



XLV Semana Nacional de
Energía Solar
MÉXICO, CDMX, DEL 4 AL 8 DE OCTUBRE 2021



HACIA EL DESARROLLO DE UN CONCENTRADOR SOLAR PARA GENERACIÓN TÉRMICA Y FOTOVOLTAICA

**Juan Carlos Castro Domínguez, Isaías Moreno Cruz,
Jorge Alerto Tenorio Hernández y Oscar Alfredo Jaramillo Salgado**
Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México,
Privada Xochicalco s/n Col. Centro, Temixco, Morelos 62580, México,
Teléfono: (777) 3620098, jccad@ier.una.mx

RESUMEN

En este trabajo se presentan los avances en el desarrollo óptico de un concentrador Fresnel lineal híbrido térmico fotovoltaico. Dicho dispositivo cuenta con 25 facetas de espejos planos y es capaz de alcanzar hasta 20 soles de potencia radiativa en su foco, cuenta con seguimiento en un solo eje y en su línea focal tiene montado un receptor compuesto por una celda fotovoltaica, adherida a un disipador de calor por el cual fluye agua. El disipador en cuestión cumple un doble propósito: enfriar la celda fotovoltaica para asegurar un máximo en la eficiencia de la misma, y calentar el agua para su posterior aprovechamiento en procesos térmicos de baja temperatura (60 °C).

El estudio óptico se ha llevado a cabo de forma teórica con el trazador de rayos SolTrace, con la finalidad de conocer el flujo radiativo en la línea focal del concentrador ya que, por un lado, es bien sabido que los concentradores de este tipo tienen una distribución radiativa plana en su foco, mientras que, de forma paralela, las celdas fotovoltaicas requieren de un flujo radiativo homogéneo para asegurar su operación óptima y evitar que se degraden e incluso se destruyan. Es así como se ha determinado el área máxima de celda solar que se puede montar en dicha línea focal.

Finalmente, se presenta evidencia fotográfica de la manufactura de un módulo fotovoltaico diseñado a partir de las dimensiones que arrojó el estudio óptico. Este tiene 36 celdas de 4 cm de ancho, conectadas en serie y dispuestas en una sola fila, fue construido con el apoyo de la empresa Solarever, que brindó el material y el acceso a su cortadora láser, laminadora y personal especializado para el soldado y ensamblado del módulo fotovoltaico.

ABSTRACT

This work presents the advances in the optical development of a photovoltaic thermal hybrid linear Fresnel concentrator. This device has 25 facets of flat mirrors and can reach up to 23 suns of radiative power in its focus, it has tracking on a single axis, in its focal line it has mounted a receiver composed of a photovoltaic cell, attached to a heatsink through which water flows. The dissipator in question serves a dual purpose: to cool the photovoltaic cell to ensure maximum efficiency, and to heat the water for later use in low temperature thermal processes (60 °C).

The optical study has been carried out theoretically with the SolTrace ray tracer, in order to know the radiative flux in the concentrator's focal line, since it is known that concentrators of this type have a flat radiative distribution in their focus, while in parallel, photovoltaic cells require a homogeneous radiative flux to ensure their optimal operation and prevent them from being degraded and even destroyed. This is how the maximum solar cell area that can be mounted on the focal line has been determined.

Finally, photographic evidence of the manufacture of a photovoltaic module designed from the dimensions found in the optical study is presented. This has 36 cells 4 cm wide, connected in series and arranged in a single row. It was built with the support of the Solarever company, which provided the material and access to its laser cutter, laminator and specialized personnel for the welding and assembly of the photovoltaic module.

Palabras claves: Concentración fotovoltaica, concentrador Fresnel, distribución radiativa, celda fotovoltaica.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene la finalidad de presentar los avances del proceso del diseño de un sistema de concentración solar Fresnel lineal híbrido térmico-fotovoltaico. Es híbrido porque es capaz de producir energía eléctrica y térmica a la vez.

En este trabajo, la captación de energía solar se realiza con un concentrador solar Fresnel, que cuenta con una serie de espejos planos, cada uno con una inclinación tal que reflejan la radiación solar a una misma línea; es decir, es un concentrador de no imagen con un pseudofoco lineal. Al usar un concentrador solar para generar energía fotovoltaica se reduce el área de celda necesaria, disminuyendo así el costo del sistema.

Así pues, en este proyecto se plantea colocar un sistema fotovoltaico en el receptor del concentrador Fresnel lineal, adherido a un ducto por el cual se hace circular un fluido con un doble propósito: enfriar el sistema fotovoltaico para mantenerlo a una temperatura de operación baja, y que la energía térmica retirada por el fluido pueda ser aprovechada en procesos posteriores.

MARCO TEÓRICO:

Un sistema fotovoltaico es capaz de generar energía eléctrica directamente de la radiación solar, hoy en día el componente más costoso de estos es la celda fotovoltaica. El uso de un sistema de concentración logra disminuir el área necesaria para la generación de energía en razón a la concentración del mismo, por ejemplo, si se tienen un concentrador de 5X, el área de la celda fotovoltaica necesaria para un sistema fotovoltaico se reduce 5 veces (A. G. Imenes, 2004).

Al absorber y almacenar radiación solar la temperatura de los módulos fotovoltaicos aumenta, lo que a su vez provoca una disminución de su eficiencia a razón de 0.4 %/°C en celdas de silicio poli y monocristalino; y de 0.25 % en las de silicio amorfo (S.A. Kalogirou, 2006).

Para retirar calor a los módulos fotovoltaicos se utilizan sistemas de enfriamiento que emplean fluidos tanto líquidos como gaseosos y pueden ser pasivos o activos. La diferencia entre estos es que el primero funciona por efecto termosifón y corrientes generadas naturalmente, mientras que el segundo lo hace con corrientes forzadas con bombas o compresores (Y. Tripanagnostopoulos, 2002).

En la actualidad existen varios estudios reportados en la literatura de sistemas de concentración híbridos térmico-fotovoltaicos lineales, entre ellos resaltan los sistemas CHAPS (Combined Heat and Power Solar) de la universidad de Nacional de Australia que tienen rangos de concentración que van de los 20X a los 40X y los hechos por la Universidad de Lleida que ha construido colectores híbridos con concentradores Fresnel con espejos alcanzando rangos de 5X y 20X de concentración (Chemisana, 2009). Sin embargo, aún la investigación es incipiente con respecto al diseño de los receptores, el acoplamiento del arreglo fotovoltaico sobre el propio receptor, así como el diseño de concentradores secundarios para una mejora en el rendimiento global del sistema.

METODOLOGÍA:

El avance presentado en este trabajo se divide en dos partes, la primera es el estudio óptico con el cuál se determinó el tamaño del receptor usando las ecuaciones de diseño del concentrador lineal Fresnel y el análisis de distribución radiativa hecha con el software SolTrace. La segunda, parte de las dimensiones determinadas con el estudio óptico, con las cuales se realiza el diseño y la construcción del módulo fotovoltaico que se montará el foco del concentrador, esto se hizo con ayuda de la empresa Solarever.

Estudio óptico:

El objetivo del estudio óptico es encontrar el área mínima en el foco, donde el flujo radiativo sea homogéneo. Una celda fotovoltaica irradiada de forma dispareja presenta puntos calientes, que a su vez generan dilataciones térmicas desiguales que pueden llegar a fracturar la celda dañándola de forma permanente.

Para empezar, hay que mencionar que se trata de un concentrador Fresnel lineal compuesto por 25 facetas de espejo, con una anchura, w , de 6 cm cada una, por 2.45 m de largo, cuenta con un receptor plano a una altura focal, f , de 99.96 cm, con un ángulo de aceptación de 45°, lo que le brinda una operación de aproximadamente 6 horas al día, y está orientado de norte a sur, es decir, el seguimiento solar lo hace de forma continua durante el día.

Se debe tener en cuenta que el ángulo ω_{eo} , es el que forma entre la proyección del vector solar en el plano este-oeste perpendicular a la superficie terrestre y la vertical, normal a esta última. Es importante recalcar que no se trata del ángulo horario.

Como se trabaja con la proyección del vector solar en el plano este-oeste-vertical, de momento se puede omitir el eje X , que coincide con el eje norte-sur. Así pues, se identifica como: ψ_i al ángulo formado entre la vertical y la línea que une al centro del espejo i con el centro del receptor, β_i a la inclinación del espejo i con respecto a la horizontal y θ_i al ángulo de reflexión, como se muestra en la Figura 1.

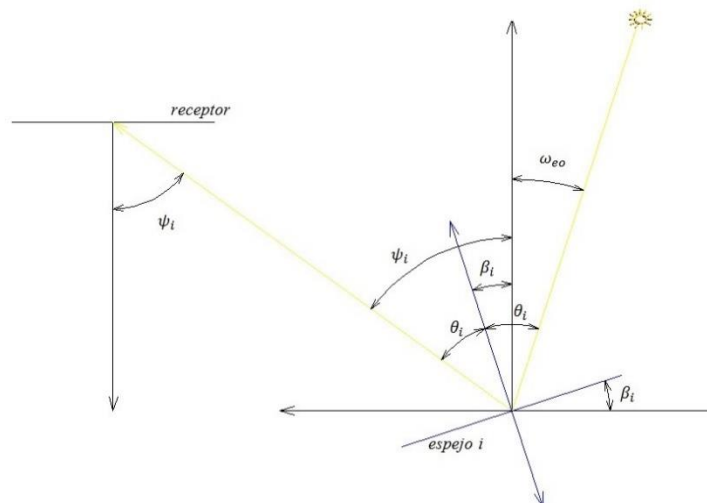


Figura 1: Descripción geométrica de un espejo del concentrador Fresnel.

En la Figura 2 se puede observar cómo, a la altura focal, la radiación solar cubre un área igual a la proyección de la sección transversal de los espejos con respecto al vector solar (línea morada). Se pudiera creer que la radiación a lo ancho de esta área es homogénea, sin embargo, no hay que perder de vista que esta proyección sería diferente para cada uno de los espejos y para cada momento del día, ya que depende del ancho de las facetas reflectoras, de la posición de cada una de estas y del ángulo del vector solar.

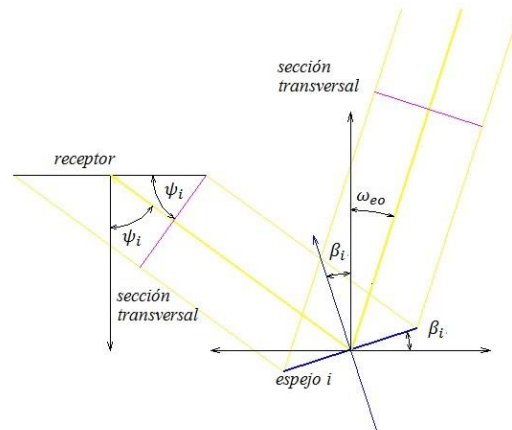


Figura 2: Proyección de la sección transversal de la radiación reflejada por los espejos, a la altura del foco.

Además, igualmente importante, es el desborde de la radiación por el efecto del cono solar, cómo se muestra en el esquema de la Figura 3, donde r_r es el extremo derecho del receptor y r_l , el izquierdo. El cono solar, ξ , se considera de $32'$ (4.65 mrad o 0.266°) (Duffie, 1991) y provoca que la radiación no sea homogénea en las orillas de la proyección de la radiación en la zona focal. A mayor distancia, mayor será el ancho de este desbordamiento.

Se han propuesto las siguientes ecuaciones para el cálculo del área mínima con un flujo radiativo homogéneo, estas se deben aplicar a cada uno de los espejos:

para empezar, de la Figura 3 se puede deducir que el ancho del receptor plano se puede calcular como muestra la ecuación 3, el signo negativo corresponde a un sistema cartesiano con el origen en el centro del receptor.

$$R_{pl} = r_r - r_l \quad (1)$$

donde:

$$r_r = L_n + \left(\frac{w}{2}\right) \cos(\beta_i) - \tan(\psi_i + \xi) \left[f - \left(\frac{w}{2}\right) \sin(\beta_i) \right] \quad (2)$$

$$r_l = L_n - \left(\frac{w}{2}\right) \cos(\beta_i) - \tan(\psi_i + \xi) \left[f + \left(\frac{w}{2}\right) \sin(\beta_i) \right] \quad (3)$$

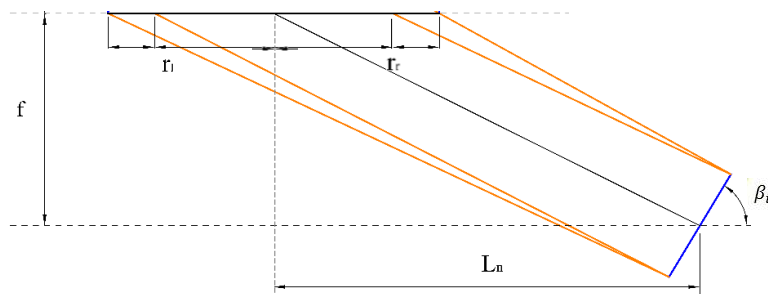


Figura 3: Desbordamiento en el foco provocado por el cono solar.

Por otro lado, para el trazado de rayos del concentrador lineal Fresnel con receptor plano se ha utilizado el software SolTrace del National Renewable Energy Laboratory (NREL), Figura 4. SolTrace es una herramienta óptica de simulación diseñada para modelar sistemas usados en la concentración de energía solar. El uso de SolTrace es gratuito y es utilizado tanto por la industria como por laboratorios y universidades (Wendelin Tim, 2016). Para analizar la distribución radiativa en el foco se utilizó un receptor virtual y se hicieron variaciones al ángulo de incidencia de la radiación solar ω_{eo} . Cada punto verde en la representa donde impacta o se refleja un rayo. En la Figura 4 están representados solo 70 rayos con líneas amarillas para fines de visualización.



XLV Semana Nacional de
Energía Solar
MÉXICO, CDMX, DEL 4 AL 8 DE OCTUBRE 2021



Asociación Nacional de Energía Solar



ISES
International
Solar Energy Society

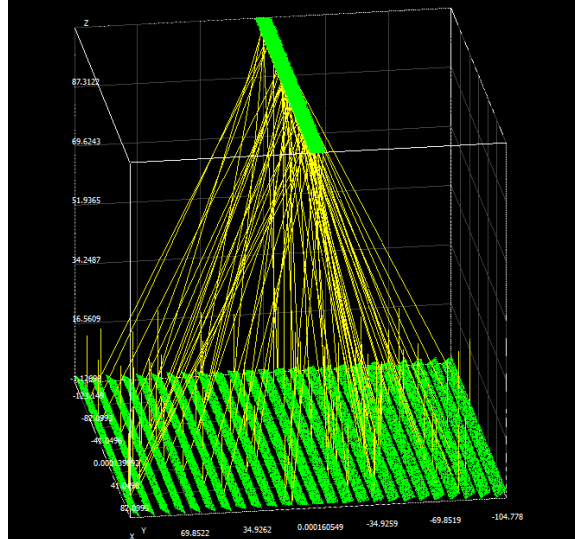


Figura 4: Trazado de rayos del concentrador lineal Fresnel con un receptor virtual y un ángulo de incidencia (ω_{eo}) de 0° hecho con SolTrace.

Estudio fotovoltaico:

En el estudio fotovoltaico se espera el ancho del área que tiene una distribución radiativa homogénea para proponer el ancho de la celda que constituirá al módulo fotovoltaico. Para este proyecto, el largo del módulo puede ser tan grande como la longitud del foco. Sin embargo, no hay que perder de vista se trata de un dispositivo modular, lo que implica que puede estar conectado en serie con equipos similares, en ese caso, el foco podría ser tan largo como se desee.

Es igualmente importante recordar que se está tratando de diseñar un dispositivo de bajo costo y fácil de construir, por lo que en la mayor parte de sus componentes, y especialmente en la celda fotovoltaica, vale la pena contemplar elementos que se puedan considerar “comunes”. Es decir, se podría proponer una celda fotovoltaica nueva, con una determinada cantidad de portadores de carga adecuada para el flujo radiativo, pero sería pensar en tecnología que aún no existe al igual que el proceso para crearla; o se pudiera pensar en celdas especiales para concentración solar, pero son muy costosas y difíciles de conseguir. Es por esto que se ha optado por acercarse a un fabricante de módulos para conocer mejor los siguientes factores:

- ¿Cuál celda es la que se perfila como la más usada en los próximos años en la industria fotovoltaica?
- ¿Cuál es el tamaño de celda más común?

El fabricante que ha accedido a colaborar es la empresa Solarever, que además ha facilitado la maquinaria, el material y su personal especializado, para construir el módulo fotovoltaico.

Por practicidad se ha establecido que el módulo fotovoltaico debe generar una tensión de al menos 18 V, que es lo mínimo recomendado para cargar una batería de 12 V, de ahí en más, todas las variables están sujetas a los que arroje el estudio óptico y las recomendaciones del fabricante.

ANÁLISIS Y RESULTADOS:

Luego de resolver las ecuaciones 2 y 3 para todos los espejos a diferentes ángulos de incidencia ω_{eo} , se ha encontrado que el área homogénea más pequeña es de 4.14 cm de ancha, y la genera el espejo de extremo derecho cuando ω_{eo} es de 45° . Esto indica que la influencia del factor de la perspectiva o proyección es mayor que la del desbordamiento provocado por el cono solar.

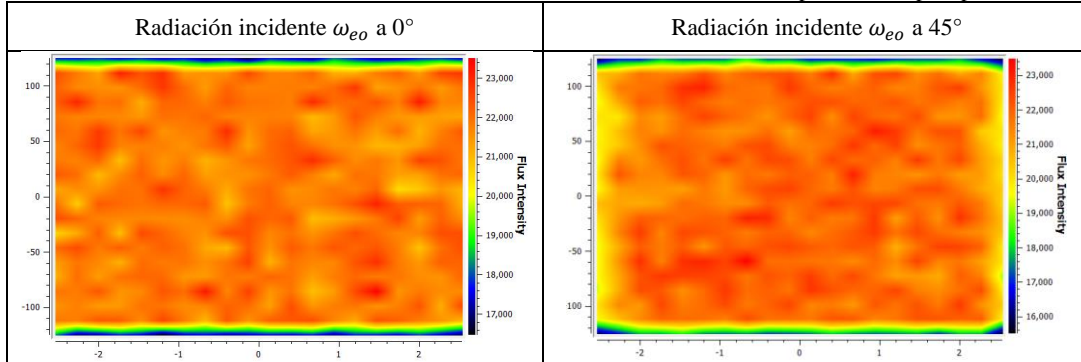
Lo anterior se corrobora con los trazados de rayos hechos con el software SolTrace, como se puede ver en la Tabla 1. Cuando el ángulo de incidencia de la radiación es de 45° el área homogénea se hace más angosta y apenas alcanza a superar los 4 cm de anchura. Además, se puede ver como la máxima intensidad radiativa alcanzada es apenas superior a los 23 soles.



XLV Semana Nacional de
Energía Solar
MÉXICO, CDMX, DEL 4 AL 8 DE OCTUBRE 2021



Tabla 1: Distribución radiativa en el foco del concentrador lineal Fresnel para un receptor plano.



Con esos datos se acudió con la empresa Solarever que, con base en su experiencia, reconocen a la celda de silicio monocristalino como la que se estará comercializando con mayor intensidad en el futuro cercano, comentan que el método para producirla se ha optimizado tanto que se ha vuelto económicamente viable y competitiva ante el silicio policristalino, que es menos eficiente pero que hasta hace unos años era la más empleada. Igualmente, desde su perspectiva como fabricantes, identifican a la de 158.75 mm X 158.75 mm como la celda fotovoltaica comercial más empleada en la construcción de módulos.

Con esta información se diseñó un módulo fotovoltaico con 36 celdas de silicio monocristalino, conectadas en serie con dos busbars, de 4.14 cm de ancho y 1/3 del largo de la celda comercial (5.29 cm). De esta forma se tiene un módulo fotovoltaico de 2.18 m de largo que generará una tensión de al menos 18 V, considerando un 0.5 V por celda, Figura 5. Hay que recordar que la tensión es independiente de la intensidad de la radiación.



Figura 5: Módulo fotovoltaico de 36 celdas de silicio monocristalino de 4.14 cm X 5.29 cm conectadas en serie con dos busbars.

Las celdas se cortaron con láser a 1/3 del largo de la comercial con la idea de aprovechar al máximo el material, Figura 6, de esta forma se obtendrán al menos 6 piezas de cada celda comercial. Son 6 y no 9 porque la celda comercial trae solo 5 busbars.

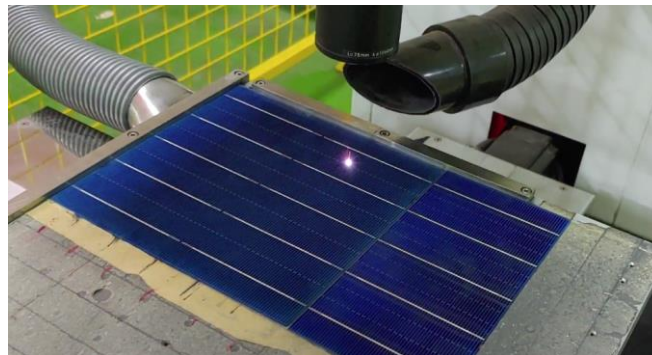


Figura 6: Corte laser de las celdas de silicio monocristalino.

El proceso de soldado de celdas se hizo a mano sobre una plancha caliente (28°C) debido a que las medidas del módulo no coincidían con las programadas en la sección de soldadura de la línea de producción, Figura 7.



XLV Semana Nacional de
Energía Solar
MÉXICO, CDMX, DEL 4 AL 8 DE OCTUBRE 2021



ANES
Asociación Nacional de Energía Solar



ISES
International
Solar Energy Society



Figura 7: Soldado de celdas se silicio monocristalino.

Solarever también dio acceso a su laminadora para el encapsulado de las celdas, Figura 8, se empleó una capa de EVA (etilvinilacetato) junto con una de tedlar, por el anverso y reverso de las celdas.

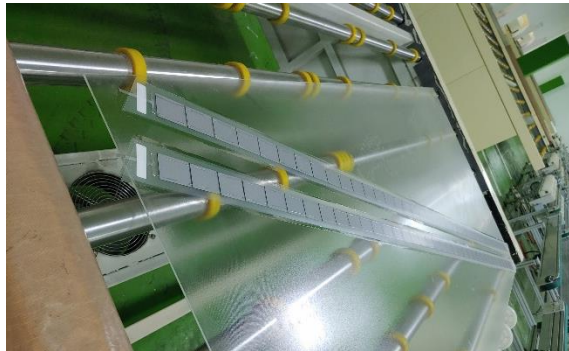


Figura 8: Celda dispuesta entre

En la Figura 9 se muestra una fotografía capturada con una cámara térmica de los ya módulos fotovoltaicos a la salida de la laminadora, se puede ver como aún están a 90.4 °C.

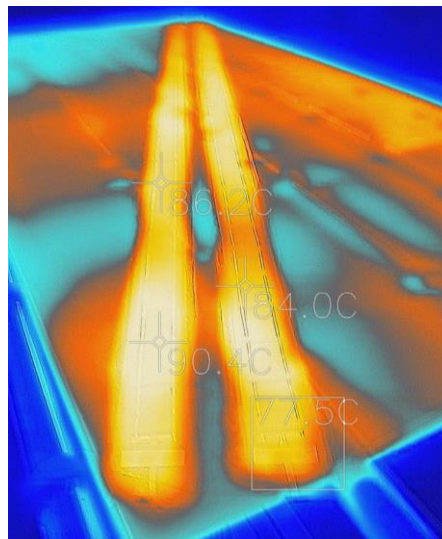


Figura 9: Fotografía de los módulos a la salida del proceso de laminado.

CONCLUSIONES:

En este trabajo se ha presentado el avance en el desarrollo de un concentrador solar híbrido térmico-fotovoltaico, determinando, primero con un estudio óptico, que un receptor de 4.14 cm de ancho asegura una distribución radiativa homogénea en su foco. Con esta dimensión se ha diseñado un módulo fotovoltaico de 36 celdas conectadas en serie con dos busbars, es decir de 2.18 m de largo, que generará una tensión de al menos 18 V.

Se ha presentado también evidencia fotográfica del proceso de construcción del módulo fotovoltaico con celdas de silicio monocristalino, este fue realizado con el apoyo de la empresa Solarever, que ha brindado asesoría, el material y acceso a sus equipos de corte láser, laminado y a su personal especializado para su elaboración.

Es evidente que aun queda trabajo por hacer para tener el dispositivo hecho, el siguiente paso es caracterizar los módulos, se buscará conocer su temperatura máxima de operación, la intensidad radiativa de saturación, la tensión y la corriente generada a diferentes intensidades.

En cuando al dispositivo general, queda pendiente el estudio de distribución radiativa para tecnologías venideras como la celda M10 y M12, se tiene la idea de que en esos casos la homogeneidad se podrá alcanzar con ajustes en las inclinaciones de las facetas reflectoras y los datos de saturación de las celdas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Gestión Tecnológica del IER-UNAM por llevar a cabo el contacto con la empresa Solarever y los convenios de colaboración correspondientes.

A la empresa Solarever, por su valiosa colaboración. Sus aportes tanto en lo teórico como en la construcción del módulo fotovoltaico fueron fundamentales para llevar a cabo este trabajo.

Este trabajo fue apoyado por PAPIIT-UNAM a través del proyecto IT100514 y del Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética a través del Proyecto 207450, "Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol)" y particularmente dentro del Proyecto Estratégico No. 70, "P70-Validación de estrategia para Empoderamiento mediante aprovechamiento energía solar".

REFERENCIAS

- A. G. Imenes, D.R Mills (2004). Spectral beam splitting technology for increased conversion efficiency in solar concentrating systems: a review, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 84, 51 p.
- S.A. Kalogirou, Y. Tripanagnostopoulos (2006). Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production, *Energy Conversion and Management* 47, 15 p.
- Y. TRIPANAGNOSTOPOULOS, TH. NOUSIA, et al. (2002). Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, *Solar Energy* 72, 2002. 18 p.
- Chemisana Villegas Daniel (2009). Diseño y caracterización de un concentrador térmico fotovoltaico cuasiestacionario para integración arquitectónica, Tesis doctoral, Universitat de Lleida, 279 p.
- Wendelin, Tim, Dobos Aron, Allan Lewandowski (2013). SolTrace: A ray-tracing code for complex solar optic systems, NREL, E.U.A., 19 p.
- Duffie J.A., Beckman W.A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Son Inc., New York, E.U.A., 919 p.