XVI Congreso Ibérico y XII Congreso Iberoamericano de Energía Solar Madrid, España, 20-22 junio 2018 ©Asociación Española de Energía Solar

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA CARACTERIZACIÓN DE CELDAS FOTOVOLTAICAS DE TRIPLE UNIÓN EN SIMULADOR Y CONCENTRADOR SOLAR

Pérez-Rábago Carlos ¹, González-Camarillo Héctor ¹, De-los-Cobos-Garduño Emma ², Pérez-Enciso Ricardo A. ³, García Rafael ³, Ochoa Doria ³

¹ Instituto de Energías Renovables-Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n Temixco, Morelos, 62588, (Morelos) México, <u>capr@ier.unam.mx</u>.

² División de Ciencias e Ingenierías de la Universidad de Guanajuato, Campus León, Loma del Bosque #103, Lomas del Bosque, Lomas del Campestre, 37150 León, Gto. cobosge2012@licifug.ugto.mx

³ Universidad de Sonora, Blvd. Encinas y Rosales s/n, Hermosillo, SonoraZ, 83000, México, rgarcia@cifus.uson.mx

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del análisis comparativo de dos diferentes caracterizaciones realizadas a celdas fotovoltaicas de triple unión sometidas a diferentes niveles de concentración, tanto en un simulador solar con concentración y un concentrador tipo horno solar. Con ambos sistemas de se consiguieron diferentes niveles de concentración de 220 hasta 2200 soles dentro del área de la celda de triple unión, estos niveles de concentración presentaron diferentes distribuciones de flujo radiativo. Se busco que el flujo radiativo concentrado fuera lo más homogéneo posible al menos en un área de tan solo 1 cm², la cual es la superficie de captación de las celdas de triple unión a ser analizadas. Se desarrollo un sistema de caracterización a través de una mesa automatizada de posicionamiento del arreglo experimental que permitió centrar la zona focal tanto para medir el flujo radiativo y ver su distribución, así como para centrar la celda en la zona con mayor homogenización del spot solar concentrado. En la evaluación de la distribución de flujo radiativo concentrado con el simulador solar se obtuvieron distribuciones de flujo radiativo menos homogénea que en el caso con el horno solar. Por otra parte, en la evaluación de la celda de triple unión el comportamiento en el simulador solar a bajas concentraciones (265 kW/m²) fue de 27.9% mientras que altas concentraciones (800 kW/m²) se redujo hasta un 17.9%. Por otra parte, en el caso del horno solar la eficiencia en casi todos los niveles de concentración fue alrededor del 30%.

PALABRAS CLAVES: Energía Solar, Celdas de triple unión, Concentrador Solar Anidolico, Simulador Solar de concentración.

ABSTRACT

In this paper we present the results of the comparative analysis of two different characterizations made to triple junction photovoltaic cells subjected to different concentration levels, both in a solar simulator with concentration and a solar oven-type concentrator. With both systems, different concentration levels of 220x to 2200x were achieved within the area of the triple junction cell, these concentration levels presented different distributions of radiative flow. It was sought that the concentrated radiative flow was as homogeneous as possible at least in an area of only 1 cm2, which is the surface of capture of the triple junction cells to be analyzed. A characterization system was developed through an automated table of positioning of the experimental arrangement that allowed to focus the focal area both to measure the radiative flow and see its distribution, as well as to center the cell in the area with the highest homogenization of the concentrated solar spot. . In the evaluation of the distribution of concentrated radiative flow with the solar simulator radiative flow distributions less homogeneous than in the case with the solar furnace were obtained. On the other hand, in the evaluation of the electrical efficiency of the triple-junction cell, the behavior in the solar simulator at low concentrations (265 kW/m²) was 27.9%, while high concentrations (800 kW/m²) were reduced to 17.9%. On the other hand, in the case of the solar furnace the efficiency in almost all the levels of concentration was around 30%.

KEYWORDS: Solar Energy, Triple Junction Cells, Anidolico Solar Concentrator, Solar Concentration Simulator.

INTRODUCCIÓN

En la búsqueda por conseguir cada vez mayores eficiencias de generación eléctrica mediante celdas

fotovoltaicas, una opción prometedora es aquélla con celdas de triple unión basadas en los elementos de los grupos III-V de la tabla periódica (Jain, 2013). Éstas deben su alta eficiencia al apilamiento de celdas con bandas prohibidas crecientes puesto que se aprovecha casi todo el espectro solar (Cotal *et al.*, 2009). En este trabajo se presenta los resultados de caracterizar celdas formadas por uniones monolíticamente apiladas In0.5Ga0.5P, In0.01Ga0.99As y Ge (Geary *et al.*, 2014). Dichas celdas están siendo utilizadas en un sistema de concentración compuesto por tres ópticas desarrollado por la Universidad de Arizona. La primera óptica consiste en un espejo conformado en forma de concentrador parabólico con una distancia focal de 1.5 m con un área de captación de 2.6 m², la segunda óptica consiste en una esfera de cuarzo de 85 mm de diámetro que redirecciona los rayos al interior de una carcasa de 150 mm de diámetro y una tercera óptica con cuatro calidoscopios que reconcentran los rayos a los cuatro arreglos de celdas de triple unión, con un total de 36 celdas. Con las tres ópticas se consiguen una concentración homogénea de la radiación solar de hasta 950x para una producción de energía eléctrica de 800 W_e (Stalcup *et al.*, 2016).

Para realizar la caracterización de las celdas de triple unión se seleccionaron dos sistemas de concentración distintos, los cuales proporcionan niveles de concentración pico entre 200 y 1200x en ambos casos. El primero fue un simulador solar de 7 kW_e, el cual se compone de una lámpara de arco de Xenón de 7 KW_e con un espejo elipsoide truncado (Gómez, Gonzalez-Aguilar and Romero, 2011), el segundo sisteme de conentración consistió en un horno solar de 1.27 kW_t desarrollado en Instituto de Energías Renovables de la UNAM (Pérez-Rábago *et al.*, 2010), este concentrador tiene la posibilidad de generar flujos homogéneos en un área considerable, tan solo ajustando la zona de caracterización, o bien el receptor, sobre el eje focal de concentrador (Perez-Enciso *et al.*, 2016), por tal razón se definió a este dispositivo como concentrador anidólico (CosAn).

Los simuladores solares con concentración permiten reproducir en un laboratorio la radiación que se puede obtener con sistemas solares de concentración y estudiar el efecto que la radiación concentrada tiene en procesos termoquímicos o bien en dispositivos como celdas y/o módulos fotovoltaicos de muy alta eficiencia (Krueger, Davidson and Lipiński, 2011). El simulador solar empleado consiste en un proyector de cine con una lámpara de arco de Xenón de 7 KW_e, Osram XBO® 7000 W/HS OFR, ubicada en el primer foco de un espejo elíptico truncado, el cual reproduce la imagen del arco de la lámpara en el segundo foco (Gómez, Gonzalez-Aguilar and Romero, 2011). Las dimensiones del elipsoide de revolución que forma el espejo del concentrador se definen a partir de las distancias de los focos los cuales se sitúan a 55 y 825 mm del vértice, es decir la distancia entre los dos focos es de 770 mm. La lámpara de arco de Xenón consiste en un cátodo con forma puntiaguda y un ánodo con forma redondeada separados 10,4 mm contenidos en un bulbo elipsoidal de cuarzo de 78 mm de diámetro. La intensidad eléctrica en condiciones estacionarias es de 160 A y un potencial de 45 V_{cd}. El espectro experimental medido de la lámpara de Xenón se aproxima al espectro de un cuerpo negro a 5762 K. este se aproxima al espectro solar en el rango visible, con excepción de un pico en torno a los 480 nm y en el infrarrojo cercano es donde se presentan las discrepancias más significativas (Petrasch *et al.*, 2007), como se observa en la figura 1.



Figura 1: Espectros de la lámpara de xenón, solar y de un cuerpo negro a 5762 K

El horno solar tipo <u>Co</u>ncentrador <u>So</u>lar <u>An</u>idólico (CosAn) consta de un helióstato con cuatro facetas planas de 1.25 m de lado, que forman un área total de 5.6 m² que refleja los rayos del Sol paralelos al eje focal de un conjunto de 18 espejos esféricos de 30 cm de diámetro y un espesor de 1.9 cm. Las distancias focales de los espejos se agrupan en tres conjuntos según su disposición al eje focal: A, B y C (ver Fig. 2). La distancia a la que focalizan cada uno de los espejos dependiendo el grupo es de 2.098 m para los espejos A, 2.074 m para los espejos B, 2.025 m para los espejos C, obteniendo una distancia focal total para el concentrador de 2.0 m. Cada faceta tiene la capacidad de orientarse de forma manual por medio de dos tornillos y un soporte esférico para alinear el punto focal en el plano del receptor. Los espejos de este dispositivo están fabricados de vidrio aluminizado con una reflectividad de 0.92. El área total de concentración es 1.274 m².



Figura 2: Distribución de los grupos de espejos del concentrador.

En los últimos años, se llevaron a cabo varias modificaciones en el dispositivo, así como también caracterizaciones ópticas y térmicas (Jaramillo *et al.*, 2008)(Pérez-Rábago *et al.*, 2006). El concentrador se diseñó inicialmente para obtener spot solar de 2,5 cm de diámetro con un error óptico de 2 mrad realizando un seguimiento del sol en una montura ecuatorial , una concentración media cercana a los 3000 soles y un pico de concentración solar por encima de 4750x (Jaramillo *et al.*, 2008), sin embargo, debido a la baja reflectividad de los espejos de segunda superficie del helióstato (0.86 aproximadamente), los errores ópticos del helióstato y las distintas sombras de la mesa, atenuador y otros dispositivos, la concentración pico se reduce a tan solo 2200x (ver figura 3).



Figura 3: Horno Solar tipo Concentrador Anidólico.

MONTAJE EXPERIMENTAL

Para el análisis comparativo de las celdas de triple unión en los dos sistemas de concentración con similares niveles de concentración solar, se desarrolló una mesa automatizada con dos grados de libertad en los ejes x, y (con un desplazamiento de 350 mm en cada eje), la cual tiene la misma altura en ambos sistemas, donde el eje x se alineó al eje focal de los dos concentradores. Por otra parte, para el diseño experimental de la caracterización de las celdas fotovoltaicas de triple unión se requirió mover la zona focal en el eje "y" en tres posiciones o estaciones de medición donde se alinearon tres sistemas o componentes: 1) el sensor de radiación

tipo Gardon, con el que se midió el pico máximo de la distribución de radiación concentrada por ambos concentradores, 2) el blanco lambertiano refrigerado y la cámara CCD monocromática con lo cual se determinó la intensidad de radiación concentrada que incidió en la posición sobre el eje focal "x" determinada, 3) la celda de triple unión soportada en un intercambiador de calor refrigerado con agua que garantizó que la celda se mantuviera a una baja temperatura (por debajo de 70 °C). La mesa de caracterización tiene la capacidad de posicionar la zona focal en cualquiera de estas estaciones sin que se modifique la distribución de flujo, esto para los dos sistemas de concentración (ver figura 4). Por otra parte, durante todo el tiempo de la experimentación se realizaron mediciones de la radiación directa (DNI), en el caso del CoSAn, y se estableció como condición de experimentación que el DNI fuera mayor de 850 W/m² con variaciones no mayores al 5%, esto para conseguir estados estables durante las pruebas experimentales, ver figura 4.



Figura 4: Esquema del diseño experimental: a) simulador solar, b) CosAn.

Para la caracterización de la celda de triple unión se fijó al centro de la pared de cobre del intercambiador de calor, la remoción de calor se realizó con un flujo de agua de 4 litros por minuto, dicho intercambiador es capaz de mantener la superficie posterior de la celda a una temperatura por debajo de 60° C. La temperatura de la celda fue monitorizada con un termopar tipo "T" colocado entre la pared del intercambiador de calor y la parte posterior de la celda de triple unión. Para garantizar la conducción de calor de la celda a la pared del intercambiador de calor se aplicó a la cara posterior de la celda una pasta de alta conductividad térmica. Debido a que la zona focal es mayor al tamaño de la celdase colocó una máscara de 1 x 1 cm de lámina de alúmina, la cual resiste hasta 1800°C y tiene una alta reflectividad. La finalidad de esta mascara fue proteger los componentes y conexiones dejando solamente expuesta a la radiación concentrada un área de 1 cm^2 .

La caracterización en ambos casos, Simulador Solar y CoSAn, consistió en el desplazamiento de la celda fotovoltaica, así como el blanco lambertiano y el radiomento sobre el eje focal de cada uno de los concentradores, con lo cual se obtuvieron diferentes niveles de radiación incidente concentrada. En cada una de las posiciones se requirió pasar por las tres zonas, o estaciones del arreglo experimental (1- radiómetro, 2- blanco lambertiano y 3- celda de triple unión). Se requirió el monitoreo de la temperatura de la parte posterior de la celda a través de un termopar tipo K incrustado en el espacio entre la celda y la pared del intercambiador de calor para tener un control del tiempo en que la celda debería estar expuesta ante la radiación concentrada

y no afectar la eficiencia debido al incremento en la temperatura de la celda.

Los ejes focales de ambos sistemas de concentración (simulador solar y CoSAn) tienen la misma altura, lo que permite realizar la caracterización con la misma mesa capaz de establecer un barrido tan solo en dos ejes (x, y), siendo el eje y, el desplazamiento sobre la línea focal de los sistemas de concentración en ambos casos, y el eje x posiciona las tres estaciones de medición, sin hacer ningún ajuste en la altura de la mesa de caracterización (ver la figura 4).

Para evaluar la eficiencia eléctrica de las celdas de triple unión se empleó un trazador de curvas I-V PVPM 2540C @ 250V / 40^a y se tomaron curvas I-V para cada nivel de concentración en ambos sistemas de concentración.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con las imágenes CCD tomadas en el blanco lambertiano y las mediciones del flujo radiativo con el radiómetro gardon, se determinaron las diferentes distribuciones de flujo radiativo para las diferentes posiciones sobre el eje focal (x) de ambos sistemas de concentración donde se evaluó la celda de triple unión.

Distribución de flujo radiativo en el simulador solar

En la figura 5 se muestran los perfiles de distribución de flujo radiativo concentrado que se obtuvieron al desplazar el arreglo experimental desde una posición a 0.04 m hasta 0.1 m de la zona focal del simulador solar de concentración desplazando hacia el eje "y" positivo de la mesa. En esta figura, se pueden observar la distribución de flujo radiativo con un pico máximo de aproximadamente 800 kW/m² correspondiente a colocar el sistema de caracterización a 0.04 m de la zona focal del concentrador, mientras que para una distancia de 0.1 m el flujo radiativo pico es en aproximadamente 265 kW/m². Cabe destacar que el área de interés para la caracterización es de tan solo 1 x 1 cm centrado en la distribución de flujo, esto debido a que es esta el área de apertura de la celda de triple unión, con la ayuda de la mesa de posicionamiento, la cela de triple unión se centro en el cm² de apertura para ser irradiado por el spot concentrado, por ello, se buscó que el flujo radiativo dentro de esta área fuera lo más homogéneo posible, cosa que en los niveles más bajos de radiación si se cumplen y no así en los niveles de mayor nivel de concentración. En el caso del simulador solar, las distribuciones de flujo radiativo, sobre todo en los casos más cercanos a la zona focal, donde se obtienen los niveles de radiación más altos, en este se presenta una distribución estándar relativamente alta, con lo que se determina una distribución de flujo radiativo poco homogenización, donde para la posición de 0.06 m de la zona focal, el flujo promedio, dentro del 1 cm² del centro, es de 696 kW/m² con una desviación estándar (σ) de 90 kW/m², donde la σ representa el 13% del flujo promedio, mientras que para el caso de la posición de



0.1 m del foco el promedio es de 443 kW/m² con una σ de 14 kW/m², donde esto representa tan solo el 3%, como se puede observar en el resumen de los datos de la tabla 1.

Figura 5: Distribución de flujo radiativo del simulador solar fuera de la zona focal en el eje y.

Potencia Flujo Radiación concentrada simulador solar concentrada Potencia generada eléctrica por la celda triple unión (1 cm^2) (1 cm^2) Eficiencia Promedio σ (kW/m^2) (kW/m^2) (W) (W) (%) 265 26.5 7.4 27.9% 305 30.5 8.0 26.4% 35.2 8.8 24.9% 352 14 44.3 10.5 24.7% 443 488 17 48.8 11.7 23.4% 563 36 56.3 12.3 20.5%696 90 69.6 13.7 19.6% 800 80.0 14.3 17.9%

Tabla 1. Resultados del flujo radiativo concentrado por el simulador solar dentro de 1 cm² central, zona donde se caracterizó la potencia generada por la celda de triple unión.

Distribución de flujo radiativo en el CosAn

En la figura 6 se muestran los perfiles de distribución de flujo radiativo concentrado por el CoSAn al desplazar el sistema de caracterización desde una posición a 0.04 hasta 0.075 m de la zona focal del concentrador de concentración desplazando hacia el eje "y" positivo. En esta figura, se pueden observar la distribución de flujo radiativo con un pico máximo de aproximadamente 945 kW/m² correspondiente a colocar el sistema de caracterización a 0.04 m de la zona focal, mientras que para una distancia de 0.075 m el flujo radiativo pico es en aproximadamente 266 kW/m².



Figura 6: Distribución de flujo radiativo del CoSAn fuera de la zona focal en el eje y

Por otra parte, en el caso del CoSAn, las distribuciones de flujo radiativo, presenta un comportamiento más estable en la desviación estándar en el cambio de la posición del receptor en el eje focal. Donde para una posición de 0.04 m de la zona focal, el flujo promedio, dentro de 1 cm², es de 728.3 kW/m² con una σ de 37 kW/m², donde esto representa el 5%, mientras que para el caso de la medición a 0.065 m de la zona focal del

CoSAn el promedio es de 395 kW/m² con una σ de 24 kW/m², donde esto representa el 6%, como se puede observar en la tabla 2. Con ello se puede ver que las condiciones de flujo radiativo concentrado para el área de 1 cm² llega a ser mucho más homogéneo entre los diferentes niveles de concentración y sobre todo en comparativo con las distribuciones del simulador solar.

Flujo Radiación CoSAn (1 cm²)		Potencia concentrada (1 cm ²)	Potencia generada eléctrica por la celda triple unión	Eficiencia
Promedio (kW/m ²)	σ (kW/m²)	(W)	(W)	(%)
266.3	29.7	26.6	2.8	10.6%
328.1	27.6	32.8	8.7	26.5%
395.5	24.4	39.6	12.3	31.0%
492.6	24.7	49.3	14.6	29.7%
573.7		57.4	17.7	30.8%
610.9	25.0	61.1	18.7	30.6%
728.3	36.9	72.8	20.2	27.7%

Tabla 2. Flujo radiativo concentrado por el concentrador CoSAn dentro de 1 cm² donde se caracteriza la potencia generada por la celda de triple unión.

Análisis de eficiencia eléctrica en las celdas de triple unión en ambos sistemas de concentración

De las curvas I-V de las mediciones en la estación 3, se determinaron las eficiencias brutas de la celda, las cuales se muestran en la figura 8, donde se observan las eficiencias de la celda en función del flujo radiativo concentrado promedio, tano para el simulador solar, así como para el simulador solar que van de 265 a 800 kW/m² para el caso del simulador solar y de 266 a 728 kW/m². La eficiencia eléctrica de la celda de triple unión irradiado por el simulador solar a bajas concentraciones (265 kW/m²) fue de 27.9% mientras que altas concentraciones (800 kW/m²) se redujo hasta un 17.9%. La razón por lo que ocurre este decremento en la eficiencia debido al incremento en el flujo radiativo se debe a que a mayor flujo existe menos homogenización en el flujo y esto produce gradientes de temperatura superficial de la celda que son muy sensibles a la eficiencia. Por otra parte, a mayor radiación concentrada se registró mayor incremento en la temperatura posterior de la celda llegando a ser de hasta 105°C para el caso del flujo de 800 kW/m² (ver figura 7).

Por otra parte, en el caso del CoSAn las eficiencias eléctricas fueron constantes en la mayor parte de la evaluación, por encima del 30%, sin embargo, en el caso de la primera medición de 266 kW/m² donde su distribución de flujo radiativo no fue tan homogéneo como el resto de las otras mediciones (con una σ de 29.7 kW/m², que representa 11.1% de la distribución del flujo).



Figura 7: Eficiencia de la celda de triple unión en función de la potencia de radiación concentrada y la temperatura de la parte posterior de la celda.

CONCLUSIONES

Para conseguir diferentes niveles de concentración con el simulador solar y el CoSAn se desplazó el sistema de caracterización sobre el eje focal para conseguir diferentes niveles de concentración de 220 a 2200 soles, sin embargo, debido a que para la evaluación de las celdas de triple unión se requería el mayor nivel de homogeneidad en el flujo radiativo, se descartaron los niveles de concentración más altos y que resultaban ser los más cercanos a la zona focal de ambos sistemas.

En el caso del simulador solar el análisis de la distribución de flujo radiativo para las diferentes posiciones se encontró que para el área de 1 cm², para la posición de 0.06 m de la zona focal, el promedio en el flujo radiativo es de 696 kW/m² con una σ de 90 kW/m², donde la S representa el 13% del flujo promedio, mientras que para el caso de la posición de 0.1 m del foco el promedio es de 443 kW/m² con una σ de 14 kW/m², donde esto representa tan solo el 3%. Lo que indica que para el simulador solar a menor flujo radiativo, mayor nivel de homogenización.

Para el CoSAn, las distribuciones de flujo radiativo, presenta un comportamiento más constante en la S en el cambio de la posición del receptor en el eje focal. Donde para la posición de 0.04 m de la zona focal, el flujo promedio, fue de 728.3 kW/m² con una σ de 37 kW/m², donde esto representa el 5%, mientras que para el caso de la medición a 0.065 m de la zona focal del CoSAn el promedio es de 395 kW/m² con una σ de 24 kW/m², donde esto representa el 6%.

La eficiencia eléctrica en el caso del CoSAn en casi todos los niveles de concentración que se evaluaron fue alrededor del 30%. Esto se relaciona con el hecho de que el CoSAn produce un flujo radiativo más homogéneo que el simulador solar y con ello no se producen gradientes de temperatura superficial que se vea afectada la eficiencia eléctrica.

El incremento de la intensidad de radiación del espectro en la zona del infrarrojo en el caso de la lámpara de Xenón del simulador solar produce un incremento de la temperatura superficial en comparación de un concentrador solar como es el caso del CoSAn. Este incremento en la temperatura superficial se ve reflejado en la reducción de la eficiencia eléctrica de la celda de triple unión.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado con fondos de CONACYT del Proyecto CEMIE-Sol P69 " Aplicación de recubrimientos selectivos de níquel/níquel negro electrodepositados en prototipos de colectores solares y comparación con colectores comerciales".

REFERENCIAS

Cotal, H. *et al.* (2009) 'III–V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics', *Energy Environ. Sci.*, 2(2), pp. 174–192. doi: 10.1039/B809257E.

Geary, A. *et al.* (2014) 'Production-Ready 800W HCPV Power Conversion Unit (PCU) for use at Dish Focus', pp. 4–6.

Gómez, F., Gonzalez-Aguilar, J. and Romero, M. (2011) 'Experimental 3D flux distribution of a 7 kWe-solar simulator', *SolarPaces Conference*.

Jain, N. (2013) 'Design of Iii-V Multijunction Solar Cells on Silicon Substrate', p. 70.

Jaramillo, O. a. *et al.* (2008) 'A flat-plate calorimeter for concentrated solar flux evaluation', *Renewable Energy*, 33(10), pp. 2322–2328. doi: 10.1016/j.renene.2008.01.020.

Krueger, K. R., Davidson, J. H. and Lipiński, W. (2011) 'Design of a New 45 kW[sub e] High-Flux Solar Simulator for High-Temperature Solar Thermal and Thermochemical Research', *Journal of Solar Energy Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 133(1), p. 011013. doi: 10.1115/1.4003298.

Perez-Enciso, R. *et al.* (2016) 'A simple method to achieve a uniform flux distribution in a multi-faceted point focus concentrator', *Renewable Energy*, 93, pp. 115–124. doi: 10.1016/j.renene.2016.02.069.

Pérez-Rábago, C. A. *et al.* (2006) 'Heat transfer in a conical cavity calorimeter for measuring thermal power of a point focus concentrator', *Solar Energy*, 80(11), pp. 1434–1442. doi: 10.1016/j.solener.2006.03.006.

Pérez-Rábago, C. A. *et al.* (2010) 'Mini-Solar Furnace by Using a Point Focus Solar Concentrator', *SolarPaces Conference*, (1), pp. 1–8.

Petrasch, J. *et al.* (2007) 'A Novel 50 kW 11,000 suns High-Flux Solar Simulator Based on an Array of Xenon Arc Lamps', *Journal of Solar Energy Engineering*, 129(4), p. 405. doi: 10.1115/1.2769701.

Stalcup, T. *et al.* (2016) 'REhnu Dish-Based CPV : Module Performance and Planned 100 kW Plant', *AIP Conference Proceedings*, 1766.