

DESARROLLO TECNOLÓGICO PARA LA INDUSTRIA SOLAR MEXICANA DE DISPOSITIVOS DE ALTA CONCENTRACIÓN FOTOVOLTAICA

Ricardo Rodríguez-Carvajal^a, Rafael García-Gutiérrez^b,
Christian Dávila Peralta^b, Nidia Aracely Cisneros
Cárdenas^b, Rafael Enrique Cabanillas López^b, Paula
Isiordia-Lachica^a

Universidad de Guanajuato^a, Universidad de Sonora^b

INTRODUCCIÓN

En el mundo, la incorporación de la energía limpia en el mix de la generación de energía eléctrica se contempla con diferentes tecnologías como la eólica, geotermia, solar entre otras. En particular, la energía solar genera dos principales vectores energéticos, la electricidad obtenida a través de sistemas fotovoltaicos y combustibles solares, que, en algunos casos, son utilizados para la generación de energía eléctrica, con eficiencias y costos diferentes a los sistemas fotovoltaicos. Uno de los factores más importantes a considerar son los costos de la tecnología y su eficiencia.

Existen varias aproximaciones para reducir el costo nivelado de la electricidad (LCOE, por sus siglas en inglés) fotovoltaica. Por un lado, el costo de los módulos fotovoltaicos se reduce mediante la economía de escala, es decir, menos materiales y consumo de energía, o el uso de materiales económicos. Por otro lado, el LCOE puede ser reducido mediante el incremento en la eficiencia del módulo, lo que también provee la ventaja de obtener sistemas más pequeños y menores áreas utilizadas (Parida, et al., 2011).



Durante los últimos años, la tecnología de alta concentración fotovoltaica (HCPV, por sus siglas en inglés) ha ganado atención, lo que ha incrementado su demanda, por lo que esfuerzos importantes son llevados a cabo para incrementar su eficiencia, así como el volumen de producción de módulos con dicha tecnología (Parida, et al., 2011).

Un sistema HCPV consiste en un grupo de celdas solares multiunión interconectadas en serie, con un dispositivo óptico en cada celda que concentra la luz del sol (Luque y Andreev, 2007). Esta tecnología ha sido bien establecida en aplicaciones espaciales y recientemente ha entrado al mercado terrestre (Parida, et al., 2011).

Este artículo se enmarca en el proyecto “Producción solar de energía eléctrica usando sistemas de disco parabólico, con celdas de alta eficiencia y dispositivos termo-iónicos” P03 del Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol) además cuenta con la colaboración de la Universidad de Arizona, la Universidad Autónoma de México y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Figura 1

Metodología

El 8 de mayo de 2009 los investigadores de la Universidad de Arizona, Dr. Roger Angel y Dr. Warren Davison, presentaron una solicitud de patente de un aparato de concentración solar que prometía resolver los problemas mencionados anteriormente mediante un arreglo óptico novedoso.

Este sistema consistía en un seguidor solar de dos ejes conteniendo un conjunto de espejos parabólicos, los cuales concentran los rayos del sol en generadores fotovoltaicos colocados en su punto focal (Angel y Davison, 2014). Cada concentrador contiene un arreglo óptico conocido como Köhler, que ayuda a dirigir los rayos solares hacia una pluralidad de celdas fotovoltaicas de triple unión enfriadas por un sistema de refrigeración activo colocado detrás de las celdas (Angel, 2013).

Utilizando el concepto HCPV, en el proyecto P03 se utilizó un novedoso y económico sistema de concentración de luz solar en celdas multiunión III-V, las cuales están disponibles comercialmente.

Cuando estas celdas se usan con altas relaciones de concentración solar, es decir de 1000 a 2000 soles, $1 \text{ sol} = 1 \text{ kW/m}^2$, el costo de las celdas se reduce a un aproximado de 0.10 dls/watt, y las futuras plantas de sistemas HCPV que utilicen celdas multiunión con eficiencias cercanas al 50% tienen el potencial de generar energía al mismo costo de las energías fósiles; siendo este el incentivo para nuevos diseños de sistemas HCPV más económicos, con alta concentración y alta eficiencia óptica (Coughenpur et al., 2014).

El sistema desarrollado en el proyecto P03 consta de tres partes principales, los reflectores curvados, la unidad de potencia y enfriamiento, y el mecanismo de seguimiento solar.

En este artículo se describen los dos primeros elementos, ya que los mecanismos de seguimiento solar han sido abordados en otro trabajo Rodríguez-Carvajal R, García-Gutierrez, R, et. al, 2020



Figura 1. Concentrador PV de disco parabólico con celdas triple unión y óptica Köhler.

Los reflectores son fabricados a partir de vidrio flotado, el mismo tipo del que se manufactura en grandes volúmenes para ventanas.

El proceso de moldeo de estos reflectores toma hojas de vidrio plano que son primeramente moldeadas a una forma curvada, y después plateada su parte posterior para obtener una alta reflectividad.

El proceso de fabricación de los reflectores parabólicos es explicado en el documento de patente estadounidense US 8,082,755 “Metodo de manufactura de grandes reflectores parabólicos para un aparato de concentración solar”.

Según lo reivindicado en dicho documento, el método consiste en colocar una hoja de vidrio flotado, sujetado por las esquinas del vidrio, sobre un molde con forma parabólica.

Según la compañía Rehnu (2012), un spin-out de la Universidad de Arizona que obtuvo la licencia de la tecnología, el proceso de moldeo es único, ya que produce grandes reflectores de cristal con una forma parabólica, de modo que cuando apunta al sol concentran la luz en un punto de enfoque intenso.

El segundo componente integra la unidad de potencia y de enfriamiento. La unidad de potencia consiste primeramente en un arreglo óptico de Khöler, el cual contiene una esfera de sílice cuyo centro es colocado en el punto focal de la superficie reflectora.

Esta esfera distribuye la radiación solar en un arreglo de celdas fotovoltaicas multi-unión colocadas detrás de la esfera en una superficie curvada, aun cuando el seguimiento se encuentra fuera de eje. Este arreglo óptico permite un grado de aceptación de 1.5° , relajando los requerimientos de precisión del seguimiento. La figura 2 muestra un diagrama del funcionamiento de la óptica de Khöler, mostrando la proyección de la imagen solar de la lente esférica (a), representando los rayos solares en un seguimiento dentro de eje (b) y fuere de eje (c) hasta un ángulo de aceptación Θ de $\pm .75^\circ$ (Coughenpur et al., 2014).

Al utilizar esta técnica se reducen costos en el sistema ya que el mecanismo de seguimiento solar ya que permite el aprovechamiento de la luz solar concentrada siendo el elemento óptico un avance tecnológico para aprovecharlo en nuestro sistema.

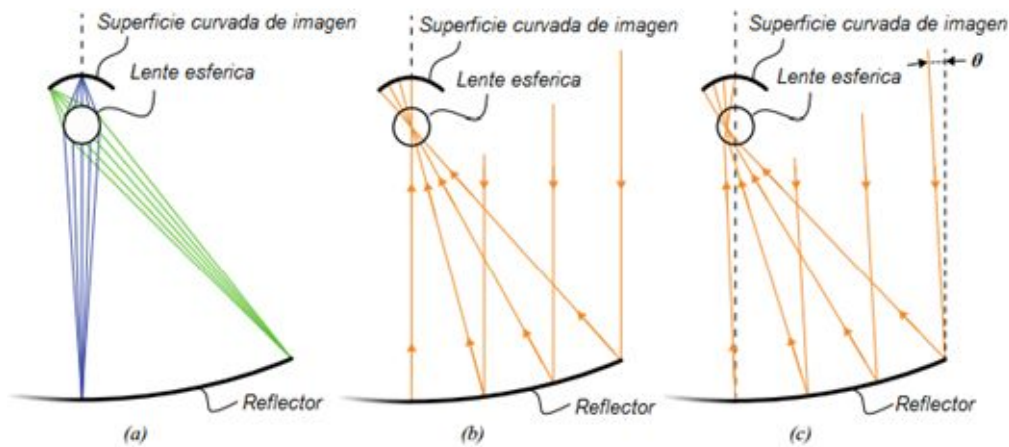


Figura 2. Ventajas de la óptica XRX-Khöler (Coughenpur et al., 2014).

Una de las principales ventajas de esta tecnología es la posibilidad de intercambiar las celdas fotovoltaicas de triple unión por celdas solares de otras tecnologías, o por celdas con materiales novedosos; lo que permite a la tecnología evolucionar junto con los avances en materiales (REhnu, 2014), como se muestra en la Figura 3 se puede observar que los componentes de la unidades de conversión de potencia (PCUs, por sus siglas en inglés) es modular, pudiendo contar desde el diseño de esta unidad la facilidad de intercambiar las celdas utilizadas, para experimentar o para utilizar celdas con tecnologías más eficientes.

En la Figura 4 se observa la PCUs armada y de modo funcional, y la figura 3 presenta el diseño modular para su armado y actualización.

“La tecnología HCPV con reflector parabólico mantiene la promesa de electricidad solar a un costo menor que la tecnología de paneles fotovoltaicos planos, siempre y cuando los costos del seguimiento solar de dos ejes puedan ser minimizado” (Angel, Cuerden y Whiteside, 2014).

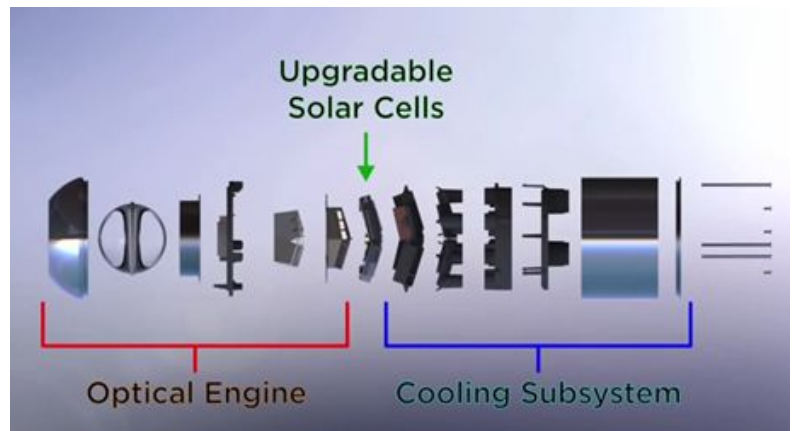


Figura 3. Componentes que integran la unidad de potencia de tecnología de U of A (REhnu Technology Overview, 2014).



Figura 4. Unidad de potencia de 3ra generación de tecnología de la UA (REhnu Technology Overview, 2014).

El sistema desarrollado en el proyecto CEMIE-Sol P03, llamado 2M, se presenta en la Figura 5 y es la integración de estos tres componentes. El sistema está compuesto por dos espejos reflectores, dos unidades de conversión de potencia y un sistema de enfriamiento. Los espejos reflectores están hechos de vidrio bajo en hierro, y tienen un plateado de segunda superficie, es decir que la capa plateada está en la parte trasera del vidrio.

Estos espejos miden 1.65 m x 1.65 m cada uno, tienen una distancia focal de 1.50 m, son paraboloides con ejes simétricos con soporte en 4 puntos y tienen un peso total de 28 kg. Las dos PCUs, tienen un diámetro de 152 mm y contienen 12 celdas de triple unión, cada una con 42% de eficiencia de conversión de energía eléctrica.

El sistema de enfriamiento está constituido por un circuito de agua que transporta flujo de refrigerante, a 7.2 Litros por minuto y un gradiente de presión de 1,500 Pa, enfriado por un radiador.

Este prototipo demostrativo fue desarrollado e instalado para realizar pruebas de eficiencia en condiciones reales, además de poder generar innovación en los sistemas que lo integran como se describirá en este artículo



Figura 5. Concentrador solar de disco parabólico con óptica XR-X-Kohler.

Resultados

Para llevar a cabo las diferentes pruebas, el sistema HCPV se instaló en la Plataforma Solar de Hermosillo – ubicada en la carretera Hermosillo – Bahía de Kino en el Km 21.5-, para lo cual se realizó previamente una cimentación para colocar el concentrador. Posteriormente, se instalaron los espejos parabólicos y los PCUs, ejecutando una correcta alineación entre éstos para lograr que el área de concentración se contenga dentro de la esfera refractora.

En la evaluación experimental se evaluó la eficiencia tanto térmica como eléctrica del sistema. La potencia eléctrica producida está en función de la radiación solar incidente, la eficiencia de las celdas multiunión y de la temperatura a la que éstas operan. Por otra parte, la potencia térmica que produce este sistema depende de la cantidad de radiación incidente capaz de ser convertida en energía térmica. La potencia eléctrica se usará para alimentar la red pública y la térmica para un proceso posterior como calor de alimentación.

Después de la instalación, se diseñaron campañas de pruebas experimentales para evaluar el concentrador tanto eléctrica como térmicamente.

Para la parte eléctrica se desarrollaron pruebas para medir eficiencia eléctrica instantánea y la eficiencia para un día completo de operación, así como para evaluar su comportamiento con respecto a la variación de la temperatura de las celdas, curvas I-V y factor de llenado (FF).

Mientras que, para la parte térmica, se evaluó el comportamiento de la eficiencia eléctrica tanto instantánea como para un día completo de operación continua y su comportamiento durante la realización de curvas I-V, así como una evaluación calorimétrica.

Para continuar con el análisis, se presenta la curva I-V (Figura 6) correspondiente a una de las celdas del concentrador. Esta curva se realizó cuando la radiación solar directa (conocida por sus siglas en inglés DNI) se encontraba en $930.86 \pm 1.2 \text{ W/m}^2$ y a $58.41 \pm 2.81 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura promedio de la celda.

A partir de la curva IV obtenida, se obtuvo el FF calculando el área debajo de la curva. Seguida de esta figura, se presenta la curva I-V realizada para el arreglo fotovoltaico en general, en la cual se observa una deflexión; se debe considerar que cada celda muestra un comportamiento diferente y el promedio de estos comportamientos es el resultado que se presenta en la Figura 7, sin embargo, realizar un análisis más a fondo de este comportamiento (deflexión) es una de las recomendaciones de este trabajo.

Las condiciones bajo las que se realizó dicha curva son una DNI de $930.86 \pm 1.2 \text{ W/m}^2$, una temperatura promedio del arreglo PV de $55.48 \pm 3.75 \text{ }^\circ\text{C}$, una temperatura ambiente de 20°C y una masa de aire de 1.2.

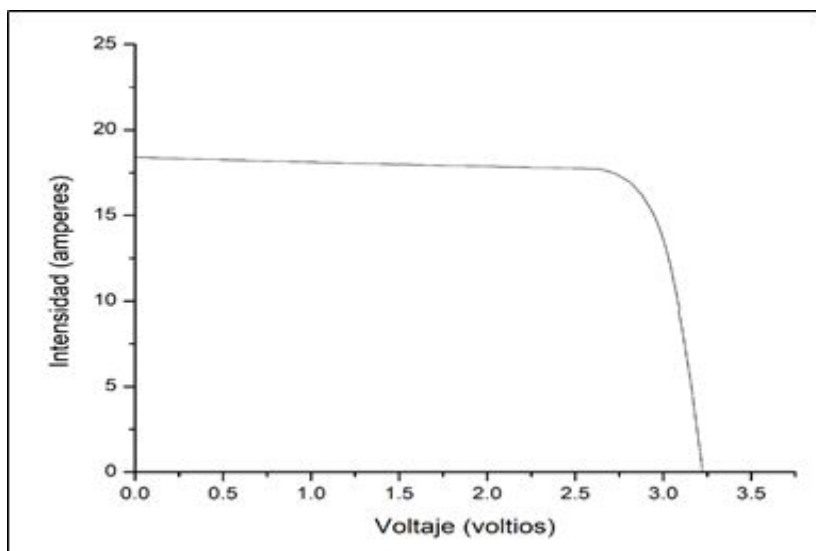


Figura 6. Curva IV correspondiente a una de las celdas de arreglo PV del sistema

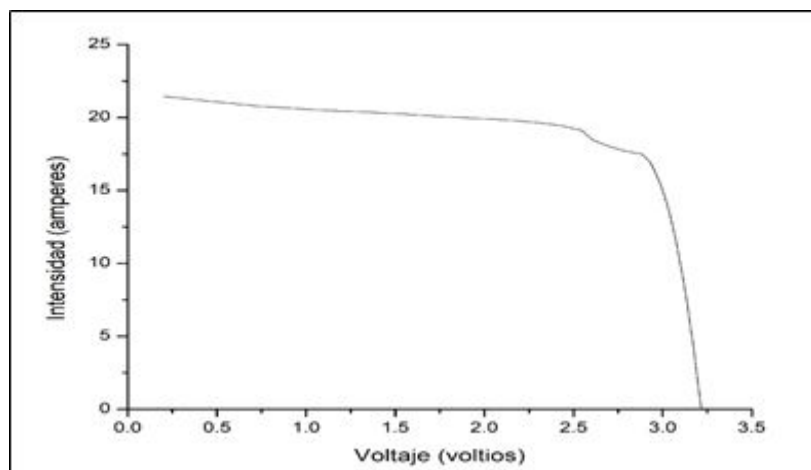


Figura 7. Curva IV correspondiente a una de las celdas de arreglo PV del sistema.

Los valores de FF obtenidos son 0.97 y 0.86, para una celda y para el arreglo PV respectivamente.

Estos valores señalan que el arreglo fotovoltaico integrado en el concentrador es de buena calidad lo que significa una mejora considerable en el desempeño eléctrico de las celdas MJ.

Sin embargo, la diferencia entre el valor de una celda y del arreglo en general es significativa, por lo que se deberá realizar un análisis complementario para estudiar esta situación.

A continuación, se presenta la eficiencia eléctrica y la eficiencia térmica con dos temperaturas de referencia diferentes (Figura 8).

La temperatura de referencia es la temperatura promedio de las celdas que corresponde al promedio realizado de las 12 celdas que están ubicadas en 4 arreglos dentro de cada unidad de conversión de potencia, es decir, la temperatura promedio de un total de 24 celdas en el concentrador.

La temperatura de 52 °C corresponde al primer periodo de operación normal, mientras que la temperatura de 53°C corresponde al segundo periodo, por lo que se infiere que el incremento de 1°C se debe a la realización de la curva IV. Es importante mencionar que en esta parte del estudio no se analiza el comportamiento de la eficiencia eléctrica en función de la temperatura.

La eficiencia eléctrica obtenida fue de 24.17% en promedio mientras que la eficiencia térmica fue de 53.28%.

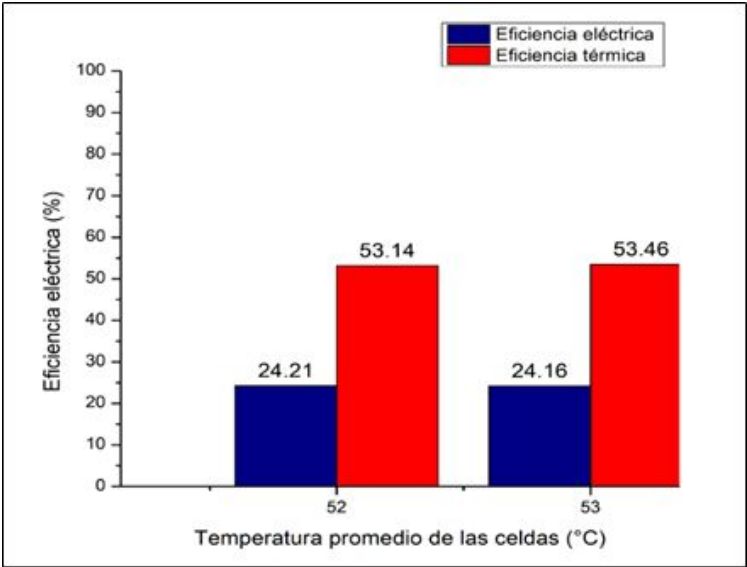


Figura 8. Eficiencias térmica y eléctrica

La eficiencia total del sistema obtenida durante la segunda campaña de evaluación fue de 77.45% en promedio (Figura 9), es importante mencionar que en esta segunda etapa se utilizaron las dos unidades de conversión de potencia además de señalar que en el valor de eficiencia reportado el área de apertura incluye la parte sombreada por los mismos PCUs y la estructura del concentrador.

El 22.55% restante se atribuye a las pérdidas por reflectividad, absorbancia, transmitancia, sombreado, degradación de los espejos y error en el seguimiento solar

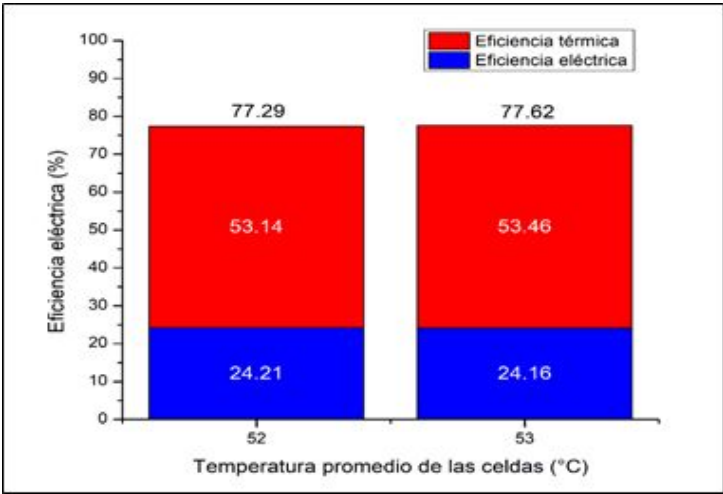


Figura 9. Eficiencia total del sistema

En la Figura 9 se muestra la eficiencia total del sistema sin producción eléctrica cuando el concentrador opera en circuito abierto, se observan dos datos de eficiencia total del sistema debido a que la prueba se repitió para confirmar los resultados bajo operaciones de operación (DNI y temperatura ambiente muy similares).

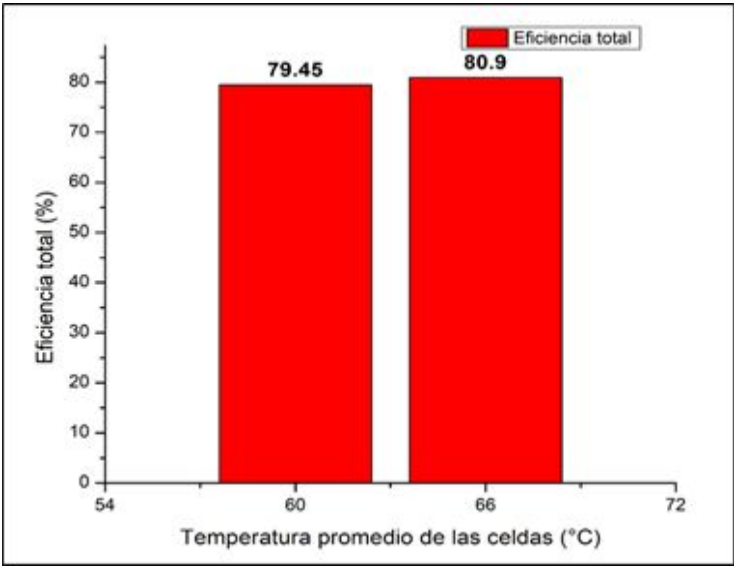


Figura 9. Eficiencia total del sistema sin producción eléctrica.

Tomando como base la radiación que se reciben en las celdas se calculó la eficiencia de conversión de potencia eléctrica generada por el arreglo PV sancionando las pérdidas que se generan por razones ajenas al sistema eléctrico, del cual se obtiene que la eficiencia eléctrica es de 31.58% y el 68.42% corresponde a potencia térmica.

En la Figura 10, se realiza una comparación de las eficiencias en función de la base de cálculo.

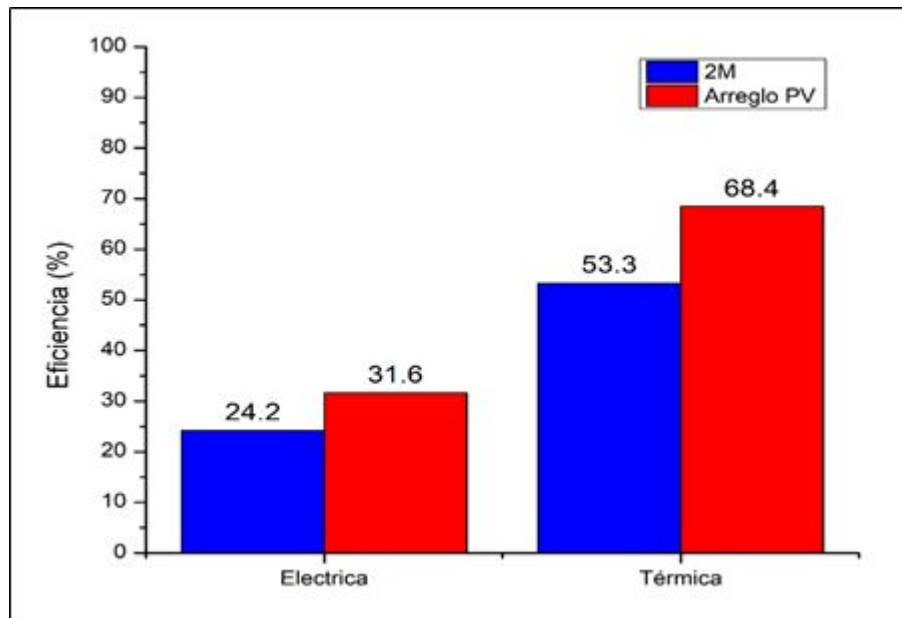


Figura 10. Eficiencias del concentrador 2M y del arreglo PV.

Por último, para una jornada diaria de operación normal realizada de manera continua con una duración de 10 h se observa una producción muy estable con una potencia casi estable de 1,100 W con pequeñas variaciones debidas a variaciones propias de los valores de la DNI, como se observa en la Figura 11.

Al final del día se produjo un total de 11 kWh y 28 kWh, de energía eléctrica y energía térmica respectivamente, comparados con los 9.02 kWh/m² recibidos de radiación directa normal en el área receptora, la eficiencia de conversión eléctrica diaria resultó en 22.6% mientras la eficiencia térmica fue del 57.4%, para una eficiencia diaria total del concentrador de ~80%.

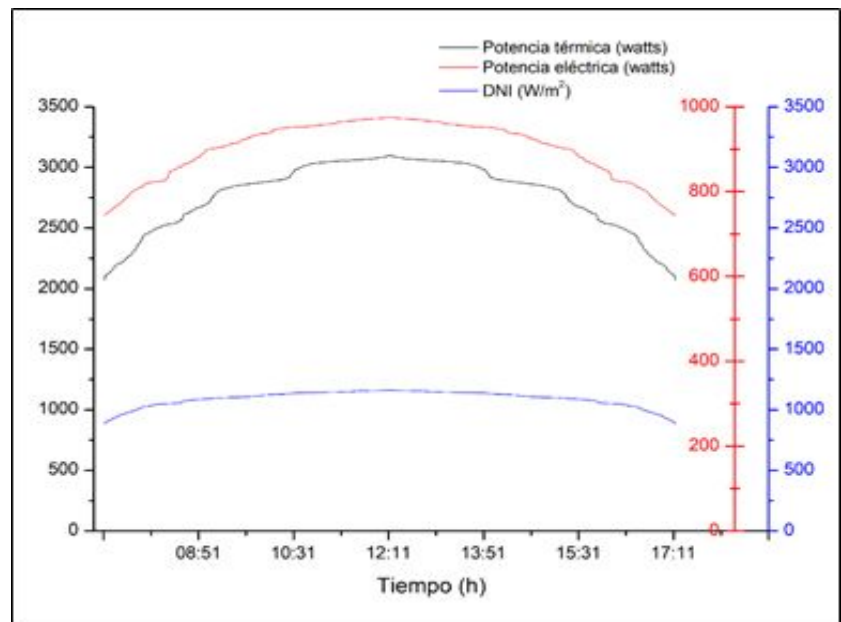


Figura 11. Radiación directa normal y potencias térmica y eléctrica durante una jornada diaria de operación normal.

Conclusión

Con la realización de varias campañas de pruebas, se logró caracterizar tanto eléctrica como térmicamente un sistema de concentración solar compuesto por dos unidades de potencia con celdas multi-unión.

El sistema operó normalmente a una potencia eléctrica máxima de 1,200 We y alrededor de 2,400 Wt de potencia térmica cuando la radiación directa normal es de aproximadamente 900 W/m², la temperatura ambiente es de 20°C y la masa de aire de 1.2; dando una eficiencia instantánea de 24.2% y 53.5%, eléctrica y térmica respectivamente.

Al calcular la eficiencia eléctrica de las celdas partiendo de lo que realmente reciben de radiación se obtiene valores que rondan los 30%, mientras que usando la radiación solar del área de apertura los valores no rebasan el 25%.

En un día la producción eléctrica alcanza valores promedios de 11 kWh de energía eléctrica y de 28 kWh de energía térmica operando 10 horas continuas cuando se tienen 9 kWh/m² recibidos de radiación directa normal durante ese período, lo que se traduce a una eficiencia de conversión eléctrica diaria de 22.6%, mientras que la eficiencia térmica fue de 57.31% para resultar en una eficiencia total diaria del sistema de 79.89%. La eficiencia total de este sistema es una gran ventaja comparativa, ya que entrega dos vectores de generación como lo es calor y energía eléctrica, que los sistemas convencionales no le es posible entregar, con estas eficiencias, adicionalmente se reduce el área a utilizar, lo cual en lugares donde existan limitaciones de terreno, son una alternativa muy atractiva.

Bibliografía

1. Angel, R., Cuerden, B. y Whiteside, A. (2014) Lighweight dual-axis tracker designs for dish-base HPCV. AIP Conference Proceedings.
2. Angel, J. R. P., 2013. Photovoltaic generator with a spherical imaging lens for use with paraboloidal solar reflector. U.S., Patente n° 8350145.
3. Davila, C. (2016) Diseño de seguidor solar para sistema de alta concentración, con arreglo parabólico y óptica de köhler. Tesis de maestría. Universidad de Sonora.
4. Luque López, A. & Andreev, V. M., 2007. Concentrator Photovoltaics. s.l.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
5. Luque-Heredia, I., Quémère, G., Cervantes, R., Laurent, O., Chiappori, E., y Ying-Chong, Jing. (2012). 'The Sun Tracker in Concentrator Photovoltaics', en Cristóbal López, A.B., Martí Vega, A., y Luque López, A. (eds), Next Generation of Photovoltaics, Springer Series in Optical Sciences, 165, pp. 61-93.
6. Parida, B., Iniyar, S., Goic, R. (2011) A review of solar photovoltaic technologies. Renewable and sustainable energy reviews, 15. pp 1625 – 1636
7. Peterka, J.A. & Derickson, R.G. (1992) Wind load design methods for ground based heliostat and parabolic dish collectors. Sandia National Laboratories. SAND92-/009.
8. REhnu Technology Overview (2014), video, Monica Andrews, 19 May, visto 23 Julio 2014, <http://www.youtube.com/watch?v=6c95ydbNhTU>>. Ricardo Rodriguez-Carvajala , Rafael García Gutierrezb, Christian Dávila Peraltab, José Ramiro Fuentes Laraa, Rafael Enrique, Cabanillas Lopezb, Carlos Perez Rabagoc., Diseño y construcción de seguidores solares de 2 ejes para la industria solar mexicana de concentración fotovoltaica, Revista Energías Renovables, 2020, ISSN: 2395-9304, Año 6 Núm. 41,