Caracterización térmica y eléctrica de un sistema fotovoltaico de alta concentración de disco parabólico

Electrical and thermal characterization of a high concentration fotovoltaic system using a parabolic dish

CISNEROS-CARDENAS, Nidia Aracely†, CABANILLAS-LÓPEZ, Rafael Enrique*, PÉREZ-ENCISO, Ricardo Arturo y GARCÍA-GUTIÉRREZ, Rafael

Universidad de Sonora

ID 1^{er} Autor: Nidia Aracely, Cisneros-Cardenas / **ORC ID:** 0000-0001-6176-3616, **CVU CONACYT ID:** 777978

ID 1^{er} Coautor: Rafael Enrique, Cabanillas-López / **ORC ID:** 0000-0003-0739-3348, **CVU CONACYT ID:** 120410

ID 2^{do} Coautor: Ricardo Arturo, Pérez-Enciso / **ORC ID:** 0000-0001-5568-9624, **CVU CONACYT ID:** 225369

ID 3^{er} Coautor: Rafael, García-Gutiérrez / **ORC ID:** 0000-0001-5030-326X, **CVU CONACYT ID:** 31079

DOI: 10.35429/JEE.2019.11.3.16.21

Recibido Septiembre 20, 2019; Aceptado Diciembre 30, 2019

Abstract

This paper presents the experimental study that consist of the thermal and electrical performance analysis of a HCPV system compound by two parabolic dishes with their respective power conversion units (PCUs), configured in a special optic known as XRX-Köhler. This system uses multi-junction cells, that despite it high efficiency, the cells do not use between 60 to 70% of the solar radiation received, so this energy must be removed with a cooling system to maintain its temperature within an interval that ensures its integrity and the best performance of it. Unlike simple junction cells, MJs can operate at higher temperatures with acceptable electrical production efficiencies. This characteristic of operating in a wide range of temperatures ($\sim 90^\circ\text{C}$), can make thermal systems of solar applications work with residual heat and thus improve the overall performance of the system. A series of experimental test campaigns has been developed for the evaluation of the IV curves instantaneously, as well as the electrical and thermal instant efficiency obtaining overall values of $\sim 24\%$ and $\sim 53\%$, respectively.

Solar concentrator system, Parabolic dish, Multi-junction cells

Resumen

Este artículo presenta el estudio experimental que consiste en el análisis del desempeño térmico y eléctrico de un sistema HCPV que cuenta con dos discos parabólicos y sus respectivas unidades de conversión de potencia (PCUs) configurados en una óptica especial conocida como XRX-Köhler. Este sistema utiliza celdas multi-unión, que, a pesar de su alta eficiencia, no utilizan entre el 60-70% de la radiación recibida por lo que esta energía debe ser retirada con un sistema de enfriamiento para mantener su temperatura dentro de un intervalo que asegure su integridad y el mejor desempeño de la misma. A diferencia de las celdas de unión sencillas, las MJ pueden operar a más altas temperaturas con eficiencias aceptables de producción eléctrica. Esta característica de operar en un rango amplio de temperaturas ($\sim 90^\circ\text{C}$), puede hacer que sistemas térmicos de aplicaciones solares funcionen con el calor residual y así mejorar el desempeño total del sistema. Se ha desarrollado una serie de campañas de pruebas experimentales para la evaluación tanto de las curvas I-V en forma instantánea como las eficiencias instantáneas eléctrica y térmica obteniendo valores de $\sim 24\%$ y de $\sim 53\%$, respectivamente.

Sistemas de concentración solar, Disco parabólico, Celdas de multi-unión

Citación: CISNEROS-CARDENAS, Nidia Aracely, CABANILLAS-LÓPEZ, Rafael Enrique, PÉREZ-ENCISO, Ricardo Arturo y GARCÍA-GUTIÉRREZ, Rafael. Caracterización térmica y eléctrica de un sistema fotovoltaico de alta concentración de disco parabólico. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2019. 3-11: 16-21

† Investigador contribuyendo como primer Autor.

*Correspondencia al Autor correo electrónico: (rcabani@iq.uson.mx)

Introducción

Los sistemas de concentración solar fotovoltaico (CPV, por sus siglas en inglés) son una alternativa sustentable para la producción de energía eléctrica con el fin de satisfacer las necesidades de la sociedad actual, estos sistemas convierten la radiación solar en potencia eléctrica a través del uso de celdas fotovoltaicas.

Los CPV tienen como objetivo principal reducir el área de concentración a través de la implementación de lentes y/o espejos en una configuración óptica especial. Un estudio realizado por Luque y sus colaboradores señalan que el uso de configuraciones ópticas abarata el costo de producción de energía eléctrica bajo el argumento de que un elemento óptico es más barato que una celda solar fotovoltaica-generalmente de multi-unión (multi-junction, MJ por sus siglas en inglés)- (Luque, Sala, & Luque-Heredia, 2006); siendo más eficientes y más costosas que las celdas de unión sencilla (Kurtz, Philipps, Bett, & Horowitz, 2012).

Sin embargo, las celdas MJ sólo aprovechan entre el 30 y 40% de la radiación recibida por lo que el excedente de energía debe ser retirado por un sistema de enfriamiento pudiendo ser aprovechado como calor de proceso, incrementando así el rendimiento global del concentrador. Es recomendable que este tipo de sistemas sean operados con radiación directa normal (Direct Normal Irradiance, DNI por sus siglas en inglés) en lugares que reciban cantidades mayores a 2000 kWh/m² al año (Wiesenfarth, Philipps, Bett, Horowitz, & Kurtz, 2017) para lograr un máximo desempeño, por esto es necesaria la adaptación de un sistema de seguimiento solar.

La tecnología de concentración fotovoltaica se ha convertido en un competidor serio para proyectos solares en zonas con alta radiación directa normal (Prior, 2014) a pesar de que aún se encuentra en la etapa de R&D. En los últimos años, se han publicado artículos sobre CPV que varían en su tamaño y sus componentes; con áreas receptoras de hasta 52 m² que producen 12 kW y 25 kW eléctrico y térmico, respectivamente (Hayden, et al., 2012); así como CPV con eficiencia eléctrica de 21% (Chayet, et al., 2011), 28.5% (Schmitz, et al., 2017) y hasta 30.2% (Dreger, et al., 2015).

Figura 1 Sistema de alta concentración fotovoltaico

El sistema CPV evaluado fue desarrollado por investigadores de la Universidad de Arizona. El concentrador consiste de dos discos parabólicos (X) (1.65 x 1.65 m²) donde se reciben los rayos solares para redirigirlos a un punto focal donde se encuentra una esfera (R) de cuarzo que refracta la radiación sobre un arreglo de espejos (X) en forma de poliedro truncado (también llamado origami) logrando una distribución uniforme sobre un arreglo de celdas MJ.

Este sistema óptico es llamado XRX-Köhler, logra una razón de concentración de 1000x y presenta una tolerancia al error de seguimiento de $\pm 0.7^\circ$. La unidad de conversión de potencia (Potencial Power Unit, PCU por sus siglas en inglés) alberga la esfera refractora, el arreglo origami, las celdas MJ y una parte del sistema de enfriamiento. Este CPV, también llamado 2M (Figura 1) – porque cuenta con dos espejos parabólicos y sus respectivos PCUs-integra un sistema de seguimiento solar y un sistema de control general (Coughenour, et al., 2014).

El objetivo de este trabajo es la evaluación tanto térmica como eléctrica del CPV descrito anteriormente y se espera que la aportación de este escrito contribuya con el desarrollo científico y tecnológico para la mejorar la calidad en la mezcla energética para la producción de electricidad y calor.

Metodología

Este análisis experimental se diseñó para evaluar la parte térmica y la parte eléctrica de las dos PCUs instaladas en el 2M considerando el estándar de evaluación de concentradores fotovoltaicos IEC 62670-1:2013, en el cual se establecen las siguientes condiciones de operación: temperatura ambiental de 20°C, DNI de 900 W/m² y masa de aire de 1.5. La DNI fue monitoreada durante todo el tiempo de los experimentos con un pirheliómetro, marca Eppley Modelo NIP serie 3560802K6 (Figura 2), para estimar la radiación solar que capta el área receptora del concentrador.

Figura 2 Pirheliómetro Eppley Modelo NIP serie 3560802K6

Para la parte eléctrica, se estimó la eficiencia eléctrica instantánea a partir de la potencia eléctrica producida, así como para un periodo de operación de 10 h continuas, las curvas Intensidad-Voltaje (I-V) y el factor de llenado; también se analizó el comportamiento de la potencia eléctrica en función de la temperatura mientras que, para la parte térmica, se calculó la eficiencia térmica instantánea y la respuesta de la potencia térmica al realizar las curvas I-V.

Caracterización eléctrica

El concentrador se instrumentó con un sistema automatizado de resistencia externa variable (Figura 3), que funciona como un reóstato – regula la resistencia de carga mediante un software de control; varía la resistencia desde circuito abierto hasta corto circuito, registra los datos de voltaje y de corriente del sistema y convierte la energía eléctrica alimentada en calor a través de las resistencias eliminándolo por enfriamiento al medio ambiente-.

La adaptación de este sistema se hace con el fin de obtener datos para la elaboración de curvas I-V características de las celdas, lo que también permite obtener el factor de llenado (Fill Factor, FF, por sus siglas en inglés).

Figura 3 Sistema automatizado de resistencia externa variable

El FF describe la relación entre la potencia máxima que puede obtenerse del sistema y el producto de voltaje en circuito abierto por la corriente en corto circuito, es decir, que este valor es la relación entre la potencia eléctrica obtenida y la potencia máxima teórica (Sathyanarayana, et al., 2015). Este factor provee una idea de la calidad del arreglo fotovoltaico, mientras más cercano sea este valor a la unidad, el arreglo es capaz de proporcionar más potencia. El valor de FF para celdas fotovoltaicas de silicio comerciales en módulos planos se encuentra entre 0.7-0.8.

$$FF = \frac{P_{m\acute{a}x}}{I_{sc}V_{oc}} = \frac{I_{m\acute{a}x}V_{m\acute{a}x}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (1)$$

Donde:

$P_{m\acute{a}x}$ es la potencia máxima
 $I_{m\acute{a}x}$ es la intensidad de corriente máxima
 $V_{m\acute{a}x}$ es el voltaje máximo
 I_{sc} es la intensidad de corriente en corto circuito
 V_{oc} es el voltaje en circuito abierto

Caracterización térmica

Para el cálculo de la eficiencia térmica instantánea, se monitoreó el flujo másico del refrigerante dentro del sistema de enfriamiento por lo que se instaló un flujómetro calibrado - exactitud de $\pm 1\%$, temperatura de operación máxima de 70 °C- en el circuito del refrigerante del sistema de enfriamiento del concentrador.

Así como las temperaturas en las entradas y las salidas de los PCUs, en operación normal. Es importante señalar que el sistema de enfriamiento está configurado en serie, es decir que el flujo del refrigerante entra a la primera PCU para retirar el calor y posteriormente, entra a la segunda unidad. Esto indica que la temperatura – tanto del fluido de enfriamiento como de las celdas- de la segunda unidad será más elevada que la de la primera y, por lo tanto, su eficiencia será menor.

Balance termodinámico

Se realizó un balance termodinámico en el concentrador haciendo las siguientes consideraciones: el sistema se encuentra en estado permanente y se consideró la segunda ley de la termodinámica obteniendo la siguiente ecuación para el cálculo de la potencia:

$$P_{in} = P_t + P_e + p\acute{e}rdidas \tag{2}$$

$$A_R * DNI = m \cdot Cp \Delta T + P_e + p\acute{e}rdidas \tag{3}$$

- Donde
P_{in}-Potencia recibida
P_e-Potencia eléctrica
P_t- Potencia térmica
Q- Flujo de calor
m- Flujo másico
Cp-Capacidad calorífica de la mezcla
ΔT-Diferencia de temperatura
A_R-Área reflectora

Los valores de la potencia eléctrica se obtienen a partir del sistema automatizado de resistencia variable externa. Para determinar las eficiencias, se toma como base la potencia recibida en el área reflectora y, la suma de las eficiencias térmica y eléctrica corresponde a la eficiencia total del sistema.

Resultados

Los resultados que se muestra a continuación fueron obtenidos bajo las siguientes condiciones de operación: DNI 925.9 ± 5.94 W/m², masa de aire de 1.2 y temperatura ambiente de 20 °C. El periodo de operación seleccionado corresponde a un tiempo de 900 segundos durante el cual se observó un comportamiento de la DNI casi constante.

Gráfico 1 Potencias térmica y eléctrica durante el periodo de operación

En el Gráfico 1, se presenta el comportamiento de las potencias térmica y eléctrica producidas y una curva I-V. Para un estudio minucioso de este comportamiento, se divide la gráfica en tres secciones. Las secciones laterales corresponden al comportamiento de las potencias térmica y eléctrica en condiciones de operación normal, mientras que en la sección central se muestran los comportamientos de las potencias durante la realización de la curva I-V.

Esta curva es generada por el banco de carga, que hace que el concentrador empiece a funcionar en circuito abierto (donde el voltaje tiene valor máximo) por lo que la potencia es cero; mientras que, al agregar las resistencias se generan parejas de voltaje y corriente hasta llegar al punto donde la pareja de valores I-V son los máximos en donde se produce el valor máximo de potencia eléctrica; al continuar incrementando las resistencias se alcanza el valor máximo de corriente eléctrica y la potencia eléctrica es cero.

En cuanto a la respuesta de la potencia térmica frente a la realización de la curva I-V se observa que, durante la operación en circuito abierto, esta potencia alcanza valores de alrededor de 3800 W debido a que la radiación solar concentrada no se está convirtiendo potencia eléctrica mientras que, al alcanzar el punto de potencia eléctrica máxima, la potencia térmica regresa casi al mismo valor antes de iniciar la curva I-V para después incrementar su valor cuando se llega al punto de corto circuito y continuar con los valores presentados durante operación normal.

Bajo condiciones de operación normal, el 2M produjo alrededor de 1200 watts de potencia eléctrica y 2400 watts de potencia térmica, aunque se aprecian pequeñas variaciones que se atribuyen a que el sistema de seguimiento solar realiza ajustes durante la operación – menos evidentes en la producción de la potencia térmica debido a la inercia térmica del sistema-.

En el Gráfico 2 se observa la curva I-V correspondiente al arreglo fotovoltaico del concentrador, se registró un promedio de temperaturas de arreglo PV de 55.48 ± 3.75 °C. Es notable la deflexión que presenta esta curva y se atribuye a que cada celda muestra un comportamiento diferente y el promedio de estos comportamientos en el resultado que se observa en dicha figura; además, es importante señalar que las celdas se encuentran configuradas en serie.

Gráfico 2 Curva I-V del arreglo fotovoltaico del concentrador 2M

Por otra parte, el FF obtenido para este arreglo fue de 0.86, que es bastante bueno en comparación con los módulos planos convencionales.

Gráfico 3 Eficiencias eléctrica y térmica

En el Gráfico 3 observamos las eficiencias eléctrica, térmica y total del sistema a dos temperaturas diferentes.

Es importante señalar que no se trata de un análisis del efecto de la temperatura en la eficiencia, sino que ese aumento de 1°C puede atribuirse a la realización de la curva I-V. La eficiencia eléctrica del sistema fue de 24.18%, la eficiencia térmica fue de 53.3% mientras que la eficiencia total del sistema 77.46%. El 22.54% se atribuye a las pérdidas ópticas acumuladas como reflectancia del espejo, irregularidades en la curvatura del disco, sombramiento del espejo por la misma estructura del concentrador, desbordamiento de la radiación en el foco, reflectancia de la esfera y errores del mecanismo de seguimiento solar.

Agradecimientos

Este trabajo es una parte del proyecto P03 de CEMIE-Sol en el que contribuyeron la Universidad de Sonora, la Universidad de Arizona, la Universidad Nacional Autonoma de México y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Así mismo, se agradece la colaboración de los técnicos académicos de la Plataforma Solar de Hermosillo, lugar donde se desarrolló este trabajo de investigación.

Conclusiones

Se caracterizó térmica y eléctricamente el concentrador 2M llegando a las siguientes conclusiones:

- El 2M produce el máximo de potencia eléctrica bajo condiciones de operación normal.
- La eficiencia eléctrica del concentrador es de 24.18%, se obtuvo una producción de alrededor de 1200 Watts.
- La eficiencia térmica fue del 53.3%, obteniendo una producción de 2400 Watts aproximadamente.
- La eficiencia total del sistema fue de 77.46%, mientras que el 22.54% restante se atribuye a pérdidas ópticas acumuladas y al error del mecanismo de seguimiento solar.
- La potencia térmica puede ser utilizada como calor para un proceso posterior, aumentando así la eficiencia del sistema.

Referencias

Chayet, H. y otros, 2010. High efficiency, low cost parabolic dish system for cogeneration of electricity and heat. *AIP Conference Proceedings*, Volumen 175.

Coughenour, B. M. y otros, 2014. Dish-based high concentration PV system with Kohler optics. *Optics Express*, Volumen 22, pp. A211-A224.

Dreger, M. y otros, 2015. Development and investigation of a CPV module with cassegrain mirror optics. *AIP Conference Proceedings*, Volumen 177.

Hayden, H., Thomas, P., Fette, N. & Pawlowski, E., 2012. *CPV semi-dense array design for a dish and tower collector*. s.l., s.n.

Kurtz, S., 2012. *Opportunities and Challenges for development of a mature concentrating photovoltaic power industry*, s.l.: s.n.

Luque, A., Sala, G. & Luque-Heredia, I., 2006. Photovoltaic Concentration at the Onset of its Commercial Deployment. *Progress in Photovoltaics*, Volumen 14, pp. 413-428.

Schmitz, M. y otros, 2017. A 6-focus high-concentration photovoltaic-thermal dish system. *Solar Energy*, Volumen 155, pp. 445-463.

Wiesenfarth, M. y otros, 2017. *Current status of concentrator pv technology*, s.l.: Fraunhofer ISE Publications.