOC).

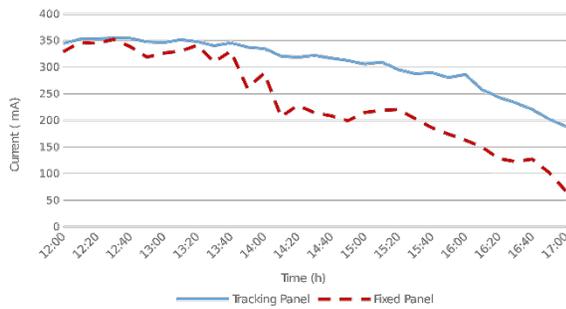


Figura 9. Comparación de corriente (ISC).

DISCUSIÓN

El prototipo implementado cuenta con un sistema de seguimiento solar accionado por un servomotor el cual brindó las condiciones óptimas de fuerza y velocidad requeridas para el funcionamiento del mismo, este servomotor fue controlado a partir de la variable de iluminación haciendo uso de sensores foto resistivos.

Para el presente artículo no se tuvo en cuenta el autoconsumo del sistema pero se considera que al escalar el proyecto, el consumo del mismo será muy pequeño en comparación con la ganancia obtenida implementando este tipo de seguimiento, esto se logra realizando un acople correcto de engranajes para aumentar la fuerza del motor, considerando que la velocidad de seguimiento es muy pequeña. Otro factor que no se tuvo en cuenta fue las pérdidas por calentamiento en la celda, para lo cual se ha pensado en emplear paneles híbridos (Fotovoltaico-Colector), con los cuales se aprovecharía los calentamientos del sistema.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el diseño de un prototipo de energía solar fotovoltaica de seguimiento en un solo eje y se presentaron sus resultados experimentales. Los resultados mostraron una mejora importante en la conversión de energía: alrededor del 25% más de potencia con respecto a una configuración de panel fijo. Cabe mencionar que otros autores en estudios previos han obtenido ganancias mayores empleando otros tipos de tecnologías (mono-cristalino y el silicio amorfo) que los usados en este estudio.

El montaje experimental mide los voltajes y las corrientes durante las pruebas y la potencia se calculó a partir de estos resultados. La tensión en el PV solar es aproximadamente constante en condiciones de luz diurna, esto es consistente con la física PV. Por lo tanto, la medición de corriente es suficiente para obtener la eficiencia de conversión de energía de las celdas empleadas. Mejoras de precisión en el sensor de corriente se puede hacer para obtener datos más precisos.

Esta configuración de seguimiento en un solo eje se puede utilizar en paneles fotovoltaicos a mayor escala, para regiones tropicales como Fusagasugá y, en general, para la mayoría de las ciudades y regiones colombianas. El trabajo futuro incluirá el uso de diferentes tecnologías fotovoltaicas, como por ejemplo el uso de paneles de mono-cristalino y de paneles de silicio amorfo; además, se desea implementar un MPPT para realizar la comparación del método de seguimiento empleado en el proyecto actual. Dado que el uso del seguidor en un solo eje ha dado buenos resultados para regiones tropicales hasta el momento, no existe un plan para compararlo con un seguidor de doble eje en un futuro previsible, pero si se tiene planeado tener en cuenta los autoconsumos y las pérdidas por temperatura.

REFERENCIAS

- [1] Ahmad, S., Shafie, S. and Kadir, M.Z.A.A., *Power feasibility of a low power consumption solar*

- tracker. Procedia Environmental Sciences*, 17, pp. 494-502, 2013. The 3rd International Conference on Sustainable Future for Human Security, 2012, 3-5 November 2012, Clock Tower Centennial Hall, Kyoto University, Japan.
- [2] Alexandru, C., Design and optimization of a monoaxial tracking system for photovoltaic modules. *Journal of Solar Energy*, p. 6, 2013. doi:10.1155/2013/586302.
- [3] Deepthi, S., Ponni, A., Ranjitha, R. and Dhana-bal, R., *Comparison of efficiencies of single-axis tracking system and dual-axis tracking system with fixed mount. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 2, pp. 425-430, 2013.
- [4] Mejía, A.E., Londoño, M.H. and Osorio, J.C., Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico. *Scientia et Technica*, 1(44), pp. 245-250, 2010.
- [5] Ghazali M, A. and Abdul Rahman, A.M., The performance of three different solar panels for solar electricity applying solar tracking device under the Malaysian climate condition. *Energy and Environment Research*, 2(1), p. 235, 2012.
- [6] Huang, B.J., Huang, Y.C., Chen, G.Y., Hsu, P.C. and Li, K., *Improving solar PV system efficiency using one-axis 3-position sun tracking. Energy Procedia*, 33, pp. 280-287, 2013. PV Asia Pacific Conference, 2012.
- [7] Stamatescu, L., Făgărașan, L., Stamatescu, G., Arghira, N. and Iliescu, S.S., *Design and implementation of a solar-tracking algorithm. Procedia Engineering*, 69, pp. 500-507, 2014. 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013.
- [8] Tudorache, T., Oancea, C.D. and Kreindler, L., Performance evaluation of a solar tracking PV panel. *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*, 74(1), pp. 3-10, 2012.
- [9] Nasa surface meteorology and solar energy. [En línea] <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- [10] Swera solar and wind energy resource assessment. [En línea] <http://maps.nrel.gov/swera/>
- [11] Tudorache, T. and Kreindler, L., Design of a solar tracker system for PV power plants. *Acta Polytechnica Hungarica*, 7(1), pp. 23-39, 2010.

