

Sistema para el monitoreo remoto y análisis estadístico de la información energética disponible para optimizar el uso de arreglos de paneles solares

A system to remotely monitor and statistically analyze the available energetic information to optimize the use of solar-panel arrays

SANDOVAL-GIO, Jesús†*, LUJAN-RAMIREZ, Carlos Alberto, SANDOVAL-CURMINA, Victor y CHAN-SOSA, Irving Agustín

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Mérida

ID 1^{er} Autor: *Jesús Sandoval-Gío* / ORC ID: 0000-0001-5847-3669, Researcher ID Thomson: V-1930-2018, arXiv ID: [jesus.sandoval](https://arxiv.org/abs/1801.03270) CVU CONACYT-ID: 297308.

ID 1^{er} Coautor: *Carlos Alberto Luján-Ramírez* / ORC ID: 0000-0002-8978-9188, Researcher ID Thomson: T-6838-2018, arXiv ID: [clujan](https://arxiv.org/abs/1801.03270), CVU CONACYT-ID: 296592.

ID 2^{do} Coautor: *Víctor Sandoval-Curmina* / ORC ID: 0000-0002-6511-7344, Researcher ID Thomson: T-3408-2018, arXiv ID: [victor.sandoval](https://arxiv.org/abs/1801.03270), CVU CONACYT-ID: 70654.

ID 3^{er} Coautor: *Irving Agustín Chan-Sosa* / ORC ID: 0000-0002-8459-295X, Researcher ID Thomson: V-1943-2018, CVU CONACYT-ID: 903270

Recibido: Enero 05, 2018; Aceptado: Marzo 05, 2018

Resumen

Uno de los aspectos más importantes a considerar para la toma de decisiones durante el proceso de diseño y control de un sistema fotovoltaico instalado es la disponibilidad de la información de la energía solar presente en el sitio de trabajo. Para ello se utilizan los piranómetros, que son aparatos para la medición de la radiación solar global que incide sobre cierto lugar en la superficie de la Tierra. El presente trabajo reporta el desarrollo de un sistema remoto electrónico para el monitoreo y análisis estadístico de la energía que el sol entrega sobre la península de Yucatán, México. Se propone un diseño de piranómetro basado en semiconductores que, conectado a un sistema con etapas de acondicionamiento de señal y adquisición de datos, envía la información de energía solar disponible a una computadora a través de un enlace inalámbrico. Se muestran los resultados de desempeño en las primeras pruebas de medición del sistema propuesto en comparación con uno comercial. La información obtenida será utilizada en el diseño y control de un sistema que optimiza la operación de un arreglo de paneles solares conectados a la red eléctrica.

Piranómetro de semiconductor, Irradiancia, Energía fotovoltaica

Abstract

One of the most important aspects to take a decision making throughout the design and control process for an installed photovoltaic system is the availability of the solar energy information on the working site. For this, pyranometers are used, which are devices for measuring the global solar radiation that affects a certain place on the Earth surface. This paper reports the development of an electronic system for the monitoring and statistical analysis of the energy that the sun delivers over the Yucatan peninsula, Mexico. It proposes a semiconductor-based pyranometer design, which connected to a system with stages of signal conditioning and data acquisition, sends the information of available solar energy to a computer through a wireless link. Performance results of the first measurement tests of the proposed system compared to a commercial system are shown. The information obtained will be used in the design and control to optimize the operation of an array of solar panels connected to the electrical grid.

Semiconductor pyranometer, Irradiance, Photovoltaic power

Citación: SANDOVAL-GIO, Jesús, LUJAN-RAMIREZ, Carlos Alberto, SANDOVAL-CURMINA, Victor y CHAN-SOSA, Irving Agustín. Sistema para el monitoreo remoto y análisis estadístico de la información energética disponible para optimizar el uso de arreglos de paneles solares. Revista de Tecnologías Computacionales. 2018. 2-5: 10-17.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: sandoval@itmerida.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En el año 2016 se aprobó un proyecto FOMIX para equipar el programa de la Maestría en Ingeniería del Instituto Tecnológico de Mérida con el objetivo de que ingrese al Programa Nacional de Posgrados de Conacyt. En el equipamiento financiado se adquirieron los elementos necesarios para incursionar en el estudio del aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica.

El crecimiento exponencial que está teniendo en la región la demanda del uso de este tipo de energía limpia ha propiciado el surgimiento de numerosas empresas dedicadas al diseño e instalación de estos sistemas [1-2]; por lo tanto, los requerimientos de personal calificado que ocupe puestos laborales en el área de energías solares fotovoltaicas han crecido de igual forma.

Para aprovechar al máximo la energía solar fotovoltaica que entrega un arreglo de paneles solares, es necesario contar con un sistema de monitoreo y control que opere sobre los paneles. El piranómetro es un elemento de vital importancia en cualquier sistema de monitoreo que busca aprovechar la energía solar fotovoltaica [3-5]. Este dispositivo realiza la medición de la radiación disponible en el lugar de ubicación del panel, por lo que esta información es de gran relevancia para analizar si la energía que se obtiene de los paneles es la mayor posible, debido a que diversos parámetros afectan esta captación. Ejemplos de estos parámetros son: orientación del panel, condiciones de sombreado parcial, temperatura de operación o fallas en el funcionamiento o interconexión de los microinversores a la red.

El presente proyecto tiene con objetivo principal el diseño y construcción de un sistema de monitoreo remoto de las principales variables que afectan la generación de energía por el arreglo; así como también los datos de la energía entregada a la red y la forma en que es aprovechada a lo largo de un período de tiempo considerado para el estudio.

Además, se realizará un análisis de toda la información generada por el sistema de monitoreo con la finalidad de conocer qué tanto y cómo se aprovecha la energía solar, esto considerando el punto de vista tanto eléctrico como económico.

Con este proyecto también se busca el desarrollo de competencias en el área de energía fotovoltaica en los estudiantes de las carreras de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y el programa de la Maestría en Ingeniería; así como un sistema que permita investigación orientada al diseño de estrategias para incrementar la eficiencia de estos sistemas.

El desarrollo de este sistema ampliará el conocimiento técnico-científico y formará criterios de índole económico en nuestros estudiantes y profesores para emplearlos en el diseño y optimización de proyectos de sistemas fotovoltaicos conectados a la red, promoviendo en el mediano y largo plazo un uso más extendido de estos en la región.

El artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se describe la importancia de la medición de la radiación solar disponible y la forma de acceder a esta información para dimensionar un sistema fotovoltaico. En la sección 3 se explica la forma cómo opera un piranómetro de semiconductor. En la sección 4 se presenta el diseño del prototipo con sus características. En la sección 5 se muestran los resultados obtenidos en las mediciones y, por último, en la sección 6 se presentan las conclusiones del trabajo.

Dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico

Según su funcionamiento con relación a una red eléctrica convencional existen dos tipos fundamentales de sistemas fotovoltaicos: los SF interconectados a la red eléctrica comercial (SFCR) y los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA). Los SFCR necesitan de la conexión a una red eléctrica para realizar su función generadora de electricidad. Al contrario de los anteriores, los SFA no necesitan de una conexión con una red eléctrica, y su funcionamiento es independiente o autónomo de dicha red [6-10].

Los SFA fueron anteriores en el tiempo a los SFCR, y, aunque si bien estos últimos están consiguiendo un crecimiento muy importante, sobre todo en los países que cuentan con un amplio desarrollo de redes eléctricas en todo su territorio, los SFA siguen siendo los más empleados en países con poco desarrollo industrial, en zonas rurales, lugares remotos y poco accesibles [7, 11-13].

La filosofía de dimensionado de un SFA es bastante diferente al de un SFCR [10]. En este último, el criterio que se suele emplear para el diseño y dimensionado es el de conseguir que a lo largo de un año el rendimiento del sistema sea lo más elevado posible o que la aportación energética anual del sistema sea máxima. Puesto que está conectado a la red eléctrica, los posibles fallos del sistema no son tan cruciales como en un SFA [6, 14]. Por el contrario, el criterio que se sigue en el dimensionado de un SFA no considera el producir la máxima energía, sino que aparece el concepto de fiabilidad. El dimensionado en este caso se hace atendiendo más a la fiabilidad del sistema, entendiendo por fiabilidad el asegurar el buen funcionamiento de este y procurando que los fallos en el sistema sean minimizados. En este caso, el sistema deberá diseñarse y dimensionarse de forma que la probabilidad de fallo sea lo más baja posible, dentro de unos márgenes establecidos.

Los pasos para el dimensionamiento energético del sistema de aprovechamiento de energía fotovoltaica son según [9]:

1. Identificación y relación de las cargas del sistema.
2. Relación de las tensiones y potencia nominales de operación de las cargas del sistema.
3. Reconocimiento de los tiempos de utilización de las cargas.
4. Determinar el recurso solar con que se cuenta en el sitio a partir de datos estadísticos de variables meteorológicas y geofísicas.

Se encuentra en la literatura información amplia que incluye el muy importante aspecto económico dentro del diseño y la evaluación del rendimiento en la operación de un sistema fotovoltaico conectado a la red. Ejemplos de ello son [15-17].

Los datos de recurso solar disponible pueden obtenerse de varias maneras. Una es considerar datos estadísticos como los que ofrecen la NASA o estaciones de medición nacionales en México, como por ejemplo las mediciones proporcionadas por la Comisión Nacional del Agua.

Sin embargo, estos datos no son tan precisos debido a que, aunque los métodos y dispositivos de medición son de alta calidad, los puntos de observación no corresponden a los sitios en donde se encuentra nuestra instalación fotovoltaica. Además, la rapidez de actualización de la información no es algo que se pueda controlar por el usuario. Otra forma de estimar el recurso solar es mediante la medición in situ usando un dispositivo de aplicación específica como es el caso del piranómetro.

Piranómetro de semiconductor

Un piranómetro es un dispositivo diseñado para la medición de la radiación solar que incide sobre una superficie en un campo de 180°. La medida se expresa como un flujo de potencia por unidad de área; en el sistema internacional de medida (SI) en Watts/metro cuadrado (W/m^2). Se considera toda la radiación incidente a la superficie, no solo la que llega perpendicular al sensor.

Un piranómetro puede contruirse de varias formas siendo dos las más comunes [18-20]:

1. **Térmico.** Se constituye por una pila termoeléctrica contenida en un alojamiento con dos hemisferas de cristal. La pila termoeléctrica está constituida por una serie de termopares colocados horizontalmente, cuyos extremos están soldados con unas barras de cobre verticales solidarias a una placa de latón maciza. El conjunto está pintado con un barniz negro, para absorber la radiación. El flujo de calor originado por la radiación se transmite a la termopila, generándose una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura entre los metales de los termopares.
2. **Semiconductor.** El principio de funcionamiento no es térmico como en el caso anterior; sino que tiene como fundamento el efecto fotoeléctrico. La radiación incide sobre un fotodiodo que es capaz de generar una diferencia de potencial y de ese modo, mediante la lectura de voltaje, conocer los datos de radiación. Dada esta naturaleza, en este tipo de piranómetros es posible adosar filtros de ciertas bandas del espectro solar, por medio de algún domo de algún material impregnado con el filtro deseado.

Tienen la ventaja de ser más sensibles a pequeñas y rápidas variaciones en la radiación debido a que no tienen la inercia térmica que sí poseen los térmicos.

La desventaja que presentan con respecto a los térmicos es que la curva de respuesta espectral no es tan amplia ni plana ya que el material semiconductor utilizado en su construcción, generalmente silicio, tiene una absorción no plana en un rango limitado de longitudes de onda. Además, los semiconductores son altamente sensibles a la temperatura por lo que su respuesta también es afectada por las variaciones de ella.

En el ámbito de aplicación en mediciones de sistemas fotovoltaicos, los piranómetros de semiconductor son mucho más ampliamente utilizados gracias a que su precio es significativamente más bajo que su contraparte térmica. Así, se toleran errores de medición en la parte más baja y alta del espectro por el bajo costo de los dispositivos.

El reto es diseñar piranómetros basados en semiconductores que puedan compensar de alguna manera estas deficiencias para mejorar las mediciones [18, 20].

Los piranómetros están estandarizados de acuerdo con la norma ISO 9060, que también es adoptada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Esta norma discrimina tres clases, donde la mejor es llamada "standard secundario", la siguiente es conocida como "primera clase" y la última es llamada "segunda clase". La calibración se realiza de acuerdo con la Referencia Radiométrica Mundial (WRR).

Diseño del sistema

El sistema de medición de la radiación incidente consta de varias etapas. Se fueron diseñando considerando las características requeridas por el medidor. En la Figura 1 se puede ver la interrelación de los subsistemas.

El fotodiodo seleccionado para la realización del sistema fue el SFH206K de Siemens semiconductor.

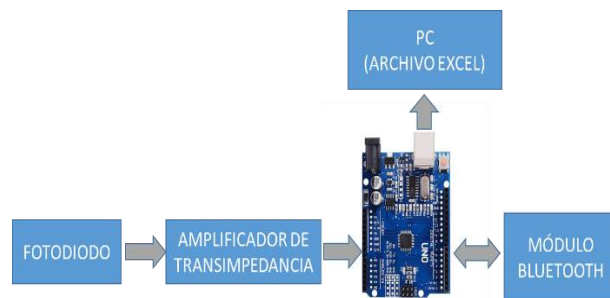


Figura 1 Diagrama a bloques del sistema

Fuente: *Elaboración propia*

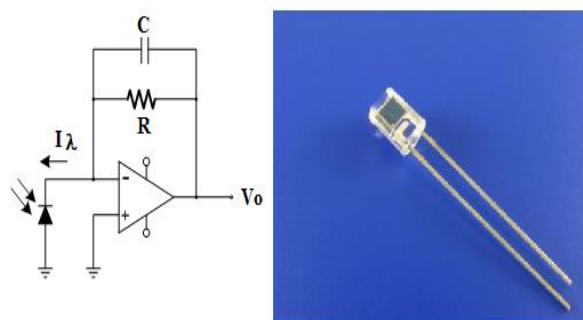


Figura 2 Fotodiodo SFH206K.

Fuente: *Siemens semiconductor group*

El fotodiodo PIN es uno del tipo donde el fabricante ha añadido una región intrínseca (I) para incrementar la sensibilidad y disminuir la capacitancia de la juntura con intención de hacer más rápida su respuesta.

En la Figura 2 se muestra el fotodiodo utilizado y el diagrama eléctrico de operación. La Tabla 1 muestra algunas características generales descritas por el fabricante en su hoja de datos para el fotodiodo seleccionado.

Un fotodiodo tiene varias regiones de operación con características muy específicas y, por lo tanto, diferentes formas de conexión para su aplicación. Podemos describir básicamente dos modos: el fotoconductor y el fotovoltaico.

En el modo fotoconductor, el fotodiodo se polariza inversamente mediante una fuente de alimentación externa de energía, comúnmente a tensión constante, para observar las variaciones de la fotocorriente según cambia la irradiancia que llega a la superficie fotosensible del dispositivo.

Parámetro	Valor	Unidad
Sensibilidad espectral	$S_{\lambda}=0.62$	A/W
Tensión a circuito abierto ($E_v=1000lx$)	$V_o=365$	mV
Coefficiente de temperatura para V_o	$TC_v=-2.6$	mV/°K
Corriente de cortocircuito ($E_v=1000lx$)	$I_{SC}=80$	μA
Coefficiente de temperatura para I_{SC}	$TC_i=0.18$	%/°K
Área de superficie fotosensible	$A_s=7$	mm^2

Tabla 1 Características generales del fotodiodo SFH206K

Fuente: Siemens semiconductor group.

En el modo fotovoltaico, el fotodiodo se conecta a un amplificador de tensión con impedancia de entrada muy alta, siendo la tensión obtenida muy proporcional a la irradiancia o iluminancia recibida. En la Figura 3 se muestra el comportamiento de fotodiodo utilizado para los dos diferentes modos de operación. Se ha elegido para este proyecto el modo fotovoltaico para aprovechar la alta linealidad de la corriente de salida. El circuito de acondicionamiento del fotodiodo del prototipo utiliza un amplificador de transimpedancia. El amplificador de transimpedancia convierte estas variaciones de corriente en tensión para su posterior procesamiento y conversión analógica a digital en el módulo Arduino.

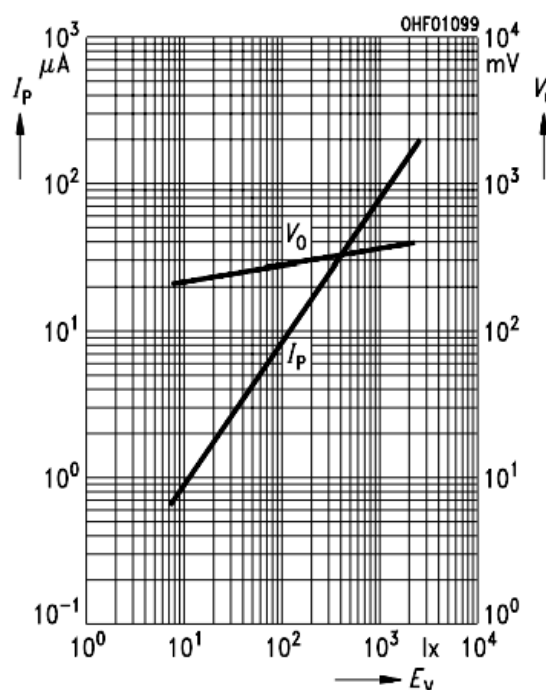


Figura 3 Comportamiento de los modos fotoconductorivo y fotovoltaico del fotodiodo SFH206K

Fuente: Siemens semiconductor group

En la Figura 4 se muestra la curva de sensibilidad espectral relativa del fotodiodo de silicio utilizado. Es importante notar que, aunque el ancho de banda espectral del fotodiodo utilizado es más reducido en comparación con el espectro solar, esto no afecta considerablemente en la medición del sistema debido a que los paneles solares están también fabricados de silicio y por tal motivo se trabaja con un ancho de banda espectral similar al del fotodiodo.

Se usó un puerto analógico de la tarjeta Arduino UNO para digitalizar a 10 bits la tensión entregada por el amplificador de transimpedancia. Los datos obtenidos después de la conversión analógica-digital son enviados a un archivo de Excel® usando una macro escrita para Arduino, y a un módulo HC-05 de comunicación serial mediante Bluetooth para tener la información disponible en cualquier dispositivo móvil. Se ha programado el Arduino para tomar y enviar datos periódicamente cada 5 minutos.

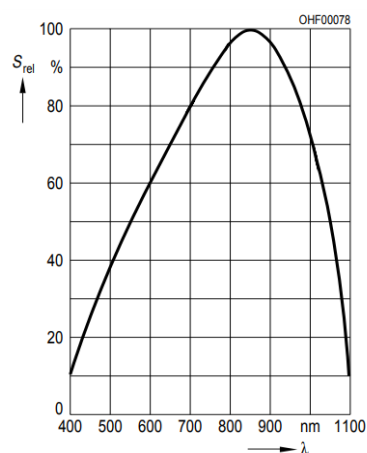


Figura 4 Curva de sensibilidad espectral relativa S_{rel} del fotodiodo SFH206K

Fuente: Siemens semiconductor group

Dado que se requiere la captación de la energía radiante del sol dentro de un rango que cubre todo el horizonte, es necesario compensar la ley de cosenos [18] mediante un domo colocado inmediatamente frente a la superficie sensible del fotodiodo. Se ensayaron varios materiales y formas resultando un perfil semiesférico de teflón el más conveniente.

Resultados

Se utilizó un piranómetro comercial para contrastar las mediciones obtenidas con el prototipo desarrollado.

Se usó el LP02® de la empresa Sensovant®. Algunas características de este dispositivo se muestran en la Tabla 2.

El prototipo y el dispositivo comercial de medición se colocaron juntos en la ubicación 20.939,-89.615 dentro de las instalaciones de la Universidad Tecnológica Metropolitana, con la misma orientación, y un ángulo de inclinación de 21° dada la posición meridional de la ciudad de Mérida, Yucatán.

Se dispusieron los aparatos sobre el techo de un edificio de 6 m. de altura y despejado de obstrucciones. Se dio inicio la medición a las 9:00 am y se concluyó a las 18:00 hrs.

Los datos se recabaron posteriormente del archivo Excel® antes mencionado para su graficación e interpretación.

Medición	Radiación solar hemisférica
Clasificación ISO	Piranómetro de 2a clase
Rango espectral	285 to 3000 nm
Sensitividad nominal	$15 \times 10^{-6} \text{ V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
Temperatura de operación	-40 to +80 °C
Respuesta de temperatura	$< \pm 3 \% (-10 \text{ to } +40 \text{ }^\circ\text{C})$

Tabla 2 Características del piranómetro LP02

Fuente: Sensovent LP02 datasheet

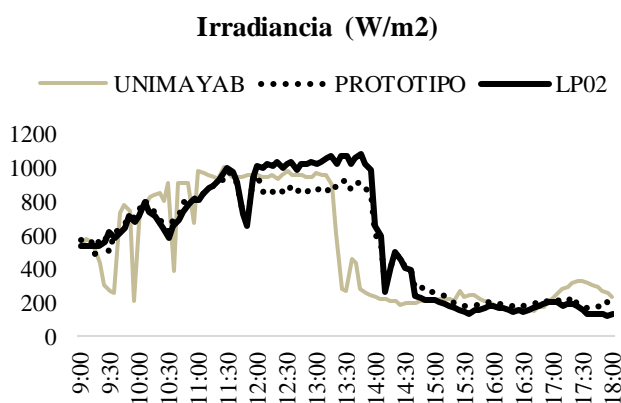


Gráfico 1 Mediciones realizadas el lunes 2 de julio de 2018

Fuente: Elaboración propia

Irradiancia (W/m2)

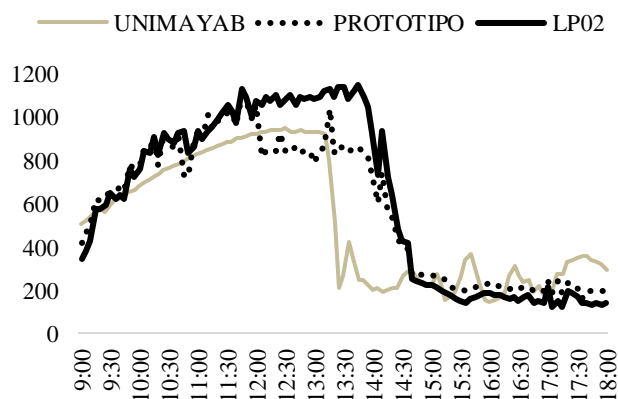


Gráfico 2 Mediciones realizadas el martes 3 de julio de 2018

Fuente: Elaboración propia

En las gráficas 1 y 2 se muestran los resultados de las dos pruebas realizadas una el lunes 2 y la otra el martes 3 de julio de 2018. Se observa la necesidad de compensación por temperatura ya que en el período de mayor radiación incidente se presenta mayor discrepancia al comparar los datos obtenidos mediante el prototipo con los que ofrece el equipo comercial.

Se presentan adicionalmente para comparación las mediciones tomadas de la página de internet de la estación meteorológica UNIMAYAB del Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) unidad Mérida [21], ubicada en las coordenadas 21.112, -89.609.

Las diferencias en las mediciones derivan de los siguientes aspectos: la estación meteorológica realiza un muestreo con un medidor que tiene una sensibilidad espectral más amplia y toma las lecturas sobre un plano horizontal, no inclinado como las adquiridas con el prototipo y el medidor comercial.

Los decaimientos en el progreso de la irradiancia se deben a los efectos de nublados y lluvia, que aparecen defasados en las gráficas dada la diferencia en las posiciones geográficas de los sitios de medición.

Agradecimientos

Se agradece al Tecnológico Nacional de México y al Conacyt por el apoyo para el desarrollo de esta investigación.

Conclusiones

Se presenta el desarrollo de un prototipo de piranómetro de semiconductor basado en un fotodiodo. Se obtuvieron mediciones muy aproximadas a las de un medidor comercial típico. Estas serán de gran utilidad para el desarrollo de estrategias de optimización de un arreglo de paneles fotovoltaicos conectados a la red eléctrica. Se observa que se requiere compensación en las medidas ya que el contenido espectral del piranómetro basado en semiconductor es sensible a menos componentes que los recibidos en la radiación solar además de necesitar un control de la temperatura de operación. Como trabajo futuro se plantea construir un sistema de control térmico y diseñar un algoritmo de compensación usando la respuesta espectral que publica el fabricante del fotodiodo en su hoja de datos.

Referencias

- [1] Instalación de paneles solares en Yucatán, en auge. (27 de junio 2017). Diario de Yucatán. Recuperado de <http://yucatan.com.mx/merida/ciudadanos/instalacion-paneles-solares-yucatan-auge>.
- [2] Cosecha solar, energía poco aprovechada. (8 de septiembre de 2014). El Universal. Recuperado de <http://archivo.eluniversal.com.mx/ciencia/2014/cosecha-solar-energia-94014.html>.
- [3] Vignola, F., Derocher, Z., Peterson, J., Vuilleumier, L., Félix, C., Gröbner, J., & Kourenmeti, N. (2016). Effects of Changing Spectral Radiation Distribution on the Performance of Photodiode Pyranometers. *Solar Energy*, 129, pp 224-235.
- [4] Sengupta, M., Gotseff, P., & Stoffel, T. (September 2012). Evaluation of Photodiode and Thermopile Pyranometers for Photovoltaic Applications. Proceedings of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, Germany. Conference Paper NREL/CP-5500-56540.
- [5] Fletes, N., Paredes, C., & Dibene, L. (2016). Eficiencia en la producción de energía de un panel fotovoltaico a diferente inclinación en Nuevo Vallarta, Nayarit. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, 3-8: 99-103.
- [6] Roitman, M., Mestrallet, A., Aramburu, M., & Rossi, R. (septiembre 2015). Dimensionamiento de un sistema de energía solar fotovoltaica para una vivienda familiar de la ciudad de Córdoba. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 2, 37-43.
- [7] Cardozo, A., (junio 2014). Cálculo y diseño de sistema solar fotovoltaico para uso doméstico (tesina de especialista). Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México.
- [8] Neri, J.L., Mateo, J., & Reséndiz, G. (2013). Módulo fotovoltaico para entrenamiento de alumnos del Centro de Desarrollo de Energías Renovables (tesis de maestría). Centro de investigación en materiales avanzados, CIMAV); Chihuahua, México.
- [9] Díaz, T., & Carmona, G. (2011). Instalaciones solares fotovoltaicas. Grado Medio. McGraw-Hill/Interamericana. España.
- [10] Aguilera, J., Hontoria, L. (2011). Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos. Grupo IDEA. Departamento de Electrónica. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Jaén. España.
- [11] Mestanza Acosta P., & Verástegui Gubler, A. (2013). Proyecto EnDev/GIZ. Manual de instalación de un sistema fotovoltaico domiciliario. Cooperación Alemana al Desarrollo – GIZ. Lima, Perú.
- [12] Molina, M., & Melchor, C. (2016). Prototipo de un Sistema Fotovoltaico Autónomo. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, 3-8: 9-18.
- [13] Sánchez Juárez, A. (2017). Especificación Técnica para Sistemas Fotovoltaicos conectados a la red eléctrica asociados a proyectos productivos agropecuarios. Fideicomiso de riesgo compartido. México.
- [14] González, R., Jiménez, H., & Lagunas, J. (2003). Sistemas fotovoltaicos conectados a la red. *Boletín IIE octubre-diciembre del 2003*. México D.F., México.
- [15] Al-Najideen, M. I., & Alrwashdeh, S. S. (2017). Design of a solar photovoltaic system to cover the electricity demand for the faculty of Engineering- Mu'tah University in Jordan.

Resource-Efficient Technologies, 3(4), 440–445.

[16] Sharma, R., & Goel, S. (2017). Performance analysis of a 11.2 kWp roof top grid-connected PV system in Eastern India. Energy Reports, 3, 76–84.

[17] Ahsan, S., Javed, K., Rana, A.S., Zeeshan, M. (2016). Design and Cost Analysis of 1 kW Photovoltaic System Based on Actual Performance in Indian Scenario. Perspectives in Science, 8, 642—644.

[18] Martínez, M., Andújar, J.M., & Enrique, J.M., (2009). A New and Inexpensive Pyranometer for the Visible Spectral Range. Sensors, 9, 4615-4634.

[19] Vignola, F., Peterson, J, Chiu, C, Dooraghi, M., Sengupta, M., & Mavromatakis, F. (2017). Comparison of Pyranometers and Reference Cells on Fixed and One-axis Tracking Surfaces. ASES National Solar Conference 2017 Proceedings. Denver, Colorado, USA.

[20] King, D.L., Boyson, W.E., Hansen, B.R., & Bower, W.I. (1998). Improved accuracy for low-cost Solar Irradiance sensors. 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, 6-10, Vienna, Austria.

[21] Weather Underground. UNIMAYAB, IYUCATAN7.

Recuperado de <https://www.wunderground.com/personal-weather-station/dashboard?ID=IYUCATAN7#history/tdata/s20180703/e20180703/m-daily>.