



Universitat de Lleida

Desarrollo de elementos ópticos innovadores para sistemas de ultra-alta concentración fotovoltaica. Análisis del impacto de la no uniformidad espacial y espectral

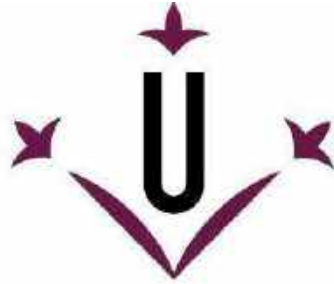
José Manuel Saura García

<http://hdl.handle.net/10803/673570>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



Universitat de Lleida

TESI DOCTORAL

Desarrollo de elementos ópticos innovadores para
sistemas de ultra-alta concentración fotovoltaica.
Análisis del impacto de la no uniformidad espacial y
espectral

José Manuel Saura García

Memòria presentada per optar al grau de Doctor per la Universitat de Lleida
Programa de Doctorat en Enginyeria i Tecnologies de la Informació

Director/a

Daniel Chemisana Villegas
Eduardo Fernández Fernández

Tutor/a

Daniel Chemisana Villegas

2021

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mis directores de tesis Daniel y Eduardo, por haberme dado la oportunidad de realizar una tesis doctoral en un campo que me apasiona y haberme enseñado tanto durante estos años. Su apoyo, supervisión y dedicación han sido fundamentales para la conclusión con éxito de este proyecto, gracias. Asimismo, quisiera agradecer también a Florencia y Pedro Rodrigo por la dedicación y esfuerzo para poder sacar esta tesis adelante.

Agradezco a todos los profesores y compañeros del Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática de la UJA, así como a los del Departamento de Medi Ambient i Ciències del Sol de la UDL, ya que siempre han estado ahí para hacer este camino un poco más sencillo.

Agradezco especialmente a los compañeros, profesores e investigadores del CEACTEMA por sus enseñanzas y enorme tiempo dedicado tanto en laboratorio como en la oficina mediante el cual hemos aprendido juntos, entre otras muchas cosas, acerca del fenómeno de la uniformidad.

Agradezco a todos mis compañeros de la UDL por el apoyo desinteresado, aprendizaje adquirido y buen ambiente de trabajo generado durante mi estancia en Lleida.

Quisiera agradecer profundamente a mi familia, en especial a mis padres, por todo el esfuerzo y empeño por proporcionarme la mejor formación posible. He tenido la suerte de hacer lo que me gusta y se lo debo a ellos.

Agradezco a mi pareja Beatriz por su paciencia y ánimo en los momentos más duros en los que solo pensaba en abandonar el doctorado. Siempre has sabido sacarme una sonrisa y levantarme el ánimo para continuar con más ganas.

Para finalizar me gustaría hacer extensivos estos agradecimientos al grupo de Weros que durante estos años me han ayudado, de una forma u otra, a desconectar y a ser feliz.

A todos ellos, muchas gracias.

Summary

The main aim of Concentrator Photovoltaics (CPV) is to replace expensive semiconductor material with cheaper optical devices. CPV is capable of using highly efficient multi-junction solar cells (MJSC) that would be very expensive if concentration was not used. These cells are composed of several subcells with different energy absorption bands connected in series, which allows a better exploitation of the solar spectrum.

One aspect of concern when CPV systems operate in real conditions is the impact of non-uniform illumination on the solar cell. This lack of uniformity is generated by the use of concentrator optics or other external effects such as partial shading. These can produce differences in the intensity of illumination on the cell surface, Gaussian irradiance profiles or chromatic aberration effects.

In this thesis, it is intended to broaden the knowledge referred to the behaviour of photovoltaic devices when they are highly influenced by this phenomenon. For this purpose, an experimental setup was developed to generate and characterise non-uniformity patterns under controlled laboratory conditions, as well as to electrically measure their impact on a MJSC. In this sense, it was possible to quantify the distribution of absolute and spectral irradiance for the range of the top and middle subcells. From the most relevant results, it is worth highlighting the different behaviour shown by the refractive and reflective optics regarding the spatial and spectral non-uniformities.

Subsequently, the non-uniformity effects produced by the shading generated on the concentrator optics on different CPV receivers were studied. The obtained results indicated that shading not only contributes to reducing spatial uniformity, but also introduces additional spectral phenomena. In addition, it was experimentally verified that the units incorporating SOE presented a more stable behavior against shading conditions.

In parallel, an optical design at ultra-high concentration (UHCPV) was proposed making use of achromatism and compactness provided by the prototype design in order to improve the competitiveness of the technology. The optical system consists of a reflective concentrator based on the Cassegrain-Koehler design that allows concentrating the rays from four independent and symmetrical optical units onto a single solar cell. Different geometric configurations (2000 - 6000x) at UHCPV were analysed using a ray tracing model. Finally, the selected design, at 3015x, was manufactured and experimentally characterised, obtaining an effective concentration of 938 suns with an angular tolerance to misalignment of $AA \pm 0.30^\circ$ and an optical efficiency of 31%.

Resumen

El objetivo de la concentración fotovoltaica (CPV) es reemplazar material costoso del semiconductor por dispositivos ópticos más económicos. La CPV es capaz de utilizar células muy eficientes multi-unión (MJSC) que serían muy caras en caso de no utilizar concentración. Estas células están compuestas por varias subcélulas con diferentes bandas de absorción de energía conectadas en serie, lo que permite un mayor aprovechamiento del espectro solar.

Un aspecto que preocupa cuando los sistemas CPV operan en condiciones reales es el impacto de la iluminación no-uniforme sobre la célula solar. Esta falta de uniformidad viene generada por el uso de óptica concentradora u otros efectos externos como puede ser el sombreado parcial. Éstas pueden producir diferencias en la intensidad de iluminación sobre la superficie de la célula, perfiles de irradiancia gaussianos o efectos de aberración cromática.

En esta tesis, se pretende ampliar el conocimiento referido al comportamiento de los dispositivos fotovoltaicos cuando están altamente influenciados por este fenómeno. Con este propósito, se desarrolló un montaje experimental para generar y caracterizar patrones de no-uniformidad en condiciones controladas de laboratorio, así como medir eléctricamente su impacto sobre una MJSC. En este sentido, se consiguió cuantificar la distribución de la irradiancia absoluta y espectral para el rango de las subcélulas *top* y *middle*. De los resultados más relevantes, cabe destacar el diferente comportamiento que muestran los sistemas refractivos y reflexivos considerando las no-uniformidades espaciales y espectrales. Posteriormente, se estudiaron los efectos de no-uniformidad producidos por el sombreado generado sobre la óptica concentradora en diferentes receptores CPV. Analizando los resultados, se pudo concluir que el sombreado no sólo contribuye a reducir la uniformidad espacial, sino también introduce fenómenos espectrales adicionales. Además, se comprobó experimentalmente que las unidades que incorporaban un elemento óptico secundario (SOE) presentaban un comportamiento más estable frente al sombreado.

En paralelo, se propuso un diseño óptico a concentraciones ultra altas (UHCPV) haciendo uso del acromatismo y la compacidad proporcionados por el diseño del prototipo para mejorar la competitividad de la tecnología. El sistema óptico consiste en un concentrador reflexivo basado en el diseño Cassegrain-Koehler que permite concentrar los rayos desde cuatro unidades ópticas simétricas e independientes sobre una única célula solar. Mediante un modelo por trazado de rayos se analizaron diferentes configuraciones geométricas (2000 - 6000x) a UHCPV. Finalmente, el diseño elegido, a 3015x, se fabricó y caracterizó experimentalmente, alcanzando una concentración efectiva de 938 soles con una tolerancia angular al desalineamiento de $AA \pm 0.30^\circ$ y una eficiencia óptica del 31% .

Resum

L'objectiu de la concentració fotovoltaica (CPV) és reemplaçar material costós de semiconductor per dispositius òptics més econòmics. La CPV és capaç d'utilitzar cèl·lules multiunió (MJSC) molt eficients que serien molt cares en cas de no utilitzar concentració. Aquestes cèl·lules estan compostes per diverses subcèl·lules amb diferents bandes d'absorció d'energia connectades en sèrie, la qual cosa permet un major aprofitament de l'espectre solar. Un aspecte que preocupa quan els sistemes CPV operen en condicions reals és l'impacte de la il·luminació no-uniforme sobre la cèl·lula solar. Aquesta manca d'uniformitat és generada per l'ús d'òptica concentradora o altres efectes externs com pot ser l'ombreig parcial. Aquestes poden produir diferències en la intensitat d'il·luminació sobre la superfície de la cèl·lula, perfils d'irradiància gaussians o efectes d'aberració cromàtica.

En aquesta tesi, es pretén ampliar el coneixement referit al comportament dels dispositius fotovoltaics quan estan altament influenciats per aquest fenomen. Amb aquest propòsit, es va desenvolupar un muntatge experimental per generar i caracteritzar patrons de no-uniformitat en condicions controlades de laboratori, així com mesurar elèctricament el seu impacte sobre una MJSC. En aquest sentit, es va aconseguir quantificar la distribució de la irradiància absoluta i espectral per al rang de les subcèl·lules *top* i *middle*. Dels resultats més rellevants, cal destacar el diferent comportament que mostren els sistemes refractius i reflexius a les no-uniformitats espacial i espectral.

Posteriorment, es van estudiar els efectes de no-uniformitat produïts per l'ombreig generat sobre l'òptica concentradora en diferents receptors CPV. Analitzant els resultats, es va poder concloure que l'ombreig no només contribueix a reduir la uniformitat espacial, sinó també introdueix fenòmens espectrals addicionals. A més, es va comprovar experimentalment que les unitats que incorporaven un element òptic secundari (SOE) presentaven un comportament més estable davant l'ombreig.

Paral·lelament, es va proposar un disseny òptic a concentracions ultra altes (UHCPV) fent ús de l'acromatisme i la compacitat proporcionats pel disseny del prototip per millorar la competitivitat de la tecnologia. El sistema òptic consisteix en un concentrador reflexiu basat en el disseny Cassegrain-Koehler que permet concentrar els raigs des de quatre unitats òptiques simètriques i independents sobre una única cèl·lula solar. Mitjançant un model per traçat de raigs es van analitzar diferents configuracions geomètriques (2000 - 6000x) a UHCPV. Finalment, el disseny triat, a 3015x, es va fabricar i caracteritzar experimentalment, aconseguint una concentració efectiva de 938 sols amb una tolerància angular al desalineament d' $AA \pm 0.30^\circ$ i una eficiència òptica del 31%.

Tabla de contenidos

Capítulo 1: Introducción	13
1. Contexto energético y motivación.....	15
2. Objetivos de la tesis.....	17
3. Estructura de la tesis.....	19
Capítulo 2: Fundamentos de sistemas CPV, estado del arte de la UHCPV y la uniformidad....	23
1. Fundamentos de sistemas CPV	25
2. Estado del arte de la UHCPV	31
3. Estado del arte sobre la uniformidad.....	37
Capítulo 3: Generación, caracterización experimental y por simulación de los patrones de no-uniformidad y su impacto eléctrico en una MJSC	50
1. Introducción.....	52
2. Resultados y contribución al estado del arte	52
3. Publicaciones.....	55
Capítulo 4: Introducción de óptica homogeneizadora para paliar los efectos de no-uniformidad en una MJSC	98
1. Introducción.....	100
2. Resultados y contribución al estado del arte	100
3. Publicación	103
Capítulo 5: Diseño, modelado óptico, fabricación y caracterización experimental de concentradores a UHCPV	128
1. Introducción.....	130
2. Resultados y contribución al estado del arte	131
3. Publicación	133
Capítulo 6: Discusión general de los resultados	142
Capítulo 7: Conclusiones y líneas futuras de investigación	150
1. Conclusiones generales	152
2. Futuras líneas de investigación.....	153
3. Estatus de publicación de los artículos.....	154

Capítulo 1: Introducción

1. Contexto energético y motivación

La demanda de energía global ha experimentado un continuo crecimiento en las últimas cuatro décadas siendo la generación de electricidad el sector donde más se ha incrementado la producción. Según el último informe de la International Energy Agency (IEA), la demanda de electricidad global se ha cuadruplicado desde 1973 (6131 TWh) hasta 2017, alcanzando la cifra de 25606 TWh [1]. Considerando la eficiencia de producción energética como el ratio entre el suministro de energía primaria y consumo de energía final, se puede apreciar una tendencia hacia sistemas menos eficientes. En 1973 el sistema de producción energético mundial tenía una eficiencia de producción del 76.5% mientras que en 2017 se observó una caída hasta el 69.5 %.

Otro aspecto a considerar es la fuerte dependencia de los combustibles fósiles en el sector energético. En 2017, el 81.2 % de la energía primaria consumida y el 64.8 % de la electricidad producida provenía de combustibles fósiles [2]. Desde 1995 hasta 2018, se ha visto un aumento tanto de la producción como del consumo de los combustibles fósiles [3]. En el caso del petróleo (en la última década), se ha visto un notable incremento en el ratio consumo-producción, es decir, se está consumiendo a una velocidad superior a la que se produce. Esto contribuye a reducir las reservas de combustible ya explotado listo para ser consumido. Además, según datos de empresas productoras del sector, las reservas petrolíferas probadas han caído hasta valores de principios de siglo, con un horizonte de agotamiento de 50 años; incluso las de Gas Natural, se han reducido también hasta 50 años de previsión, alcanzando la cifra más baja de los últimos 30 años. Respecto al carbón se prevén reservas para los próximos 132 años. Esta tendencia evidencia el gran problema energético mundial, una dependencia energética de los combustibles fósiles acompañado del “fin de los combustibles fósiles”. La eficiencia de producción tiende a disminuir debido a que cada vez cuesta más extraer esos recursos y tienen una menor densidad energética, consecuentemente su explotación tiende a ser menos rentable económica y energéticamente [4].

Todos estos datos acentúan la importancia de buscar sistemas de producción alternativos a los utilizados en el sistema energético convencional. Las energías renovables (EERR) juegan un papel importante en esa transición energética hacia el consumo de recursos primarios que se regeneren naturalmente con periodicidad para su explotación (luz solar, viento, mareas, olas, calor geotérmico, etc.). En este sentido, también se ha de priorizar el incremento de la eficiencia del sistema energético, como pueden ser mediante el uso de las EERR. A menudo, se las suele relacionar al sector eléctrico; no obstante, hay otros sectores energéticos como la climatización y el transporte donde las EERR todavía disponen de una escasa presencia.

El sector del transporte está monopolizado por los combustibles fósiles con un 95.88 % de la producción de combustible. Del mismo modo, sólo el 9.8 % de la demanda de climatización queda cubierta con EERR [5]. Esto abre una oportunidad importante de implementación de las EERR a gran escala y de este modo poder realizar la transición hacia energías sostenibles en todo el sector energético.

Hoy en día hay una alta competitividad en el mercado energético para generar electricidad de la forma más barata y eficiente posible. Dentro de los recursos renovables, la energía solar es el más abundante y extendido. La energía fotovoltaica (PV) es ya una tecnología de generación de electricidad a partir del recurso solar consolidada y madura, lo demuestran el tamaño de las plantas PV y la globalización del sector PV. A finales de 2018, la capacidad instalada total de PV global alcanzó la cifra de 500 GWp, siendo en el desierto de Tengger (China), dónde se encuentra la mayor planta PV construida hasta la fecha, 1.5 GW [6]. En este contexto, la concentración fotovoltaica (CPV) muestra diferentes ventajas para producir altas densidades energéticas a bajo coste. La reducción del coste de producción es la justificación principal de la CPV. Sin embargo, a día de hoy la CPV todavía tiene dificultades económicas para poder competir con la PV convencional, a pesar del continuo crecimiento en eficiencia de las células y módulos destinados a CPV. Repasando la historia de toda tecnología destinada a la producción energética, a largo plazo siempre se han impuesto los sistemas de generación más eficientes. De este modo, la eficiencia de un sistema CPV es capaz de justificar cualquier coste de la célula si la concentración es lo suficientemente grande. Algora *et al.*, realizaron un estudio en el que comparaban individual y colectivamente los factores que más afectan al coste nominal de una planta CPV. Resultando el aprendizaje de la tecnología el factor más importante en el precio final de la instalación, que se incrementa en paralelo a la producción acumulada. Seguido de éste destaca el nivel de concentración alcanzado y finalmente la eficiencia de las células solares [7]. En [8], se definió la siguiente relación económica para calcular el coste de un sistema CPV por potencia instalada, de este modo se puede analizar rápidamente el papel que juega la concentración y la eficiencia del sistema en el coste final de la instalación:

$$\text{System cost} \left(\frac{\text{€}}{\text{Wp}} \right) = \frac{\frac{\text{Cell cost} \left(\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right)}{\text{Concentration}} + \text{Generator cost} \left(\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right)}{\text{Reference irradiance} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \cdot \text{System efficiency}} + \text{System BOS cost} \left(\frac{\text{€}}{\text{Wp}} \right) \quad (1)$$

Siendo el BOS, el conjunto de elementos que optimizan la generación de potencia y acondicionan la energía para posteriormente ser consumida (inversor, sistema de seguimiento, control y monitoreo, estructura, protecciones, cableado).

El objetivo principal de la CPV es concentrar una gran cantidad de luz solar sobre una célula fotovoltaica de alta eficiencia y de pequeña superficie. Normalmente se utilizan células multi-unión (MJSC) [9]. De este modo, se reduce el coste del componente (teóricamente)

más caro de un sistema CPV, el material semiconductor, reemplazándolo por óptica potencialmente más barata. Ésto justifica el uso células muy eficientes, aunque sean muy caras. Cuanto mayor sea la concentración a la que opera el sistema, menor impacto tendrá el coste de la célula en el coste final. Diferentes estudios [10, 11] prevén un potencial en la reducción de costes de producción de electricidad (LCOE), en regiones con alta irradiancia normal directa (DNI), llegando incluso a poder competir con la tecnología PV plana.

En este sentido, se ha de mencionar que el uso de óptica concentradora modifica las condiciones de la luz solar incidente, produciendo problemas de no-uniformidad sobre el receptor PV. Como se profundizará en el capítulo 2, estos problemas conducen a la falta de uniformidad de la distribución de irradiancia y espectral de la luz sobre la superficie de la célula solar. Esta falta de uniformidad se hace más crítica cuando se utilizan células multi-unión (MJSC), ya que este efecto influye de manera diferente en el rendimiento eléctrico de cada una de las subcélulas, pudiendo contribuir a una limitación de la corriente en todo el dispositivo PV.

Esta tesis pretende ampliar el conocimiento referido al comportamiento de los dispositivos fotovoltaicos cuando están influenciados por la no-uniformidad para posteriormente estudiar cómo paliarlo de forma eficiente. Los hallazgos permitirán evaluar un compromiso entre aumentar el rendimiento del sistema CPV y aumentar el coste de las estrategias involucradas para mitigar las no-uniformidades en el sistema CPV.

2. Objetivos de la tesis

El objetivo principal de esta tesis doctoral es realizar una contribución al entendimiento de la no-uniformidad generada por los concentradores ópticos sobre la tecnología CPV, así como la caracterización y evaluación de los actuales sistemas ópticos y células en alta concentración fotovoltaica (HCPV) además de proponer nuevas configuraciones para mejorar la competitividad de la tecnología. Para alcanzar este objetivo principal se plantearon diferentes objetivos específicos:

1. Estudio teórico de sistemas CPV, revisión de la UHCPV y el efecto de la uniformidad. Se realizará una revisión bibliográfica acerca de los fundamentos de los sistemas CPV analizando las principales ventajas, inconvenientes y retos de la tecnología y el potencial que tendría operar a ultra-altos niveles de concentración (UHCPV). En paralelo, se procederá a realizar un estado del arte sobre el problema de la iluminación no-uniforme con el objetivo final de realizar nuestro propio estudio experimental y de este modo caracterizar los efectos de la uniformidad.

2. Diseño de un montaje experimental en laboratorio para generar y caracterizar los patrones de uniformidad generados por la óptica concentradora además de medir el comportamiento eléctrico del receptor CPV. Se explicará la metodología para generar patrones de no-uniformidad mediante diferentes métodos como modificar la distancia entre el POE y el receptor CPV o introducir patrones de sombreado sobre el concentrador primario.
3. Análisis y comparación experimental de los patrones de distribución de la luz generados por concentradores refractivos y reflexivos (lentes y espejos) sobre el receptor. Se explicará la metodología utilizada para caracterizar estos patrones teniendo en cuenta la división espectral en la eficiencia cuántica de cada subcélula. Ésta se basa en la utilización de una serie de filtros aplicados sobre una cámara CCD que permiten replicar la respuesta espectral (SR) de las subcélulas top y middle. Así como el diferente comportamiento de concentradores refractivos y reflexivos a la hora de distribuir los rayos sobre el receptor.
4. Análisis y comparación experimental del impacto eléctrico de los patrones de uniformidad en el rendimiento eléctrico de una MJSC. Se realizará un estudio que aborde el análisis de la evolución de los parámetros eléctricos cuando se aplican patrones de no-uniformidad sobre el receptor CPV. Estos patrones se consiguen bien alterando la distancia entre el POE y el receptor CPV o introduciendo sombras sobre el concentrador primario. Para estudiar individualmente el efecto de la no-uniformidad en el comportamiento del dispositivo fotovoltaico se fijarán otras variables que podrían afectar a su medida como son el espectro, la temperatura de la célula y la intensidad de luz recibida. En este estudio también se vincularán los valores de resistencia aparente en serie y paralelo que muestra la MJSC con los patrones de no-uniformidad a los que está expuesta.
5. Análisis y evaluación experimental de varios elementos ópticos secundarios (SOE) sobre la influencia que tienen en los efectos de no-uniformidad causados por patrones de sombreado generados sobre el concentrador primario (POE). Se mostrarán las diferencias en los patrones generados y consecuentemente las ventajas en el comportamiento eléctrico que conlleva el uso de SOEs respecto un concentrador sin SOE.
6. Estudio teórico de diferentes configuraciones de módulos UHCPV. Con el objetivo de aumentar la eficiencia de los módulos CPV se decidió diseñar un prototipo de módulo reflexivo a ultra-alta concentración (UHCPV) basándonos en los concentradores Cassegrain-Koehler. Este tipo de módulos permite concentrar de

manera muy eficiente los rayos colimados, al mismo tiempo que minimiza los efectos de aberración cromática (AC).

7. Fabricación y caracterización experimental de un prototipo a UHCPV.

Se fabricará y construirá el módulo UHCPV además de caracterizarlo en condiciones controladas de laboratorio. Para ello se dispondrá de las instalaciones de la Universidad de Jaén, así como del simulador solar *Helios 3198 CPV* en el CEACTEMA.

3. Estructura de la tesis

Esta tesis pretende ser una contribución al desarrollo de la tecnología HCPV desde el enfoque de la integración entre el sistema óptico y los dispositivos fotovoltaicos. Con el objetivo de evitar pérdidas ópticas y falta de uniformidad producida por el concentrador sobre la célula solar, es necesario un buen acoplamiento entre el dispositivo PV y el sistema óptico. Ambos elementos se han de diseñar siempre teniendo en cuenta la presencia del otro, ya que el rendimiento del módulo/prototipo PV dependerá del buen comportamiento de ambos elementos en conjunto.

Los objetivos anteriormente establecidos se perseguirán a lo largo de los siguientes capítulos. Cada uno de estos capítulos ha sido ordenado siguiendo una secuencia lógica de tal modo que el lector se familiarice con los fundamentos de los sistemas CPV así como los avances en UHCPV y el problema concreto de la falta de uniformidad que afecta a estos. A continuación, se explica el montaje experimental diseñado, el cual nos permitirá generar, caracterizar los diferentes patrones de no-uniformidad y medir su impacto en MJSC. En paralelo se explicarán dos posibles vías de prevenir estos efectos. Por un lado, introducir óptica secundaria y por otro diseñar concentradores que carezcan de aberración cromática. Para concluir esta tesis, se diseña, fabrica y caracteriza experimentalmente un prototipo a UHCPV. El resumen detallado de esta tesis es el siguiente:

- Capítulo 2: Fundamentos de sistemas CPV, estado del arte de la UHCPV y la uniformidad. Este capítulo consiste en una introducción a los sistemas CPV, en el cual se trata de explicar brevemente sus componentes principales y su clasificación en función de su óptica concentradora. Simultáneamente se analizarán las principales ventajas, inconvenientes y retos de la tecnología CPV y el potencial que tendría operar a UHCPV. En este aspecto, se realizó una breve revisión para enmarcar los antecedentes y trabajos previos en el campo de la ultra-alta concentración fotovoltaica.

El estado del arte de la no-uniformidad también se presentó en este capítulo. En él se pretende introducir el problema de la no-uniformidad, analizar los diferentes métodos utilizados por la comunidad científica para caracterizar este fenómeno, así como para

paliar sus efectos. Comprender estos análisis y conceptos es determinante para abordar esta investigación con éxito.

- Capítulo 3: Generación, caracterización experimental y por simulación de los patrones de no-uniformidad y su impacto eléctrico en una MJSC. En este capítulo se exponen diferentes procedimientos experimentales para generar patrones de no-uniformidad sobre el receptor CPV. Estos comprenden desde utilizar diferentes concentradores refractivos y reflexivos y alterar la distancia entre el primario y el receptor CPV. Posteriormente se desarrolla un montaje experimental sofisticado para caracterizar dichos patrones. Seguido de esto, se analizarán los patrones caracterizados, mediante los parámetros PAR y SUR. Así como, establecer relaciones entre estos y las medidas eléctricas del dispositivo CPV frente a los mismos. El estudio se realiza en condiciones controladas de operación, manteniendo fijo el espectro incidente y la intensidad de la luz incidente permitiendo aislar la variable que se pretende medir de otros parámetros que puedan afectar a la medida. Este capítulo se basa en las publicaciones siguientes:
 - Jose M. Saura, Eduardo F. Fernández, Florencia M. Almonacid and Daniel Chemisana, “Characterisation and impact of non-uniformity on multi-junction solar cells (MJSC) caused by concentrator optics” 15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-15), AIP Conference Proceedings 2149, 020004-1–020004-6 (2019).
 - Jose M. Saura, Pedro M. Rodrigo, Florencia M. Almonacid, Daniel Chemisana and Eduardo F. Fernández, “Experimental characterisation of irradiance and spectral non-uniformity and its impact on multi-junction solar cells: Refractive vs. reflective optics”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 225, 111061 (2021).
- Capítulo 4: Introducción de óptica homogeneizadora para paliar los efectos de no-uniformidad en una MJSC. Se caracterizó experimentalmente los patrones producidos por sombreado sobre el concentrador primario. En paralelo se midió el comportamiento eléctrico de prototipos CPV equipados con diferentes secundarios (SOEs). De este modo se podrá cuantificar las ventajas que aportan en el rendimiento eléctrico cuando un módulo está expuesto a perfiles de iluminación altamente no-uniformes como puede ser por sombreado. Este capítulo comprende la siguiente publicación:
 - José M. Saura, Daniel Chemisana, Pedro M. Rodrigo, Florencia M. Almonacid, and Eduardo F. Fernández, “Effect of non-uniformity on concentrator multi-junction solar cells equipped with refractive secondary optics under shading conditions”, *Energy* (2021), under review.

- Capítulo 5: Diseño, modelado óptico, fabricación y caracterización experimental de concentradores a UHCPV.

En este capítulo se investigó en primer lugar los límites de concentración alcanzable. Para ello se optó por diseñar un prototipo de concentrador reflexivo a UHCPV basándonos en los concentradores Cassegrain-Koehler. En este sentido, se realizó un análisis paramétrico basándonos en la relación de aspecto de los espejos primarios del concentrador UHCPV. El modelo óptico fue realizado mediante el software optomecánico TracePro® que permitió mediante trazado de rayos evaluar varias configuraciones a diferentes concentraciones geométricas (2000 - 6000x). Finalmente se eligió el diseño del prototipo con una concentración geométrica de 3015x. En este capítulo se comentarán las decisiones tomadas para el proceso de fabricación, así como de los materiales empleados para su desarrollo. Posteriormente se caracterizará experimentalmente en el laboratorio y se analizarán los patrones de uniformidad generados sobre la célula solar. Para terminar, se medirá eléctricamente el prototipo UHCPV para evaluar en conjunto su rendimiento y predecir su comportamiento a sol real. Este capítulo está respaldado con la siguiente publicación:

- Juan P. Ferrer-Rodríguez, José M. Saura, Eduardo F. Fernández, Florencia Almonacid, Diego L. Talavera, and Pedro Pérez-Higueras. "Exploring ultra-high concentrator Photovoltaic Cassegrain-Koehler-based designs up to 6000x". *Opt. Express* 28 (5), 6609–6617 (2020).
- Capítulo 6: Discusión de los resultados. Este capítulo será dedicado a desarrollar algunas ideas con mayor precisión, así como explicar algunas particularidades percibidas en los resultados experimentales
- Capítulo 7: Conclusiones y líneas futuras de investigación.

Bibliografía

- [1] International Energy Agency., "World Energy Statistics 2019," 2019.
- [2] International Energy Agency., "Key World Energy Statistics 2019," 2019.
- [3] "BP Statistical Review of World Energy," 68, 2019.
- [4] M. Tsoskounoglou, G. Ayerides, and E. Tritopoulou, "The end of cheap oil: Current status and prospects," *Energy Policy*, vol. 36, no. 36, pp. 3797-3806, 2008.
- [5] REN21, "Renwables 2019 Global Status Report," 2019.
- [6] International Energy Agency., "PVPS Snapshot of Global PV Markets 2019," 2019.
- [7] C. Algora, "Very-High-Concentratio Challenges of III-V Multijunction Solar Cells," in *Concentrator Photovoltaics.*: Springer, Heidelberg, 2007, pp. 89-111.
- [8] Eduardo F., Almonacid, Florencia Fernández, Pedro M. Rodrigo, and Pedro. Pérez-Higueras, "CPV Systems," in *McEvoy's Handbook of Photovoltaics. Fundamentals and Applications*, 3rd ed., 2017, pp. 931-985.

- [9] P. Pérez-Higueras, J.P. Ferrer-Rodríguez, F. Almonacid, and E.F. Fernández, "Efficiency and acceptance angle of High Concentrator Photovoltaic modules: Current status and indoor measurements," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 143-153, 2018.
- [10] D.L. Talavera, J.P. Ferrer-Rodríguez, P. Pérez-Higueras, J. Terrados, and E.F. Fernández, "A worldwide assessment of levelised cost of electricity of HCPV systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 127, pp. 679-692, 2016.
- [11] C. Kost, S. Shammugan, V. Jülch, H. Nguyen, and T. Schlegl, "Levelized Cost Of Electricity - Renewable Energy Technologies," Fraunhofer ISE, 2018.

Capítulo 2: Fundamentos de sistemas CPV, estado del arte de la UHCPV y la uniformidad

1. Fundamentos de sistemas CPV

1.1. Clasificación y componentes

Un sistema CPV está formado por un conjunto de componentes que permiten aprovechar la energía del sol mediante la concentración de sus rayos, a partir de un elemento óptico, sobre un dispositivo fotovoltaico de alta eficiencia. Teniéndose en cuenta que la fracción principal de la irradiancia solar sobre la que actúan los concentradores solares es la directa, los módulos CPV requieren de un seguidor solar para maximizar su colección.

En HCPV se suele hacer un seguimiento a dos ejes. Otro aspecto que se ha de tener en cuenta es mantener al dispositivo fotovoltaico dentro de unas condiciones térmicas adecuadas. Por ello, se requerirá de un mecanismo de refrigeración. Además de los componentes involucrados en la generación de electricidad, un sistema CPV consta de otros elementos útiles para proteger al módulo (los diodos bypass), para conectarlos eléctricamente en serie o en paralelo (receptores del mismo módulo y entre módulos) y finalmente adecuar la energía para posteriormente integrarla en la red mediante inversores DC/AC con seguimiento del punto de máxima potencia (P_{MPP}) [1].

1.1.1. Elementos ópticos

El parámetro más importante de la tecnología CPV es el factor de concentración. Éste se puede clasificar en baja (LCPV, < 10 soles), media (MCPV, 10-100 soles), alta (HCPV, 100-1000 soles) y ultra-alta (UHCPV, > 1000 soles). Siendo 1 sol equivalente a una irradiancia de 1000 W/m^2 según la norma internacional IEC 904-3 [2].

El objetivo de la óptica concentradora es redirigir los rayos del sol recibidos sobre una superficie óptica colectora hacia una célula solar de menor tamaño. El ratio entre ambas superficies es conocido como concentración geométrica (C_g). La eficiencia óptica (η_{opt}) es la figura de mérito más importante del sistema óptico y se define como la capacidad de todo el sistema óptico de transferir la intensidad de la luz solar desde el concentrador hasta el receptor CPV. A lo largo de este camino, los rayos se ven obligados a atravesar diferentes cambios de medio, material e interfaces que minarán la eficiencia óptica del concentrador. Entre las diferentes pérdidas ópticas que suceden en los componentes ópticos se pueden destacar: a) pérdidas Fresnel, b) por absorción y reflectividad, c) dispersión y d) pérdidas por las imperfecciones en el acabado [3]. La eficiencia óptica se define por el ratio entre la corriente de cortocircuito del módulo bajo concentración (I_{sc}^{conc}) respecto a la obtenida sin concentración a 1 sol, (I_{sc}^{1sun}) teniendo en cuenta el ratio entre áreas, además del coeficiente de corrección de irradiancia incidente.

$$\eta_{opt} = \frac{I_{sc}^{conc}}{I_{sc}^{1sun}} \cdot \frac{DNI^*}{DNI} \cdot \frac{1}{C_g} \quad (2)$$

La DNI* representa la irradiancia incidente en condiciones estándar de medida para concentradores (CSTC) [4]: irradiancia de 1000 W/m, temperatura de célula a 25 °C y espectro de referencia AM1.5D; mientras que la DNI representa la irradiancia incidente con la cual se realiza la medida. Como se ha mencionado anteriormente, también puede clasificarse en función del factor de concentración o concentración eficaz, (C_{eff}) definiéndose como el ratio entre la corriente de cortocircuito concentrada y la calibrada a 1 sol:

$$C_{eff} = \frac{I_{sc}^{conc}}{I_{sc}^{1\ sun}} \quad (3)$$

La óptica concentradora se puede clasificar en función de:

- La tipología del concentrador. Ésta puede ser refractiva (lentes) o reflexiva (espejos). Éstos se consideran concentradores no ideales [5]. En la literatura específica de óptica se explica en detalle que ni los espejos ni las lentes son concentradores ideales porque no cumplen la condición de iluminación lambertiana [6, 7, 8].
- El número elementos ópticos por los que está formado el sistema óptico: primario, secundario o terciario (POE, SOE y TOE respectivamente).
- La cualidad de la imagen proyectada. En HCPV se suele utilizar la óptica geométrica (*imaging optics*) principalmente en concentradores primarios (espejos o lentes) mientras que la óptica anidólica (*non-imaging optics*) es más común en los elementos secundarios (SOEs), utilizados para homogeneizar la distribución de la luz e incrementar la aceptación angular (AA) o aumentar la C_{eff} [9].

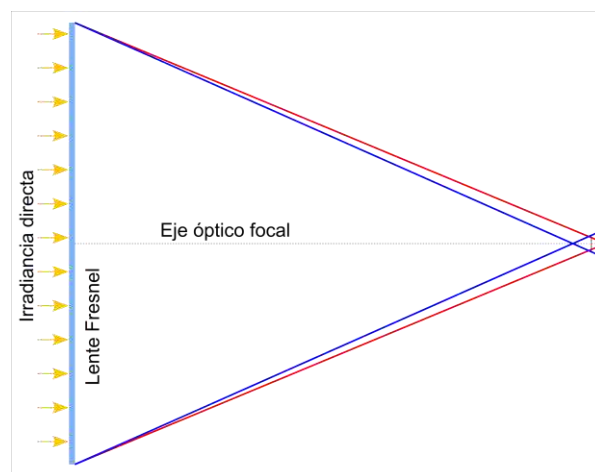


Figura 1. Esquema del trazado de rayos de un concentrador primario refractivo basado en una lente Fresnel. Los rayos azules y rojos representan las diferentes direcciones que toman los rayos refractados dependiendo de sus longitudes de onda (400 nm y 900 nm, respectivamente) ilustrando de este modo el efecto de la aberración cromática (AC).

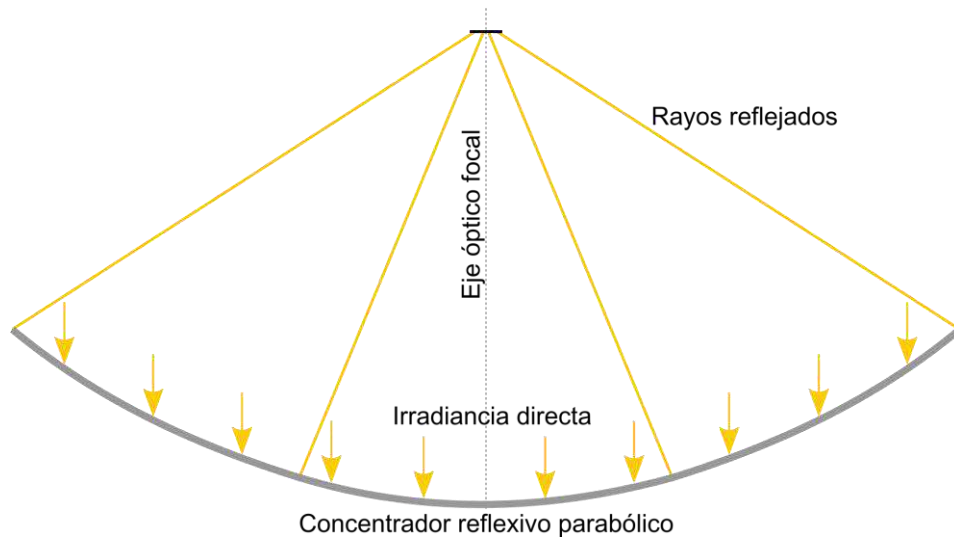


Figura 2. Esquema del trazado de rayos de un concentrador primario reflexivo basado en un espejo con forma de disco.

1.1.2. Célula fotovoltaica

La célula fotovoltaica es el dispositivo más relevante en la generación de electricidad del sistema CPV. Al igual que en la PV convencional, en la CPV la luz solar se convierte directamente en electricidad con la particularidad de que en esta última se utiliza un concentrador que incrementa la intensidad de la luz sobre el semiconductor PV. Este fenómeno se produce gracias al llamado efecto fotovoltaico, el cual consiste en la absorción de los fotones con una energía superior a la energía de banda prohibida del material semiconductor. La acción anterior posibilita que se rompan los enlaces covalentes y se generen pares electrón-hueco, produciéndose así la generación de electricidad.

Observando la evolución histórica del desarrollo de células fotovoltaicas (Figura 3), no hay un diseño de célula único, sino que la variabilidad es muy amplia. En este sector encontramos células de diferentes tecnologías (células solares multi-unión (MJSC), silicio, de capa fina *-thin-films-* o células emergentes), materiales, diseño arquitectónico, uniones, etc. Además, en la literatura se pueden encontrar diferentes arquitecturas para fabricar una MJSC: Células *Lattice-matched* (LM), los materiales que componen la célula fotovoltaica tienen la misma constante de red; células metamórficas o *metamorphic-mismatch* (MM), los materiales que la componen no tienen la misma constante de red; y células metamórficas invertidas o *Inverted-metamorphic* (IMM). Ésta última se fabrica mediante el crecimiento de la estructura en un orden inverso con respecto a la tecnología de MJSC convencional.

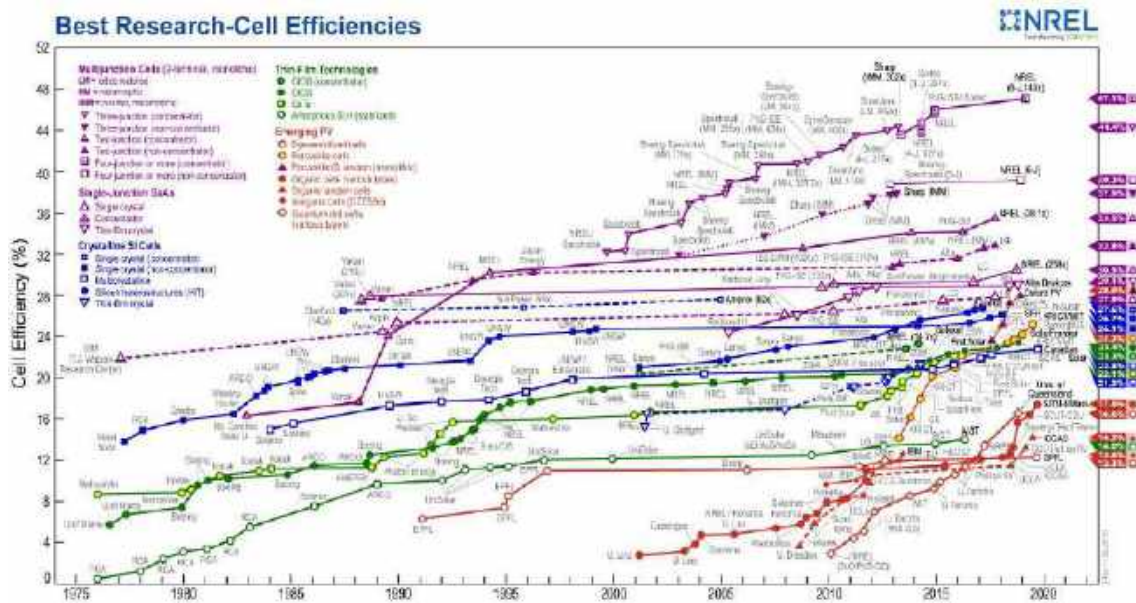


Figura 3. Evolución histórica de la eficiencia récord de células fotovoltaicas en laboratorio desde 1976 hasta la actualidad (NREL) [10].

Esta gran variabilidad de células PV junto a la tendencia ascendente en la eficiencia tanto de las MJSC como de las llamadas células solares emergentes determinan el gran potencial de crecimiento de la PV. Las células más utilizadas en CPV son las MJSC, llamadas así por estar compuestas por varias subcélulas ordenadas de mayor a menor ancho de banda (*bandgap*) con respecto a la superficie de incidencia solar, que han sido optimizadas para maximizar la absorción de energía en diferentes bandas espectrales [11]. El mayor aprovechamiento del espectro solar es la razón principal de su alta eficiencia. La célula más comercializada es una célula solar de triple unión (TJSC) con una configuración arquitectónica de *Lattice-Matched*. Ésta consiste en 3 subcélulas conectadas en serie: la superior (*Top*), la intermedia (*Middle*) y la inferior (*Bottom*) GaInP/GaInAs/Ge respectivamente (figura 4). El límite teórico de aumentar la eficiencia de la célula aumenta con el número de células apiladas debido a una mejor división y aprovechamiento espectral [12]. No obstante, esta capacidad de aumentar se reduce por el aumento de la resistencia en serie generada entre capas, por lo que el número de subcélulas que es posible apilar bajo una misma célula está limitado. En este sentido, las células de concentración son las que alcanzan las mayores eficiencias. El récord histórico establecido de eficiencia de célula, 47.1%, se consiguió para una célula de 6 uniones a 143x [10], el de módulo CPV 38.9% [13] y el de mini-módulo fue de 43.4% [14].

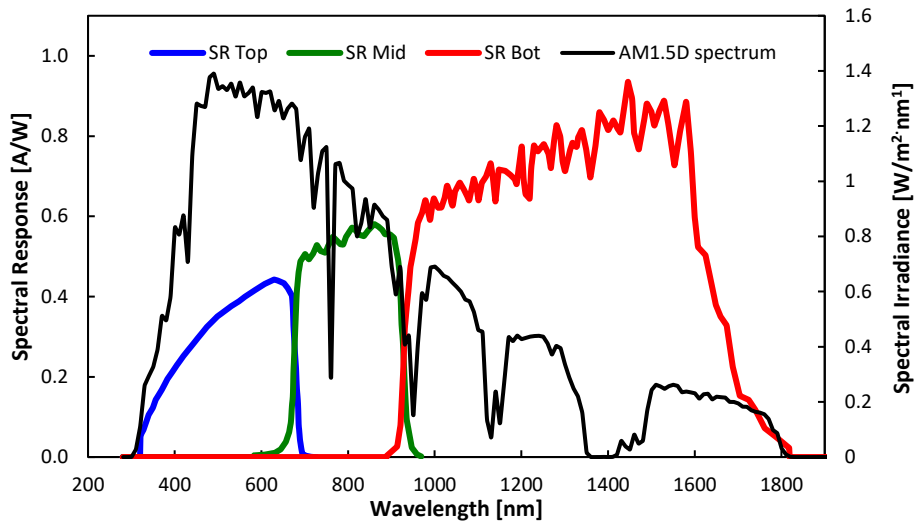


Figura 4. Espectro de radiación solar terrestre en condiciones estándar (AM1.5D, ASTM G173-03, en negro) y la respuesta espectral (SR) de cada subcélula (*top* en azul, *middle* en verde y *bottom* en rojo) de una célula MJ de tres uniones, compuesta por GaInP/GaInAs/Ge (TJSC).

1.1.3. Mecanismos de refrigeración

Los sistemas de refrigeración permiten disipar el calor residual del semiconductor no utilizado para la conversión de electricidad. Los sistemas de refrigeración pueden ser pasivos o activos. En HCPV suele ser suficiente con sistemas pasivos, como aletas o placas planas de aluminio, atendiendo al reducido tamaño del dispositivo semiconductor y la facilidad de inclusión de un disipador altamente eficiente con una relación de tamaños ventajosos. Si bien la refrigeración pasiva es la opción mayoritaria, también es posible una refrigeración activa, mediante la circulación de un fluido refrigerante. La eficiencia de disipación dependerá del tamaño de la célula, del diseño del receptor y del disipador de calor. Cuanto mayor sea el tamaño de la célula, más calor generará y por tanto más calor habrá que extraer [15].

Habiendo contextualizado sobre las bases del funcionamiento de la tecnología CPV y su presencia en el sector energético, a continuación, se presentarán las ventajas, inconvenientes y retos implícitos de esta tecnología.

1.2. Ventajas, inconvenientes y retos de la CPV

Comenzando por las ventajas, la forma más eficiente de reducir costes es el aprendizaje acumulado conforme se desarrolla una tecnología. Por ello, el despliegue de la tecnología CPV vendrá acompañado de un desarrollo más rápido para todo el sector PV. Además, es una tecnología modular y escalable; las instalaciones CPV pueden comprender desde pequeñas aplicaciones BICPV [16] de unos pocos vatios hasta las mayores plantas del orden

de 79.8 MW Goldmud 2 Suncore en China [17]. Así mismo, el uso de seguimiento solar a 2 ejes permite una producción de energía estable y elevada a lo largo de todo el día [18].

Por otra parte, la alta eficiencia de los módulos junto a las altas densidades energéticas que se producen permite reducir la superficie de los concentradores por potencia instalada (m^2/Wp).

Entre los inconvenientes destacados se encuentra la complejidad de los sistemas CPV. Éstos suponen un sobrecoste en el precio final por unidad de potencia debido a la implementación de los componentes específicos requeridos para su correcto funcionamiento. En relación a ello, un sistema CPV que requiere un sistema de seguimiento solar continuo y de alta precisión debido a que solo es útil la radiación directa (DNI) en los sistemas de concentración para producir electricidad. Este inconveniente va ligado a la limitación de su uso a localizaciones con alta DNI para el uso competitivo.

Debido a la alta densidad energética producida sobre una célula muy pequeña, la evacuación de calor es más crítica y difícil en receptores CPV que en la PV convencional. Aparte de esto, la extracción de los materiales semiconductores III-V, utilizados para fabricar las MJSC; como son Ga, In y Ge están limitados globalmente [19].

El reto principal de la CPV es competir con los costes de los módulos convencionales de silicio de PV plana. Para conseguir este objetivo, se pueden plantear dos vías para reducir costes de producción que implican a las empresas y a la comunidad científica.

La primera dirección a tomar consiste en incrementar la eficiencia del sistema mediante la mejora del diseño de los componentes del sistema CPV (células, óptica, seguidor solar, disipador térmico) y con ello la productividad del módulo. Dentro de esta línea de investigación sobresalen tres alternativas: 1) Aumentar las eficiencias de la óptica concentradora. Con ello, se podría reducir la cantidad de material utilizado en la carcasa del módulo, el cableado o la superficie de terreno, abaratando el coste final de la instalación. 2) Aumentar la aceptación angular (AA) o tolerancia al desalineamiento del módulo, con el objetivo de reducir costes del sistema de seguimiento, así como se relajarían los requisitos mecánicos del seguidor. La industria CPV suele solventar este problema introduciendo un elemento óptico homogeneizador. 3) Reducir el tamaño de las células y aumentar las concentraciones. De este modo, se disminuyen los requisitos térmicos y el coste del mecanismo de refrigeración además de la superficie utilizada de semiconductor, que es el componente más caro por unidad de superficie del sistema CPV.

Por otro lado, integrar tecnologías de fabricación que utilicen productos con requisitos similares como son la industria de la microelectrónica o la óptica permitiría aumentar la producción acumulada de la tecnología y finalmente abaratar costes de producción [20].

2. Estado del arte de la UHCPV

2.1. Potencial de los sistemas UHCPV

Tras comparar la evolución de los récords de eficiencia de los módulos HCPV con los módulos comerciales más eficientes, en [21] plantearon la necesidad de aumentar la concentración efectiva de operación como una estrategia para reducir costes. En este sentido, se deberá optimizar tanto la célula como la óptica concentradora para operar a mayores niveles de concentración. Asimismo, el pico de eficiencia de los módulos se produciría a mayores concentraciones.

Se considera UHCPV a aquellos sistemas cuyos factores de concentración efectiva exceden los 1000 soles [22]. El interés reside en la búsqueda de una nueva generación de módulos que puedan operar con altas eficiencias y a bajo coste. De esta manera, la búsqueda de módulos que operen a mayor concentración planteará diferentes ventajas como lo son las económicas, estratégicas, medioambientales y técnicas.

Aumentar el factor de concentración supondría una reducción directa de los costes de producción de la electricidad (LCOE). Según un estudio elaborado en el Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, el LCOE de la CPV podría llegar a reducirse hasta 4.5-7.5 c€/ kWh para 2030 contemplando localizaciones con una DNI entre 2000 y 2500 kWh/m² anual [23]. De cumplirse estas previsiones, se podría empezar a competir con la tecnología PV plana convencional de silicio.

Por otro lado, el material semiconductor requerido (Ga, In y Ge) disminuye considerablemente al aumentar la concentración y la eficiencia [18]. Esta disminución de tamaño de célula fruto de aumentar la concentración relajaría los requisitos del sistema de refrigeración, facilitando una gestión térmica del sistema más eficiente [24].

Adicionalmente, la eficiencia teórica de las células solares aumenta con la concentración [22]. Según esta afirmación, sería razonable invertir en el desarrollo de células muy eficientes debido a la mínima parte del coste que suponen respecto a todo el sistema [25]. Esto daría lugar a una mejora de la eficiencia en todo el sistema.

2.2. Configuraciones ópticas a UHCPV

Habiendo comprendido las ventajas de la UHCPV, se procede a repasar el trabajo realizado en este campo desde la perspectiva de los concentradores ópticos a UHCPV. Entre las configuraciones ópticas diseñadas cabe destacar los concentradores que utilizan varios elementos primarios para dirigir la luz desde diferentes direcciones hacia un receptor central.

En [26] realizaron el diseño óptico basado en un sistema de tipo Cassegrain UHCPV donde los rayos solares se concentraron y se enviaron desde cuatro unidades ópticas independientes de pares paraboloides-hiperboloides sobre un solo receptor central. Posteriormente, este diseño se optimizó, validó y caracterizó experimentalmente [27]. El nuevo diseño tenía una concentración geométrica de 3015x y experimentalmente se obtuvo una concentración efectiva de 938 soles. Los resultados del análisis paramétrico mostraron que los diseños compactos eran los más eficientes independientemente de la concentración geométrica.

Diferentes autores [28] propusieron un diseño de un concentrador a UHCPV basado en cuatro lentes Fresnel primarias que concentran la luz sobre una célula solar central con una relación de concentración geométrica de 5800x. Este diseño obtuvo una eficiencia óptica simulada del 75% utilizando materiales ópticos de alta calidad, lo que da una relación de concentración óptica de poco más de 4300 soles.

Una forma alternativa de alcanzar concentraciones a UHCPV son los que utilizan concentradores de disco parabólico y fibra óptica como elemento transmisor hasta la célula solar. Los primeros resultados experimentales acerca de las aplicaciones con fibra óptica y un concentrador con forma de disco se reportaron en [29]. El POE consistía en un espejo parabólico con 20 cm de diámetro que dirigía la luz sobre una fibra óptica de un milímetro de diámetro. Los niveles alcanzados superaban los 11.000 soles. Posteriormente, optimizaron el diseño anterior y desarrollaron un montaje para su caracterización en laboratorio [30]. Ésto permitió realizar estudios de no-uniformidad debido a la iluminación extremadamente localizada que se consigue con las fibras ópticas [31]. En adición a estos estudios, se realizaron ensayos bajo irradiancia uniforme colocando un caleidoscopio de sección transversal cuadrada sobre la célula solar [32].

En [33] desarrollaron el sistema concentrador PV-FIBRE basado en un disco parabólico que concentra la luz solar en una varilla de transmisión transparente, desembocando en varias fibras individuales conectadas a células de doble unión III-V. El sistema conseguía eficiencias superiores al 20%.

Desde otra perspectiva, los micro-concentradores ópticos planos también han tenido sus avances en el campo de la UHCPV. En [34] diseñaron un concentrador que combina un conjunto de lentes integradas en facetas para dirigir la luz solar sobre una guía de onda hasta las células PV. Las simulaciones de este módulo ultra-compacto mostraron una eficiencia óptica de 85% para un concentrador de 900x.

Para concluir, vale la pena destacar la difícil tarea que supone concentrar una gran cantidad de rayos sobre una fibra óptica de apenas unos milímetros de diámetro. Con el objetivo de aumentar el ángulo de aceptación de estas aplicaciones, una opción innovadora es recurrir a

diseños de SOEs de estrechamiento *taper* adaptados a la fibra óptica [35, 36]. Estos permitirían acoplar la luz concentrada en fibras ópticas aliviando las exigencias del sistema de seguimiento.

2.3. Dificultades en UHCPV

No todo son ventajas cuando se trata de aumentar la concentración a niveles ultra altos. Operar en estas condiciones de concentración elevaría a otro grado los requisitos de los componentes del sistema CPV. Algunas de las dificultades técnicas que aparecerían son, entre otras, la generación de perfiles de iluminación no-uniformes producidos por el sistema óptico. Estos patrones de no uniformidad derivarán en un comportamiento eléctrico inadecuado, produciéndose altos valores de pérdidas de eficiencia por efecto de resistencia en serie. Además, producen un efecto térmico en la célula, puesto que generan un gran flujo de calor sobre ésta, conllevando a un alto calor residual que se ha de evacuar mediante mecanismos de refrigeración. Una estrategia recurrente por los desarrolladores de células consiste en diseñar células de superficies muy pequeñas capaces de proporcionar una mejor refrigeración del dispositivo CPV cuando opera a UHCPV. Sumado a estos problemas, cabe destacar los importantes requisitos que se le exigen al sistema de seguimiento cuando se pretende operar a niveles de concentración ultra-altos. Sólo mediante un seguidor en dos ejes muy preciso y sistemas ópticos con notables valores de aceptación angular se puede asegurar que se concentren el mayor número de rayos posibles sobre el receptor CPV. Como es conocido en la tecnología CPV, podemos encontrar un cuádruple compromiso entre la concentración geométrica (C_g), la eficiencia, la AA y la uniformidad. Ningún módulo CPV puede ser óptimo en los 4 parámetros a la vez por lo que habrá que establecer un compromiso entre todos estos a la hora de realizar un diseño eficiente.

Además de estos inconvenientes, se ha de tener en cuenta el papel que juegan los fenómenos atmosféricos a los que el sistema está expuesto. En [1] se estudiaron los efectos sobre los parámetros eléctricos frente a los cambios en la intensidad de la luz (DNI), el espectro (en función de la masa de aire, la profundidad óptica de los aerosoles y el vapor de agua precipitable) y la temperatura de la célula. Teniendo en cuenta que el sistema CPV es susceptible a todos estos efectos, se puede deducir que todos éstos se verán agravados al incrementar la concentración a UHCPV. Ésto muestra la gran importancia que tiene su estudio individualizado y colectivo para minimizar sus efectos lo máximo posible.

2.3.1. Gestión térmica

Como se comentó anteriormente, uno de los inconvenientes de hacer trabajar al dispositivo PV a tan elevados niveles de concentración es la temperatura alcanzada en la célula. Diferentes estudios investigaron acerca de los posibles efectos negativos causados en los parámetros de los dispositivos PVs. En [37] plasmaron experimentalmente que la V_{oc} , el

FF y la eficiencia de los módulos CPV disminuyen mientras que la I_{sc} aumenta ligeramente su valor con el incremento de la temperatura en células III-V. Con ayuda de células *isotypes* de referencia, en [38] demostraron la dependencia con la temperatura de la eficiencia cuántica externa (EQE) de cada una de las subcélulas además de estudiar la influencia de la irradiancia y temperatura en las curvas características IV.

Es conocido que un porcentaje superior al 60% de la energía concentrada de la luz solar no es utilizado por el dispositivo PV para producir electricidad y se ha de disipar en forma de calor [39]. Una forma de aprovechar el calor residual de las células solares es mediante la hibridación de sistemas de concentración fotovoltaico-térmico (CPV-T). En [40] estudiaron tres estrategias híbridas PV-CSP para dar utilidad a la energía no utilizada por el sistema PV redirigiéndola hacia un receptor térmico en un sistema de concentración termoeléctrica (CSP). El primer diseño se basaba en un receptor CPV-T integrado. El segundo consistía en un divisor espectral que permitía dirigir la radiación solar en función del rango espectral hacia un receptor fotovoltaico o térmico. El último ejemplo consta de células PV, que operan a 1 sol, recubiertas con una capa espectral. Esto aporta a la célula una función añadida, trabajar como concentrador reflexivo de los rayos de mayor longitud de onda sobre un receptor térmico. Otros estudios, [41] investigaron los límites del rendimiento y la reducción de los costes en un prototipo híbrido CPV-TEG (generador termoeléctrico) con refrigeración pasiva. Los resultados mostraron la viabilidad para obtener ganancias de eficiencia y reducción de costes con un enfriamiento pasivo en una TJSC de 3 mm x 3 mm.

Por todo esto, hay una amplia línea de investigación en desarrollar mecanismos de refrigeración eficientes y económicos para implementarlos a los módulos CPV. Recientemente se realizó una amplia revisión acerca de los diferentes mecanismos de refrigeración investigados en la literatura [42]. Estos podían agruparse en dos grandes familias: refrigeración activa o pasiva [43]. Con el objetivo de no sobrestimar las dimensiones y economizar en el sistema de refrigeración es fundamental optimizar el diseño del disipador térmico [44]. Mediante el enfoque del menor material, para maximizar el rendimiento eléctrico y la disipación térmica se puede minimizar el peso del disipador, pudiéndose lograr una caída en el peso y precio de hasta un 61% [45].

Para mejorar la evacuación de calor, se estudiaron materiales de interfaz térmica mejorados con grafeno entre la célula solar y el disipador de calor [46]. Los resultados mostraron una reducción de la temperatura de la célula solar y un aumento del voltaje de circuito abierto.

Otra vía para aliviar las exigencias de refrigeración puede ser la miniaturización de la superficie de la célula solar [47, 24, 48, 49]. En [24] se realizó un análisis del rendimiento energético y económico de un módulo HCPV de refrigeración pasiva teniendo en cuenta el rendimiento de los disipadores y el rendimiento de la TJSC. Los resultados evidenciaron una dependencia lineal de la C_g con la temperatura de la célula, agravándose este efecto con

el tamaño de la célula. En [48] estudiaron la viabilidad de los disipadores de calor de placa plana utilizando células solares a micro-escala para aplicaciones UHCPV. Las simulaciones mostraron que las células solares con una superficie inferior a $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ se pueden gestionar térmicamente con disipadores de calor planos de aluminio convencionales para concentraciones de hasta 10.000 soles.

Asimismo, la micro CPV podría mejorar la eficiencia célula-a-módulo ($\eta_{\text{modulo}} / \eta_{\text{célula}}$) en un rango del 71% al 86% respecto a los módulos CPV convencionales que oscilan entre el 65% y el 75% [49]. Recientemente, se presentó una revisión acerca de la técnica para el diseño de micro-concentradores fotovoltaicos adaptados a células solares de película delgada [50]. De esta manera, se demuestra que el micro-escalado de los módulos mejora la eficiencia, con el valor añadido de poder adaptarse a otros diseños arquitectónicos de células solares, como son las células de película delgada.

2.3.2. Efectos eléctricos

A pesar del efecto que la temperatura produce en el dispositivo PV, en última instancia, la resistencia en serie es la principal limitante para operar a una eficiencia óptima a UHCPV en una TJSC [51, 52].

Las pérdidas de energía se hacen visibles con la disminución de la resistencia en serie y la densidad de corriente [53], siendo este último parámetro decisivo en reducir la eficiencia del dispositivo. Esto es debido a que las pérdidas óhmicas resultantes ($R_S \cdot J^2$) se escalan con el cuadrado de la densidad de corriente [54]. El causante del 50% de estas pérdidas es el contacto frontal de la rejilla metálica. Con el objetivo de mitigarlas, en [55] propusieron un nuevo diseño de metalización frontal (Pd/Ni/Ti/Pd/Al) con resistencias de hoja y contacto muy bajas. Se observaron menores caídas de tensión y pérdidas óhmicas producidas con esta metalización. Igualmente, el FF se mantuvo cercano al 90% para un amplio rango de concentración (250-1500 soles), mientras que la eficiencia mostró una tendencia creciente hasta 1.500 soles.

Otros diseños innovadores de células solares son las *Vertical Tunnel Junction* (VTJ). Esta nueva estructura son una buena alternativa para minimizar las pérdidas por resistencia en serie, lo que permite sacar el máximo partido a la eficiencia incrementando la concentración a niveles de UHCPV [25]. Además, esta conexión en túnel permite utilizar materiales de banda prohibida directa, permitiendo una mejor absorción del espectro. En [56] optimizaron los parámetros de esta célula teniendo presentes los mecanismos de recombinación. Las simulaciones mostraron un incremento de la eficiencia con la concentración alcanzando una eficiencia récord de 32.2 % a 10.000 soles.

2.4. Arquitecturas de células solares óptimas para UHCPV

Con el objetivo de reducir los costes de producción (LCOE) en la tecnología CPV, diferentes estudios apuntan a incrementar aún más los niveles de concentración a los que han de operar y a optimizar los picos de eficiencia de las células CPV a estos niveles. Varios autores han comprobado el potencial de las células MJ para operar por encima de 1000 soles [57, 58, 59, 60, 61, 62].

En [60] propusieron un diseño de células MJ (de 3,4 y 5 uniones) con GaAs. Su principal característica era la reducción del flujo de corriente obtenida mediante la absorción de un rango más estrecho del espectro.

En otras investigaciones [61] se reportaron los principales factores limitantes de las MJSC que operan a concentraciones ultra altas (> 1000 soles) poniendo especial énfasis en: las propiedades eléctricas del emisor; la capa de ventana de la subcélula superior; y las discontinuidades de banda formadas en las heterouniones. Entre las simulaciones se mostró la posibilidad de alcanzar eficiencias superiores al 42% a concentraciones ultra altas (3000–5000 soles) mediante un diseño adecuado de la célula. Por otro lado, en [62] desarrollaron una unión túnel altamente conductiva que la hace ideal para aplicaciones a UHCPV.

Además del conocimiento del buen rendimiento que pueden alcanzar las MJSC al operar a UHCPV, en la literatura se puede encontrar diseños alternativos. Entre ellos es notorio mencionar las células solares basadas en Unión-Duplicada (DJSC) [63]. Estas consisten en duplicar una subcélula (unión p-n) en varias sub-uniones con idéntico ancho de banda eliminando la incompatibilidad de la constante de red. La ventaja principal de estas sub-uniones es la conexión en serie eléctricamente, la cual permite mantener la corriente suficientemente baja como para poder minimizar los efectos resistivos que conducen a reducir la eficiencia a UHCPV. Estos diseños pueden ser aplicables tanto para células de una unión (SJ) como para MJSC. Los resultados mostraron un potencial de aumentar el pico de eficiencia operando por encima de 1000 soles a medida que se incrementaba el número de uniones duplicadas.

Asimismo, las células verticales multi-unión (VMJ) ofrecen una alternativa a los diseños anteriores. La estructura de las células solares VMJ se basa en una conexión en serie de múltiples subcélulas con los contactos metálicos situados en los laterales [64, 65]. Este diseño original y eficiente permite reducir considerablemente las limitaciones de la resistencia en serie debido a las bajas densidades de corriente y alta tensión a las que operan. Lo que la convierte en una célula óptima para operar a altos niveles de concentración [66, 67]. En [68] probaron experimentalmente una célula VMJ de Si la cual alcanzó un pico de eficiencia de 19% a una concentración de 2500 soles.

Otros autores reportaron a cerca de las dificultades prácticas de implementar materiales de *bandgap* directo III-V a estas estructuras. Esta limitación viene de las pequeñas longitudes

de difusión de los portadores que caracterizan estos materiales (1-5 μm) [69], lo que implicaría conectar en serie centenares de células VMJ, no asumible con las técnicas de fabricación actualmente diseñadas.

3. Estado del arte sobre la uniformidad

Como se ha introducido anteriormente, la HCPV funciona de forma mucho más compleja que la PV convencional ya que son necesarios diferentes elementos para poder utilizar la energía incidente del sol, concentrarla sobre un dispositivo fotovoltaico y hacer uso de ella de forma adecuada en la red eléctrica pública. Cada elemento introducido para el correcto funcionamiento de esta tecnología supone un coste adicional que incrementará el coste final de producción de electricidad. De esta manera es necesario optimizar cada uno de estos elementos y tratar de diseñar sistemas muy eficientes capaces de generar grandes densidades energéticas.

La reducción del coste de producción es la justificación principal de la CPV. En ésta se ven implicados el aprendizaje de la tecnología que va desarrollándose en paralelo a la producción acumulada. Otro factor interesante que minará los costes de producción es el nivel de concentración al cual opere el sistema CPV. Finalmente, la eficiencia del sistema, proveniente del acoplamiento entre sistema óptico y dispositivo CPV. El desarrollo y optimización de cada uno de estos valores determinarán los costes de producción y justificarán una alta inversión para conseguir tales propósitos. En este sentido, los diseñadores centran sus esfuerzos en diseñar células fotovoltaicas y concentradores ópticos más eficientes. Mientras que la industria se esfuerza por reducir los costes de fabricación para hacer esta tecnología más competitiva.

La diferencia técnica fundamental entre los sistemas utilizados en PV convencional y los sistemas CPV es que éstos últimos utilizan un sistema óptico para concentrar los rayos incidentes del sol. Éstos se basan en elementos ópticos refractivos (lentes) o reflexivos (espejos), ambos se consideran concentradores no ideales [5]. Un concentrador ideal ha de conservar la *étendue* cumpliendo la propiedad de iluminación isotrópica sobre el receptor PV, es decir, que esté iluminado desde todos los ángulos $\Omega \pm 90^\circ$. También ha de mantener una extensión angular constante en todas las direcciones de iluminación del concentrador, asegurando así una iluminación Lambertiana [6, 7, 8]. Los espejos y las lentes no cumplen estas condiciones de iluminación, por lo tanto, no son concentradores ideales.

3.1. Causas y efectos

El uso de concentradores no ideales u otras razones externas como el sombreado parcial modifican la luz solar incidente, produciendo problemas ópticos como la falta de uniformidad espacial y espectral de la distribución de la luz en el receptor. Una

preocupación tanto en la comunidad científica como en la industria PV es el impacto que tiene la iluminación no uniforme en los sistemas CPV. En la literatura se han demostrado diferentes efectos que puede producir la falta de uniformidad, entre los más conocidos destacan:

- La iluminación no-uniforme puede provocar un aumento de la resistencia en serie efectiva de la célula solar que deriva en una disminución del factor de forma (FF) y una reducción en la eficiencia de conversión [5].
- Las regiones pobremente iluminadas de las células solares trabajan como diodos oscuros, contribuyendo sólo con la corriente de recombinación sin foto-generación, actuando estas zonas como sumideros de corriente [70].
- La falta de uniformidad generalmente genera perfiles de irradiación gaussiana sobre la superficie de la célula con un pico de irradiación localizado en una región pequeña. Esta región tiene, por lo tanto, una densidad de corriente máxima que podría exceder el umbral de la unión túnel, produciendo una disminución abrupta en la eficiencia [71, 31].
- Las aberraciones cromáticas de la óptica causan no-uniformidad de la distribución espectral sobre el área de la célula. Esta variación espectral se hace más crítica cuando se utilizan MJSC ya que puede reducir la corriente generada por una subcélula específica, limitando la corriente total proporcionada por el dispositivo debido a la interconexión en serie de las subcélulas. Además, pueden coexistir áreas con diferentes subcélulas limitantes, causando flujos de corriente laterales en las capas que conectan las subcélulas [72].

Todos estos efectos físicos hacen que los dispositivos HCPV sean susceptibles a la distribución de patrones de luz no uniformes disminuyendo la eficiencia de la célula solar. La falta de uniformidad en la irradiancia y la distribución espectral pueden causar una pérdida de eficiencia relativa de alrededor del 4% en un sistema CPV típico, mientras que estas pérdidas pueden aumentar considerablemente en sistemas con una configuración óptica mal diseñada [5].

3.2. Caracterización de la no-uniformidad

3.2.1. Modelos teóricos

El desarrollo de algunos experimentos resulta inviable mediante procedimientos experimentales por su complejidad técnica o dificultad de desarrollo del mismo. En estas situaciones los investigadores realizan modelos teóricos eficaces que permitan comprender mejor su comportamiento. Entre los más relevantes de la literatura científica destacan aquellos que utilizan un modelo distribuido de las células solares y análisis por trazado de

rayos para simular el comportamiento de las células solares bajo iluminación no uniforme [73, 74, 75, 76, 77, 78, 79].

En [73], establecieron uno de los primeros métodos analíticos para calcular las pérdidas por AC. En [74], realizaron un análisis teórico mediante trazado de rayos y experimental de homogeneizadores caleidoscópicos adaptados a MJSCs. En [75], desarrollaron un modelo de unidades múltiples (mediante SPICE) y analizaron el efecto de la AC y la distribución de la intensidad para una MJSC.

En [76], estudiaron y modelaron el comportamiento de MJSC interconectadas con unión túnel bajo iluminación no uniforme localizada. En [77], se investigó como varía la resistencia en función de la concentración de dopaje y la corriente pico de la unión túnel.

Entre otros, cabe destacar la relevancia de los modelos tridimensionales basados en unidades de circuito distribuido [78] y [79], a partir de los cuales realizaron sus respectivos análisis. En [78], evaluaron el efecto de la AC en una TJSC simulando diferentes perfiles de iluminación gaussianos sobre la subcélula *middle* mientras que las subcélulas *top* y *bottom* permanecían uniformes. Comprendieron la importancia de considerar la coincidencia de corriente sobre toda la célula solar en lugar de en cada punto de la superficie para evaluar el efecto de la AC en los parámetros eléctricos. Los resultados mostraron que el esparcimiento de la corriente condiciona el impacto de los perfiles de iluminación en la curva I-V de la célula solar. Seguido de esto, en [79] simularon dos perfiles de luz diferentes ($PAR_{top} = 4$ y $PAR_{mid} = 2$; y, por otro lado, $PAR_{top} = 2$ y $PAR_{mid} = 4$), para explicar el efecto de la AC en la unión túnel. Demostraron que los patrones no uniformes generados sobre la subcélula *top* pueden ser significativamente más adversos para el funcionamiento general de la MJSC que las no-uniformidades generadas sobre las subcélulas *middle* o *bottom*. Resaltaron una caída en la curva IV para los perfiles más desfavorables, y esta es producida cuando el esparcimiento lateral de la corriente en cortocircuito no es suficiente para mantener a toda la unión túnel trabajando en la región óhmica.

En esta sección se ha visto la importancia y esfuerzos de los investigadores por tratar de estimar el comportamiento de las células solares bajo iluminación no uniforme. Sin embargo, para que estos estudios sean útiles, es fundamental profundizar en el estudio acerca de la distribución de los patrones de luz real generados por la óptica concentradora y su impacto en células MJ. Cuantificar experimentalmente la no-uniformidad permitirá mejorar diseños futuros de MJSC y realizar predicciones más precisas de su rendimiento eléctrico.

3.2.2. Procedimientos experimentales

En la literatura, debido a su complejidad, son pocos los autores que tratan de cuantificar la influencia de la no-uniformidad en las células solares CPV mediante procedimientos experimentales. Entre los más relevantes destacan:

En [80], se midió el efecto de la AC en células solares de dos uniones con dos terminales equipadas con una lente Fresnel lineal con forma de cúpula como elemento óptico primario (POE). Los resultados mostraron una pérdida de potencia del 4% comparado con el dispositivo de cuatro terminales. En [81], se realizó una caracterización en laboratorio sobre una TJSC integrada con una lente Fresnel de foco puntual. Las curvas obtenidas del FF y eficiencia al modificar la distancia POE-receptor permitió identificar el efecto de la AC.

En [82], los autores midieron células TJSCs integradas con una lente Fresnel de enfoque puntual con diferentes configuraciones de SOE, y fotografiaron los perfiles de irradiancia producidos sobre una superficie difusa Lambertiana translúcida con una cámara de dispositivo de carga acoplada (CCD). También se imprimieron máscaras sobre una lámina de acetato transparente para reproducir perfiles de iluminación gaussianos en las células, que se evaluaron en un medidor de células de concentración. Los resultados mostraron una caída de FF con el aumento de la relación pico-promedio (PAR) de irradiancia. Las células enmascaradas mostraron una disminución más baja en FF que los sistemas reales, lo que se atribuyó a AC (no presente en el experimento con máscaras).

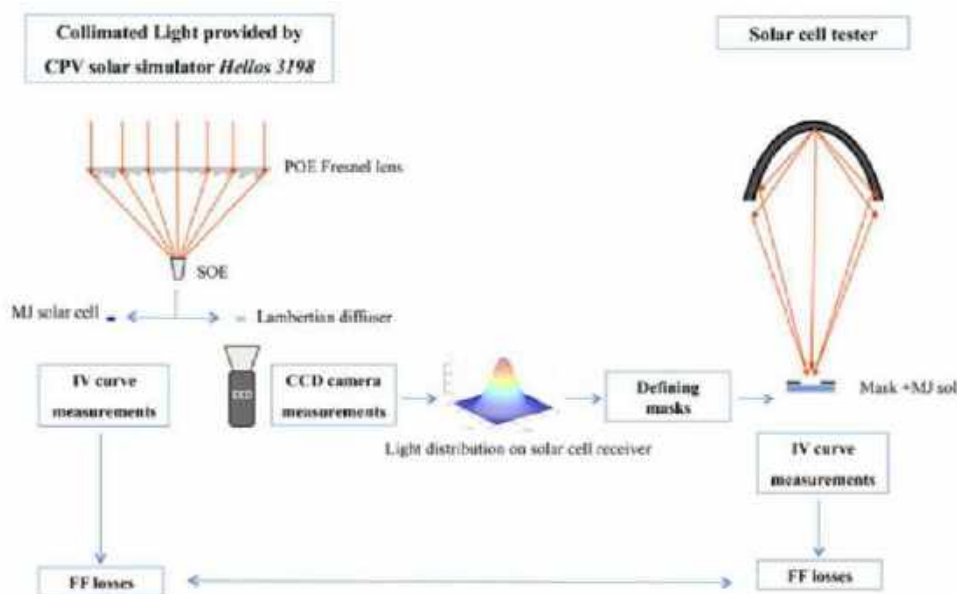


Figure 5. Esquema de la campaña de medidas llevada a cabo para caracterizar los patrones de irradiancia producidos por la óptica concentradora [82].

En [32], se desarrolló una configuración experimental que consta de dos concentradores reflexivos exteriores que concentran la luz hasta 10.000 soles y fibra óptica para dirigir el flujo de luz a una célula solar ubicada en el interior. El experimento permitió que se

iluminara un área pequeña de la célula solar con un flujo altamente concentrado, mientras se mantenía oscuro el resto del área de la célula. También se realizaron ensayos bajo irradiancia uniforme colocando un caleidoscopio de sección transversal cuadrada en la célula solar. Los resultados mostraron cierta insensibilidad del rendimiento de la célula a la irradiación localizada, aunque se observó la disminución para flujos de ultra-alta concentración.

En [83], se realizó una caracterización interior del impacto de la no-uniformidad de la irradiancia y espectral en las TJSC integrados con lentes Fresnel de enfoque puntual y diferentes configuraciones SOE. En ésta, se modificó la distancia POE-receptor y se fotografió los perfiles de irradiancia de las subcélulas *top* y *middle* con una cámara CCD equipado con filtros adecuados. El estudio se complementó con simulaciones de trazado de rayos, que mostraron una mayor falta de uniformidad que los perfiles fotografiados, aunque fueron útiles para explicar el comportamiento bajo condiciones de no uniformidad. Demostraron experimentalmente que las no-uniformidades absolutas y espectrales espacialmente son muy sensibles a la distancia entre el primario y el receptor para un concentrador compuesto por una lente Fresnel. Optimizar esta distancia es fundamental debido a que a diferentes distancias POE-receptor, diferentes subcélulas limiten la corriente. Concluyeron que el uso de SOEs contribuye a la reducción de estas no-uniformidades y mejora el rendimiento eléctrico de las células CPV.

En [84], los autores desarrollaron un módulo CPV ultra-fino y compacto mediante la unión de micro-células directamente debajo de una matriz de lentes, sin el uso de SOE. El diseño de la lente fue realizado para que el área de la luz absorbida en la subcélula *top* sea lo más ancha posible para reducir las pérdidas por efecto *Joule*, provocadas por la resistencia en esta subcélula. Con esta configuración, las pérdidas ópticas se redujeron al 9,6%, aunque las pérdidas por falta de uniformidad alcanzaron el 6,7%. En general, la disminución de las pérdidas ópticas compensó el aumento de los efectos de no-uniformidad, contribuyendo con un prototipo que podría mejorar la tecnología convencional de CPV.

Otra de las formas más recurridas en la literatura para generar patrones de no-uniformidad consiste en introducir perfiles de sombreado sobre la superficie del concentrador óptico [85] o directamente sobre la superficie de la célula solar [86].

En [85], se realizó una caracterización exterior de TJSC integradas con lentes Fresnel de foco puntual y un SOE formado por una pirámide truncada mediante la reproducción de sombreado parcial sobre la óptica primaria. Las medidas confirmaron que la potencia máxima disminuía linealmente con el factor de sombreado en condiciones estables de irradiancia, espectro y temperatura ambiente. Mientras que en [86], se sombreó directamente sobre la superficie del dispositivo CPV, las células solares de triple unión GaInP/GaInAs/Ge y de unión única GaAs y se midieron en el interior a un sol. Se encontró

una pérdida de rendimiento de alrededor del 4% para un sombreado parcial severo, lo que evidenció un comportamiento bajo diferentes condiciones de sombreado bastante robusto. El rendimiento de la célula se mostró insensible a la localización del sombreado a pesar del efecto de recombinación del perímetro (siendo éste el principal responsable del esparcimiento lateral de la densidad de corriente).

Por otro lado, en el campo de la PV convencional, en [87] investigaron los efectos de iluminación no uniforme en el rendimiento de una célula PV a baja y media concentración. Llegaron a la conclusión de que el rendimiento fue independiente de la ubicación, del tamaño y de la forma geométrica de la iluminación no uniforme, aunque este efecto se hizo notable a media concentración.

Además, otros autores [88] estudiaron el comportamiento espectral de las diferentes tecnologías fotovoltaicas en función de los parámetros atmosféricos más relevantes que influyen en el espectro de la luz solar, es decir, la masa de aire (AM), la profundidad óptica del aerosol (AOD) y el agua precipitable (PW).

3.3. Paliar los efectos de la no-uniformidad

Del mismo modo que en la caracterización, se pueden encontrar diferentes estrategias para paliar los efectos de la no-uniformidad en las células solares CPV:

3.3.1. Optimización de la metalización frontal

Diferentes autores [89, 90, 91, 92] estudiaron la influencia del espaciado y el ancho del *finger* en el rendimiento de la célula solar. Llegando a la conclusión de que el contacto frontal debe adaptarse al flujo de intensidad con perfil no uniforme generado por la óptica concentradora, además de establecer un compromiso entre las pérdidas por sombreado y las pérdidas resistivas generadas por la metalización.

3.3.2. Reducción del sombreado producido por la metalización

Esta línea de investigación puede tomar dos posibles vías: a) Introducir óptica dieléctrica o b) optimizar el diseño de metalización.

Varios autores investigaron como de reducir el área no activa de la célula, minimizando la superficie sombreada por la metalización frontal mediante óptica dieléctrica [93, 94, 95]. Esta estrategia tenía dos posibles ventajas. En primer lugar, se consigue redirigir los rayos que impactarían sobre el *finger*, produciendo sombra, hacia área activa del semiconductor. En segundo lugar, permite aumentar el ancho del *finger* mientras se mantiene la misma área activa, reduciendo así la resistencia en serie.

En cuanto a la otra opción, consiste en optimizar el diseño de la metalización. Esta idea surge de un problema intrínseco a introducir óptica secundaria. Debido a las reflexiones/refracciones producidas en la superficie del SOE aumenta el ángulo de incidencia de los rayos sobre el receptor PV considerablemente. Esto produce un aumento en el sombreado causado por la metalización sobre la parte activa del dispositivo PV. En [96], estudiaron este efecto y concluyeron que se deben tener en cuenta y optimizar la orientación y diseño de la metalización con respecto al sistema óptico.

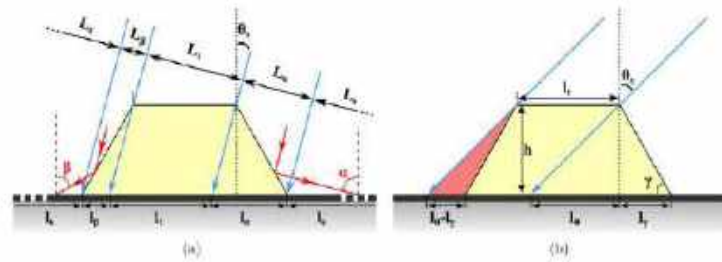


Figura 6. Sección transversal de un finger de la metalización con un haz de luz incidente bajo el ángulo θ_s [96].

3.3.3. Optimización del perfil de Temperatura

Otros autores [97], estudiaron la posibilidad de generar un perfil de temperatura adaptado al rendimiento eléctrico de la célula optimizado a cualquier perfil de iluminación incidente. Demostrando que introduciendo un perfil de temperatura Gaussiano para un concentrador lineal (que genera un perfil de iluminación gaussiano) se podía obtener un mejor rendimiento de la célula. Esto se debe a la menor temperatura producida en las zonas que rodean al *busbar* (zonas de alto drenaje de la corriente) resultando una reducción de las pérdidas por efecto *Joule* respecto a un perfil plano de temperatura y un aumento en la V_{oc} [98]. Este logro permite adaptar el perfil de temperaturas para maximizar la V_{oc} de la célula para cualquier perfil de irradiancia.

3.3.4. Introducción de elementos ópticos

El uso de elementos ópticos secundarios (SOE) para homogeneizar los patrones de no-uniformidad sobre los receptores CPV es la estrategia más utilizada. Los SOEs actúan como homogeneizadores de la luz, especialmente aquellos que usan ópticas sin formación de imagen *non-imaging optics* [8].

En [99], demostraron con ayuda de un modelo tridimensional óptico-eléctrico que el uso de un módulo con SOE produce una distribución más uniforme de los patrones de iluminación que uno sin SOE. Esto producía un mejor FF debido al equilibrio entre corrientes generadas entre subcélulas.

En [100], realizaron una optimización multi-parámetro de las dimensiones del sistema óptico de acuerdo los perfiles de iluminación no uniformes con el objetivo de maximizar la eficiencia del sistema en condiciones próximas a las de operación real.

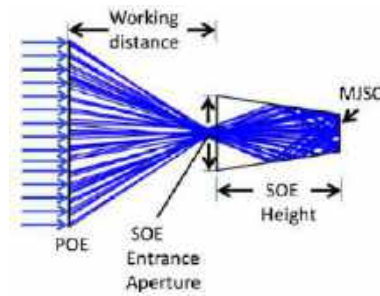


Figura 7. Optimización de los parámetros definidos por el sistema óptico de dos etapas [100].

3.3.5. Desarrollo de nuevos conceptos

En [101], modelaron el comportamiento de un módulo compuesto por un array de células VMJ conectadas en paralelo. Entre los resultados principales destaca su poca sensibilidad a la no-uniformidad respecto a los módulos convencionales conectados en serie. Con la ventaja adicional, de que la conexión en paralelo de estas células las hace independiente de los diodos bypass.

Todas estas estrategias pueden imponer un coste adicional al sistema de CPV. Por lo tanto, un análisis en profundidad del impacto de las no-uniformidades es esencial para compensar el coste extra de la estrategia elegida con sus beneficios en términos de mejora de la eficiencia.

Bibliografía

- [1] E. F. Fernández, F. Almonacid, P. M. Rodrigo and P. Pérez-Higueras, “CPV Systems,” in *McEvoy's Handbook of Photovoltaics. Fundamentals and Applications*, 3 ed., 2017, pp. 931-985.
- [2] International Electrotechnical Commission, «IEC 60904-3:2019 Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data,» 2019.
- [3] R. Mohedano y R. Leutz, «CPV Optics,» de *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*, 2016, pp. 187-238.
- [4] International Electrotechnical Commission, «IEC 62670-1 standard. Concentrator Photovoltaic (CPV) - Performance testing - Part 1: Standard conditions.,» 2013.
- [5] H. Baig, K. C. Heasman and T. K. Mallick, “Non-uniform Illumination in Concentrating Solar Cells,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 5890-5909, 2012.
- [6] W. T. Welford y R. Winston, *High collection nonimaging optics*, Academic Press, 1989.
- [7] J. Chaves, *Introduction to Nonimaging Optics*, CRC Press, 2015.
- [8] R. Winston, J. C. Miñano y P. Benítez, *Nonimaging Optics*, Elsevier Academic Press, 2005.
- [9] M. Victoria, C. Domínguez, I. Antón and G. Sala, “Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses,” *Optics Express*, vol. 17, no. 8, p. 6487–6492, 2009.
- [10] NREL, «Best Research Cell Efficiency,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [11] J. Aguilera, «Introduction,» de *High Concentrator Photovoltaics. Fundamentals, Engineering and Power Plants.*, 2015.
- [12] P. Pérez-Higueras, E. Muñoz, G. Almonacid y P. Vidal, «High Concentrator PhotoVoltaics efficiencies: Present status and forecast.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1810-1815, 2011.
- [13] S. Van Riesen, M. Neubauer y e. al., «New module design with 4-junction solar cells for high efficiencies.,» *AIP Conference Proceedings*, vol. 1679, n° 100006, 2015.
- [14] M. Steiner, G. Siefer y e. al., «43% Sunlight to Electricity Conversion Efficiency Using CPV.,» *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*, vol. 6, n° 4, pp. 1020-1024, 2016.
- [15] L. Micheli, E. Fernández, F. Almonacid, T. Mallick y G. Smestad, «Performance, limits and economic perspectives for passive cooling of High Concentrator Photovoltaics,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 153, pp. 164-178, 2016.
- [16] A. Riverola, A. Moreno y D. Chemisana, «Performance of a dielectric PVT concentrator for building-façade integration.,» *Opt. Express*, vol. 26, pp. 892-903, 2018.
- [17] M. Wiesenfarth y e. al., «Advanced concepts in Concentrating Photovoltaics (CPV),» de *European PV Solar Energy Conference*, 2012.
- [18] M. Wiesenfarth, S. P. Philipps y A. W. Bett, «Current status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology.,» Fraunhofer ISE and NREL, 2017.
- [19] USGS, «Mineral Commodity Summaries,» 2020.
- [20] M. Wiesenfarth, I. Anton y A. Bett, «Challenges in the design of concentrator photovoltaic (CPV) modules to achieve highest efficiencies.,» *Applied Physics Reviews*, vol. 5, n° 041601, 2018.
- [21] P. Pérez-Higueras, J. Ferrer-Rodríguez, F. Almonacid y E. Fernández, «Efficiency and acceptance angle of High Concentrator Photovoltaic modules: Current status and indoor measurements,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 143-153, 2018.
- [22] C. Algora y I. Rey-Stolle, «The Interest and Potential of Ultra-High Concentration,» de *Next Generation of Photovoltaics*, Springer, 2012, pp. 23-60.
- [23] C. Kost, S. Shammugan, V. Jülch, H. Nguyen y T. Schlegl, «Levelized Cost Of Electricity - Renewable Energy Technologies,» 2018.
- [24] L. Micheli, E. Fernández, F. Almonacid, T. Mallick y G. Smestad, «Performance, limits and economic perspectives for passive cooling of High Concentrator Photovoltaics,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 153, pp. 164-178, 2016.

- [25] E. Fernández, N. Seoane, F. Almonacid y A. García-Loureiro, «Vertical-Tunnel-Junction (VTJ) Solar Cell for Ultra-High Light Concentrations (>2000 Suns),» *IEEE Electron Device Letters*, vol. 40, nº 1, pp. 44-47, 2019.
- [26] J. Ferrer-Rodríguez, E. Fernández, F. Almonacid y P. Pérez-Higueras, «Optical design of a 4-off-axis-unit Cassegrain ultra-high concentrator photovoltaics module with a central receiver,» *Optics Letters*, vol. 41, nº 9, pp. 1985-1988, 2016.
- [27] J. P. Ferrer-Rodríguez, J. M. Saura, E. F. Fernández, F. Almonacid, D. L. Talavera y P. Pérez-Higueras, «Exploring ultra-high concentrator photovoltaic Cassegrain-Koehler-based designs up to 6000x,» *Optics Express*, vol. 28, nº 5, pp. 6609-6617, 2020.
- [28] K. Shanks, J. Ferrer-Rodríguez, E. Fernández, F. Almonacid, P. Pérez-Higueras, S. Senthilarasu y T. Mallick, «A > 3000 suns high concentrator photovoltaic design based on multiple Fresnel lens primaries focusing to one central solar cell,» *Solar Energy*, vol. 169, pp. 457-467, 2018.
- [29] D. Feuermann, J. Gordon y M. Huleihil, «Solar fiber-optic mini-dish concentrators: First experimental results and field experience,» *Solar Energy*, vol. 72, nº 6, pp. 459-472, 2002.
- [30] J. Gordon, E. Katz, D. Feuermann y M. Huleihil, «Toward ultrahigh-flux photovoltaic concentration,» *Applied Physic Letters*, vol. 84, nº 18, pp. 3642-3644, 2004.
- [31] A. Braun, B. Hirsch, E. A. Katz, J. M. Gordon, W. Guter y A. W. Bett, «Localized irradiation effects on tunnel diode transitions in multi-junction concentrator solar cells,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, pp. 1692-1695, 2009.
- [32] E. A. Katz, J. M. Gordon, W. Tassew and D. Feuermann, «Photovoltaic characterization of concentrator solar cells by localized irradiation,» *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, vol. 100, no. 044514, 2006.
- [33] I. Antón, D. Silva, G. Sala, A. Bett, G. Siefer, I. Luque-Heredia y T. Trebst, «The PV-FIBRE Concentrator: A System for Indoor Operation of 1000X MJ Solar Cells,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 15, pp. 431-447, 2007.
- [34] J. Karp, E. Tremblay, J. Hallas y J. Ford, «Orthogonal and secondary concentration in planar micro-optic solar collectors,» *Optics Express*, vol. 19, nº S4, pp. A673-A685, 2011.
- [35] G. Arnaoutakis, J. Marques-Hueso, T. Mallick y B. Richards, «Coupling of sunlight into optical fibres and spectral dependence for solar energy applications,» *Solar Energy*, vol. 93, pp. 235-243, 2013.
- [36] M. Park, K. Oh, J. Kim, H. Shin y B. Du-Oh, «A tapered dielectric waveguide solar concentrator for a compound semiconductor photovoltaic cell,» *Optics Express*, vol. 18, nº 2, pp. 1777-1787, 2010.
- [37] G. Peharz, J. Ferrer-Rodríguez, G. Siefer y A. Bett, «Investigations on the temperature dependence of CPV modules equipped with triple-junction solar cells,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, pp. 54-60, 2011.
- [38] H. Helmers, M. Schachtner y A. Bett, «Influence of temperature and irradiance on triple-junction solar subcells,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 116, pp. 144-152, 2013.
- [39] H. Cotal, C. Fetzer, J. Boisvert, G. Kinsey, R. King, P. Hebert, H. Yoon y N. Karam, «III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics,» *Energy and Environmental Science*, vol. 2, pp. 174-192, 2009.
- [40] A. Vossier, J. Zeitouny, E. Katz, A. Dollet, G. Flamant y J. Gordon, «Performance bounds and perspective for hybrid solar photovoltaics/thermal electricity-generation strategies,» *Sustainable Energy and Fuels*, vol. 2, pp. 2060-2067, 2018.
- [41] P. Rodrigo, A. Valera, E. Fernández y F. Almonacid, «Performance and economic limits of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules,» *Applied Energy*, vol. 238, pp. 1150-1162, 2019.
- [42] H. Bahaidarah, A. Baloch y P. Gandhidasan, «Uniform cooling of photovoltaic panels: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 1520-1544, 2016.
- [43] Y. Zhangbo, L. Qifen, Z. Qunzhi y P. Weiguo, «The cooling technology of solar cells under concentrated system,» de *IEEE 6th International Power Electron. Motion Control Conf. 3.*, 2009.
- [44] L. Micheli, E. Fernández, F. Almonacid, K. Reddy y T. Mallick, «Enhancing Ultra-High CPV Passive Cooling Using Least-Material Finned Heat Sinks,» de *11th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems*, 2015.
- [45] L. Micheli, E. Fernández, F. Almonacid, K. Reddy y T. Mallick, «Optimization of the Least-Material Approach for Passive Ultra High CPV Cooling,» de *42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2015.
- [46] M. Saadah, E. Hernandez y A. Balandin, «Thermal Management of Concentrated Multi-Junction Solar Cells with Graphene-Enhanced Thermal Interface Materials,» *Applied Sciences*, vol. 7, nº 589, pp. 1-13, 2017.

- [47] A. Vossier, B. Hirsch, E. Katz y J. Gordon, «On the ultra-miniaturization of concentrator solar cells,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, pp. 1188-1192, 2011.
- [48] A. Valera, E. Fernández, P. Rodrigo y F. Almonacid, «Feasibility of flat-plate heat-sinks using microscale solar cells up to 10,000 suns concentrations,» *Solar Energy*, vol. 181, pp. 361-371, 2019.
- [49] A. Ritou, P. Voarino y O. Racourt, «Does micro-scaling of CPV modules improve efficiency? A cell-to-module performance analysis,» *Solar Energy*, vol. 173, pp. 789-803, 2018.
- [50] M. Alves, A. Pérez-Rodríguez, P. Dale, C. Domínguez y S. Sadewasser, «Thin-film micro-concentrator solar cells,» *J. Phys.: Energy*, vol. 2, n° 012001, pp. 1-20, 2020.
- [51] B. Wacaser, P. Kirchner, Y. Martin, A. Badahdah, R. Sandstrom, N. Moumen, H. Khonkar, Y. Alharbi y T. van-Kessel, «Exploring the limits of concentration for UHCPV,» *IEEE*, pp. 999-1002, 2011.
- [52] A. Braun, B. Hirsch, A. Vossier, E. A. Katz y J. M. Gordon, «Temperature dynamics of multijunction concentrator solar cells up to ultra-high irradiance,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, pp. 202-208, 2011.
- [53] S. Charan, M. Konagai y K. Takahashi, «Series resistance effects in (GaAl)As/GaAs concentrator solar cells,» *Journal of Applied Physics*, vol. 50, pp. 963-968, 1979.
- [54] D. Schroder y D. Meier, «Solar Cell Contact Resistance - A Review,» *IEEE TransElectronDev.*, vol. 31, pp. 637-647, 1984.
- [55] P. Huo, I. Lombardero, I. García y I. Rey-Stolle, «Enhanced performance of GaInP/GaAs/Ge solar cells under high concentration through Pd/Ge/Ti/Pd/Al grid metallization,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 27, pp. 789-797, 2019.
- [56] C. Outes, E. Fernández, N. Seoane, F. Almonacid y A. García-Loureiro, «Numerical optimisation and recombination effects on the vertical-tunnel-junction (VTJ) GaAs solar cell up to 10,000 suns,» *Solar Energy*, vol. 203, pp. 136-144, 2020.
- [57] R. M. Swanson, «The Promise of Concentrators,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 8, pp. 93-111, 2000.
- [58] Z. Alferov, V. Adreev y V. Romyantsev, «III-V Heterostructures in Photovoltaics,» de *Concentrator Photovoltaics*, Springer Ser Opt Sci 130, 2007, pp. 25-50.
- [59] S. P. Philipps y A. W. Bett, «III-V Multi-junction solar cells and concentrating photovoltaic (CPV) systems,» *Adv. Opt. Techn.*, vol. 3, pp. 469-478, 2014.
- [60] B. Paquette, A. Boucherif, V. Aimez y R. Arès, «Novel multijunction solar cell design for low cost, high concentration systems,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 24, pp. 150-158, 2016.
- [61] M. Ochoa, E. Barrigón, L. Barrutia, I. García, I. Rey-Stolle y C. Algora, «Limiting factors on the semiconductor structure of III-V multijunction solar cells for ultra high concentration (1000-5000 suns),» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 24, pp. 1332-1345, 2016.
- [62] E. Barrigón, I. García, L. Barrutia, I. Rey-Stolle y C. Algora, «Highly conductive p++-AlGaAs/n++-GaInP tunnel junctions for ultra high concentrator solar cells,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 22, pp. 399-404, 2014.
- [63] M. El-Gahouchi, M. Aziziyan, R. Arès, S. Fafard y A. Boucherif, «Cost-effective energy harvesting at ultra-high concentration with duplicated concentrated photovoltaic solar cells,» *Energy Science and Engineering*, vol. 00, pp. 1-11, 2020.
- [64] A. Gover y P. Stella, «Vertical Multijunction Solar-Cell One-Dimensional Analysis,» *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 21, 1974.
- [65] Y. Xing, P. Han, S. Wang, P. Liang, S. Lou, Y. Zhang, S. Hu, H. Zhu, C. Zhao y Y. Mi, «A review of concentrator silicon solar cells,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 1697-1708, 2015.
- [66] R. Pozner, G. Segev, R. Sarfaty, A. Kribus y Y. Rosenwaks, «Vertical junction Si cells for concentrating photovoltaics,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 20, pp. 197-208, 2012.
- [67] Y. Xing, P. Han, S. Wang, Y. Fan, P. Liang, Z. Ye, X. Li, S. Hu, S. Lou, C. Zhao y Y. Mi, «Performance analysis of vertical multi-junction solar cell with front surface diffusion for high concentration,» *Solar Energy*, vol. 94, pp. 8-18, 2013.
- [68] B. Sater y N. Sater, «High Voltage Silicon VMJ Solar Cells for up to 1000 Suns Intensities,» *IEEE*, pp. 1019-1022, 2002.

- [69] A. Braun, A. Vossier, E. A. Katz, N. J. Ekins-Daukes y J. M. Gordon, «Multiple-bandgap vertical-junction architectures for ultra-efficient concentrator solar cells,» *Energy and Environmental Science*, vol. 5, pp. 8523-8527, 2012.
- [70] E. T. Franklin y J. S. Coventry, «Effects of highly non-uniform illumination distribution on electrical performance on solar cells,» de *ANZES Solar Conf.*, Newcastle, Australia, 2002.
- [71] W. Guter y A. W. Bett, «I-V characterization of tunnel diodes and multijunction solar cells,» *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 53, n° 9, pp. 2216-2222, 2006.
- [72] L. W. James, «Effects of concentrator chromatic aberration on multi-junction cells,» de *1st World Conf. Photovolt. Energy Convers. (WCPEC)*, Hawaii, 1994.
- [73] S. R. Kurtz y M. J. O'Neill, «Estimating and controlling chromatic aberration losses for two-junction, two-terminal devices in refractive concentrator systems,» de *25th IEEE PVSC*, Washington, D.C., 1996.
- [74] K. Araki, M. Kondo, H. Uozumi y M. Yamaguchi, «Experimental proof and theoretical analysis on effectiveness of passive homogenizers to 3J concentrator solar cells,» de *3rd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan, 2003.
- [75] K. Nishioka, T. Takamoto y e. al., «Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge Triple-Junction Solar Cell under Concentrated Light by Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis,» *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 43, n° 3, pp. 882-889, 2004.
- [76] J. M. Olson, «Simulation of nonuniform irradiance in multijunction III-V solar cells,» de *35th IEEE PVSC*, 2010.
- [77] J. F. Wheeldon, C. E. Valdivia, A. Walker, G. Kolhatkar, D. Masson, B. Riel, S. Fafard, A. Jaouad, A. Turala, R. Arès, V. Aimez, T. J. Hall y K. Hinzer, «GaAs, AlGaAs and InGaP Tunnel Junctions for Multi-Junction Solar Cells Under Concentration: Resistance Study,» de *6th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems (CPV-6)*, 2010.
- [78] I. García, P. Espinet-González, I. Rey-Stolle and C. Algora, «Analysis of Chromatic Aberration Effects in Triple-Junction Solar Cells Using Advanced Distributed Models,» *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*, vol. 1, no. 2, pp. 219-224, 2011.
- [79] P. Espinet-González, I. Rey-Stolle, C. Algora and I. García, «Analysis of the behavior of multijunction solar cells under high irradiance Gaussian light profiles showing chromatic aberration with emphasis on tunnel junction performance,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, pp. 743-753, 2015.
- [80] S. R. Kurtz, D. J. Friedman y J. M. Olson, «The effect of chromatic aberrations on two-junction, two-terminal devices on concentrator system,» de *1st World Conf. Photovolt. Energy Convers. (WCPEC)*, Hawaii, 1994.
- [81] H. Cotal y R. Sherif, «The effect of chromatic aberration on the performance of GaInP/GaAs/Ge concentrator solar cells from Fresnel optics,» de *31st IEEE PVSC 2005*, Florida, 2005.
- [82] R. Herrero, M. Victoria, C. Domínguez, S. Askins, I. Antón y G. Sala, «Concentration photovoltaic optical system irradiance distribution measurements and its effect on multi-junction solar cells,» *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, vol. 20, pp. 423-430, 2012.
- [83] M. Victoria, R. Herrero, C. Domínguez, I. Antón, S. Askins y G. Sala, «Characterization of the spatial distribution of irradiance and spectrum in concentrating photovoltaic systems and their effect on multi-junction solar cells,» *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, vol. 21, p. 308-318, 2013.
- [84] N. Hayashi, D. Inoue, M. Matsumoto, A. Matsushita, H. Higuchi, Y. Aya and T. Nakagawa, «High-efficiency thin and compact concentrator photovoltaics with micro-solar cells directly attached to a lens array,» *Optical Society of America*, vol. 23, no. 11, pp. 594-603, 2015.
- [85] P. Rodrigo, E. F. Fernández, F. Almonacid and P. J. Pérez-Higueras, «Outdoor measurement of high concentration photovoltaic receivers operating with partial shading on the primary optics,» *Energy*, vol. 61, pp. 583-588, 2013.
- [86] L. A. A. Bunthof, S. Veelenturf, E. J. Haverkamp, W. H. M. Corbeek, D. van der Woude, G. J. Bauhuis, P. Mulder, E. Vlieg and J. J. Schermer, «Partially shaded III-V concentrator solar cell performance,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 179, pp. 231-240, 2018.
- [87] P. D. Ikwaba, M. Smyth, A. Zacharopoulos and J. Mondol, «The Effects of Nonuniform Illumination on the Electrical Performance of a Single Conventional Photovoltaic Cell,» *International Journal of Photoenergy*, vol. 631953, p. 10, 2015.
- [88] P. M. Rodrigo, E. F. Fernández, F. M. Almonacid and P. J. Pérez-Higueras, «Quantification of the spectral coupling of atmosphere and photovoltaic system performance: Indexes, methods and impact on energy harvesting,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 163, p. 73-90, 2017.

- [89] A. Vossier, D. Chemisana, G. Flamant and A. Dollet, "Very high fluxes for concentrating photovoltaics: Considerations from simple experiments and modeling," *Renewable Energy*, vol. 38, pp. 31-39, 2012.
- [90] P. Sharma, A. W. Walker, J. F. Wheeldon, K. Hinzer and H. Schriemer, "Enhanced Efficiencies for High-Concentration, Multijunction PV Systems by Optimizing Grid Spacing under Nonuniform Illumination," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2014, no. 582083, p. 7, 2014.
- [91] P. Sharma, M. Wilkins y H. H. K. Schriemer, «Modeling nonuniform irradiance and chromatic aberration effects in a four junction solar cell using SPICE,» *IEEE*, vol. 978, pp. 3293-3297, 2014.
- [92] V. M. Andreev, R. Romero and O. V. Sulima, "An efficient circular contact grid for concentrator solar cells," *Sol. Cells*, vol. 11 (3), pp. 197-210, 1984.
- [93] O. Korech, J. M. Gordon, E. A. Katz, D. Feuermann and N. Eisenberg, "Efficiency enhancement in concentrator solar cells by dielectric micro-concentrators," *Photovoltaic Cell and Module Technologies*, vol. 6651, no. 665103, p. 5, 2007.
- [94] P. García-Linares, P. Voarino, C. Domínguez, O. Dellea, P. Besson, P. Fugier and M. Baudrit, "Reduction of Front-Metallization Grid Shading in Concentrator Cells through Laser Micro-Grooved Cover Glass," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1679, no. 060001, p. 8, 2015.
- [95] M. F. Schumann, M. Langenhorst, M. Smeets, K. Ding, U. W. Paetzold and M. Wegener, "All-Angle Invisibility Cloaking of Contact Fingers on Solar Cells by Refractive Free-Form Surfaces," *Advanced Optical Materials*, vol. 1700164, p. 7, 2017.
- [96] L. A. A. Bunthof, J. Bos-Coenrad, W. H. M. Corbeek, E. Vlieg and J. J. Schermer, "The illumination angle dependency of CPV solar cell electrical performance," *Solar Energy*, vol. 144, pp. 166-174, 2017.
- [97] D. Chemisana and J. I. Rosell, "Electrical performance increase of concentrator solar cells under Gaussian temperature profiles," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, pp. 444-455, 2011.
- [98] A. Mellor, J. L. Domenech-Garret, D. Chemisana and J. I. Rosell, "A two-dimensional finite element model of front surface current flow in cells under non-uniform, concentrated illumination," *Solar Energy*, vol. 83, no. 9, pp. 1459-1465, 2009.
- [99] Y. Ota and K. Nishioka, "Three-dimensional simulating of concentrator photovoltaic modules using ray trace and equivalent circuit simulators," *Solar Energy*, vol. 86, pp. 476-481, 2012.
- [100] P. Sharma, M. Wilkins, H. Schriemer and K. Hinzer, "Concentrating optical system optimization for 3- and 4-junction solar cells: impact of illumination profiles," *Journal of Photonics for Energy*, vol. 7, no. 014501, p. 19, 2017.
- [101] G. Segev and A. Kribus, "Performance of CPV modules based on vertical tunnel multi-junction cells under non-uniform illumination," *Solar Energy*, vol. 88, pp. 120-128, 2013.

Capítulo 3: Generación, caracterización experimental y por simulación de los patrones de no-uniformidad y su impacto eléctrico en una MJSC

Capítulo 3: Generación, caracterización experimental y por simulación de los patrones de no-uniformidad y su impacto eléctrico en una MJSC

1. Introducción

Este capítulo persigue dos objetivos principales. En primer lugar, se pretende desarrollar un montaje experimental fiable y una metodología con capacidad de repetitividad para generar y caracterizar patrones de no-uniformidad de irradiancia y espectral producidos por la óptica concentradora. El segundo objetivo consiste en arrojar luz sobre el comportamiento eléctrico de los dispositivos CPV bajo condiciones de iluminación no-uniforme producida por la óptica concentradora.

Con este propósito, se decidió evaluar dos configuraciones ópticas de foco puntual sin SOE: una lente Fresnel refractiva fabricada en PMMA y un espejo parabólico construido en vidrio con un recubrimiento trasero de aluminio. Ambos sistemas presentan similar concentración geométrica $C_g \approx 560x$.

El trabajo realizado para llevar a cabo esta investigación se puede clasificar en tres enfoques principales: por un lado, el análisis teórico por trazado de rayos y el experimental de los patrones de distribución de la luz; y por otro, el impacto en los parámetros eléctricos de una MJSC. Para abordar estos análisis se implementó una metodología para generar patrones y caracterizarlos. De estos patrones caracterizados se obtuvo los valores de *peak-to-average ratio* (PAR) para cada una de las subcélulas (*top* y *middle*), permitiendo así cuantificar la no-uniformidad espacial de la irradiancia. Asimismo, se introdujo un nuevo índice para cuantificar la no-uniformidad espectral, *spectral uniformity ratio* (SUR).

Es valorable mencionar que hay numerosos estudios que intentan predecir el comportamiento de las células solares bajo iluminación no-uniforme mediante modelos teóricos y análisis de trazado de rayos. Sin embargo, pocos estudios afrontan el problema de cuantificar experimentalmente los efectos de la no-uniformidad sobre un receptor CPV. El enfoque experimental es esencial para ampliar el conocimiento sobre los patrones de distribución de la luz real y su respuesta en las células solares. Este estudio es innovador debido a que permite comparar los efectos producidos por la iluminación no-uniforme generados por una óptica refractiva y reflexiva.

2. Resultados y contribución al estado del arte

Los experimentos fueron realizados mediante el uso de un simulador solar CPV, en el laboratorio del CEACTEMA. Entre los elementos más importantes del equipo de medida cabe destacar: a) un simulador solar CPV, *multi-flash Helios 3198*; b) una cámara CCD (*charge-coupled device*); c) una máscara opaca adjunta a una pantalla lambertiana; d) una óptica concentradora; e) un espejo parabólico colimador; f) una lámpara de flash de Xenón y g) diferentes filtros neutros y de color.

Para llevar a cabo un estudio exclusivo del efecto de la uniformidad sobre una MJSC se mantienen fijas tres condiciones de contorno que podrían alterar la correcta medición de la misma. En este sentido se procedió a mantener el espectro incidente fijo entre un rango $SMR_{top/mid}^{CC} = 1 \pm 0.02$; la temperatura del laboratorio se mantuvo a 25 ± 0.5 °C además del correcto alineamiento del sistema CPV. De este modo, la metodología para generar los patrones de forma controlada sigue los siguientes pasos:

- Se fijó la posición de *on-focus* a la distancia en la cual la corriente de cortocircuito (I_{sc}) es máxima.
- Se modificó la distancia entre el POE y el receptor hasta ± 2 mm en el eje óptico desde *on-focus*. Este hecho perturba la distribución de la luz producida por el concentrador refractivo y reflexivo.
- Se modificó la irradiancia incidente (DNI) con el propósito de mantener constante la I_{sc} en cada una de las posiciones analizadas y consecuentemente evitar el impacto de diferentes ratios de concentración.

Por otro lado, la metodología para caracterizar los patrones de uniformidad consiste en fotografiar con una cámara CCD los patrones de irradiancia formados sobre un difusor lambertiano usado como pantalla. La respuesta espectral (SR) de la cámara fue adaptada para coincidir con la SR de las subcélulas *top* y *middle*. Para ello se introdujeron dos filtros de color pasa-banda dentro de la cámara. Esto permitió la adecuada separación espectral simulando un comportamiento espectral similar a las subcélulas *top* y *middle*. La culminación de la caracterización de estos patrones fue fundamental para posteriormente introducir los índices del PAR y SUR ; y de este modo poder cuantificar la no-uniformidad de la irradiancia y espectral, respectivamente.

2.1. Análisis teórico y experimental de los patrones de distribución de la luz

En el modelo teórico por trazado de rayos se consideraron las relaciones geométricas de los elementos ópticos y las leyes fundamentales de refracción y reflexión. Se obtuvieron los perfiles de distribución de irradiancia sobre los rangos espectrales correspondientes a las subcélulas *top* y *middle* para varias distancias del receptor respecto de la posición de *on-focus* (d).

En el caso del mono-módulo refractivo, se observó que para la subcélula *top* tanto el pico de irradiancia como la no-uniformidad sobre la subcélula *top* (PAR_{top}) tendían a disminuir conforme se incrementaba d , resultando una distribución de irradiancia más uniforme a medida que se incrementaba esta distancia. La tendencia en la subcélula *middle* mostraba

un comportamiento opuesto, aumentando los valores picos de irradiancia, así como el PAR_{mid} , al aumentar d , esto derivaba en patrones de irradiancia cada vez menos uniformes para posiciones alejadas del concentrador. Estas tendencias se corroboraron en la caracterización experimental, en la que los rayos con menor longitud de onda (subcélula *top*) tendían a focalizarse en valores negativos de d y se dispersaban conforme aumentaba el valor d , mientras que los rayos con mayor longitud de onda (subcélula *middle*) tendían a focalizarse en valores positivos de d y se dispersaban al reducir el valor d . La diferencia máxima entre ambos valores de PAR es de alrededor 0.5, lo que representa una variación moderada de la no-uniformidad de la irradiancia con la distancia POE-receptor.

Tanto en los resultados experimentales como en las simulaciones se demostró que las mayores diferencias de PAR entre ambas subcélulas se obtuvieron para valores de d superiores a 1 mm, debido al mayor impacto de la AC. Así lo muestra la representación del SUR, con una tendencia creciente para los mayores valores de d . Los valores de SUR en el sistema refractivo oscilan entre 1.54 y 1.77.

En el caso del mono-módulo reflexivo, se observaron tendencias similares para las subcélulas *top* y *middle*, tanto el pico de irradiancia como los valores del PAR alcanzan un máximo para distancias próximas a la posición de *on-focus*, respecto de la cual muestran tendencias simétricas. Cuando se distancia de esta posición en ambos sentidos (aumentar o disminuir d) los valores del pico de irradiancia y PAR disminuyen rápidamente y la distribución de irradiancia se hace más uniforme. La variación máxima alcanzada en los valores del PAR es de 3.1, esto representa que la no-uniformidad de la irradiancia varía drásticamente con d en el caso del espejo.

Los valores de SUR obtenidos en el sistema reflexivo oscilan entre 1.23 y 1.36, resultando ser cuantitativamente más pequeños que los obtenidos en la lente Fresnel, lo que indica el menor impacto de la AC y la alta uniformidad espectral presentada por la óptica reflexiva.

2.2. Análisis experimental del impacto eléctrico en el receptor CPV

Se trazaron las curvas IV para cada posición del receptor y se analizaron sus parámetros eléctricos con las condiciones citadas anteriormente: $C_g \approx 560x$, I_{sc} constante, $SMR_{top/mid}^{cc} = 1 \pm 0.02$; temperatura del laboratorio 25 ± 0.5 °C.

En ambos mono-módulos se observó que la potencia en el punto de máxima potencia (P_{mpp}) es directamente proporcional al FF debido a que la V_{oc} no presenta cambios al modificar la d y la I_{sc} se mantiene constante.

Analizando el comportamiento de la resistencia en serie aparente (*apparent R_s*) se encontró una relación entre ésta y la no-uniformidad de la irradiancia. Por otro lado, se observó que

la tendencia de la resistencia en paralelo aparente (*apparent R_{sh}*) estaba influenciada por la combinación de la no-uniformidad espectral (SUR) y la no-uniformidad de la irradiancia en la subcélula *top* (PAR_{top}).

La comprensión del comportamiento de los efectos de no-uniformidad producidos por la MJSC sólo es posible teniendo en cuenta la combinación de ambos efectos en conjunto, ya que la dominación de un efecto sobre el otro determinará el comportamiento eléctrico del dispositivo fotovoltaico. Este análisis se realizó para cada una de las posiciones evaluadas experimentalmente ($d \pm 2\text{mm}$). Finalmente, los resultados mostraron que las variaciones del FF, y consecuentemente de la *P_{mpp}*, en función de la distancia POE-receptor fueron inducidas principalmente por la degradación de la resistencia en paralelo aparente en el caso del sistema refractivo. Por otro lado, en el sistema reflexivo, estas variaciones fueron producidas mayormente por la degradación de la resistencia en serie aparente, dónde se produjo una alta no-uniformidad de la irradiancia en las subcélulas *top* y *middle*, coincidiendo con los mayores valores de PAR.

3. Publicaciones

- Jose M. Saura, Eduardo F. Fernández, Florencia M. Almonacid and Daniel Chemisana, “Characterisation and impact of non-uniformity on multi-junction solar cells (MJSC) caused by concentrator optics” 15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-15), AIP Conference Proceedings 2149, 020004-1–020004-6 (2019).
- Jose M. Saura, Pedro M. Rodrigo, Florencia M. Almonacid, Daniel Chemisana and Eduardo F. Fernández, “Experimental characterisation of irradiance and spectral non-uniformity and its impact on multi-junction solar cells: Refractive vs. reflective optics”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 225, 111061 (2021).

Characterisation and Impact of Non-uniformity on Multi-Junction Solar Cells (MJSC) Caused by Concentrator Optics

Jose M. Saura¹, Eduardo F. Fernández^{2, a)}, Florencia M. Almonacid², and Daniel Chemisana^{1, b)}

¹*University of Lleida, c/ Pere de Cabrera s/n, 25001, Lleida, Spain*

²*Centro de Estudios Avanzados en Energía y Medio Ambiente, University of Jaén, 23071, Jaén, Spain*

^{a)}Corresponding author: eduardo.fernandez@ujaen.es;

^{b)}Corresponding author: daniel.chemisana@udl.cat

Abstract. In this work, it has been developed a method to generate non-homogeneous light patterns on multi-junction solar cells. These patterns have been generated modifying the distance between the CPV receiver and the primary optics, which is based on a Fresnel lens. In order to diminish the impact of other variables, the incident spectrum, laboratory temperature and effective concentration have been kept constant: $SMR_{top-mid} = 1 \pm 0.02$, $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ and 380 ± 3 suns, respectively. The light patterns on the top and middle subcells are measured using a CCD camera and band-pass filters. Results show that the electrical performance of the solar cells depends on the spatial and spectral profiles. The present work introduces a procedure to characterise and evaluate the impact of non-uniformities on the output of multi-junction solar cells. Nevertheless, this work is not intended to predict the actual output of the cell as a function of the light profiles, but to provide indications for possible underlying mechanisms.

INTRODUCTION

The main aim of concentrator photovoltaic (CPV) technology is to focus a large amount of sunlight on a small solar cell surface, usually a multi-junction solar cell (MJSC) [1]. Nowadays, there is a high competitiveness to generate electricity as cheap and efficient as possible. In this context, CPV presents several advantages to produce high energy densities at a very low cost. In order to concentrate the sunlight on a receiver, the use of refractive (e.g. Fresnel lenses) or reflective (e.g. parabolic mirrors) optical elements is needed. It is widely known that both collectors are considered non-ideal concentrators. As a consequence, the incident sunlight is altered and optical issues such as spatial and spectral non-uniformity of the light distribution striking the solar cells arise [2].

Bearing the above in mind, previous studies were carried out to highlight the importance of the spectral changes on the electrical performance of MJSCs [112], as well as the impact of extreme spatial non-uniformities produced by means of optical fiber that generates localised irradiances on a small area of MJSCs [113]. Moreover, other authors characterised the non-uniformity patterns produced by refractive optics using the mask method [5], and later concluded that the use of secondary optical elements (SOE) contributes to improve the spatial and spectral irradiance distribution on the solar cells [6].

In this work, a detailed method of characterisation has been developed to generate, characterise and measure the effect of the non-uniform light profiles on a MJSC caused by concentrator optics, in particular a Fresnel lens. This study will allow for a better understanding of non-uniformity patterns and for an evaluation of each light distribution pattern received by each subcell, taking into account the spectral splitting phenomena. Quantifying this non-uniformity would improve future designs of the MJSCs and make more accurate predictions in its performance.

MATERIALS AND EXPERIMENTAL PROCEDURE

Description of the Mono-Module

To analyse the behaviour of MJSCs under non-uniform irradiance profiles, a CPV mono-module equipped with refractive concentrator optics based on a Fresnel lens as Primary Optical Element (POE) has been tested. The semiconductor device consists of a GaInP/GaInAs/Ge Triple-Junction Solar Cell (TJSC) sized $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$, provided by AZUR SPACE Solar Power GmbH. The CPV mono-module has a geometrical concentration ($C_g = A_{\text{lens}}/A_{\text{cell}}$), of 560x. Table 1 shows the main features of the optical concentrator of the CPV mono-module under test and also the main electrical parameters of the solar cell.

TABLE 1. Characteristics of the mono-module composed by a refractive Fresnel lens and the electrical parameters of the TJSC: short-circuit current (I_{sc}), open-circuit voltage (V_{oc}), current at maximum power point (I_{MPP}), voltage at maximum power point (V_{MPP}), power at maximum power point (P_{MPP}), fill factor (FF) and efficiency (η_{cell}) at 1000 suns (1 sun = 1000W/m^2) at concentrator standard test conditions (CSTC).

Fresnel lens		Triple Junction solar sell	
Parameter	Value	Parameter	Value
Size [mm^2]	130 x 130	Size [mm^2]	5.5 x 5.5
Focal distance [mm]	152.0	I_{sc} [A]	4.629
Facet spacing [mm]	0.381	V_{oc} [V]	3.159
Thickness [mm]	1.8	I_{MPP} [A]	4.547
C_g [suns]	559	V_{MPP} [V]	2.727
		P_{MPP} [W]	12.40
		FF [-]	0.848
		η_{cell} [%]	40.6

Description of the Characterisation System (Experimental Set Up)

To conduct this study, a specific set-up and a novel experimental procedure have been used to generate and characterise the non-uniformity patterns under controlled conditions, see figure 1. The experimental set-up consists of:

- A CPV solar simulator, multi-flash Helios 3198 (rated as AAA simulator): to control the measurement conditions such as incident irradiance and spectrum. This solar simulator uses a Xenon flash lamp for reproducing the solar radiation and a parabolic mirror that collimates the incident rays, reflecting them with a high spatial and spectral uniformity towards a limited work area [7]. The spectral irradiance distribution is close to the AM1.5D reference spectrum, and the collimation angle is around $\pm 0.4^\circ$ [8].
- Three component cells or isotype cells calibrated at the reference spectrum (AM1.5D) that have been used to monitor the spectrum.
- Opto-mechanic instruments like rail carriers, an optical breadboard, mounting posts, posts holders and plate holder to fix the receiver are utilised to accurately modify and adjust the desired distance between the POE and the receiver.
- Colour and neutral filters and different glass cover for the Xenon flash-lamp to maintain the same spectral conditions for different irradiance values.
- A Lambertian diffuser screen to take the pictures of the light distribution produced by the optics on the CPV receiver position [9].
- A Charge Coupled Device (CCD) camera which enables characterise the light distribution over the Lambertian diffuser and different band-pass filters to achieve a camera spectral response similar to the TJSC used.

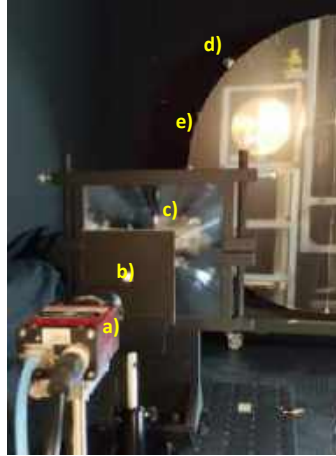


FIGURE 1. Set-up used for the characterisation of non-uniformity patterns in a TJSC by using the Helios 3198 CPV solar simulator at the CEAEMA in the University of Jaén: a) CCD camera, b) opaque mask and lambertian screen, c) Fresnel lens d) Collimator mirror and e) Xe flash lamp and filters.

Procedure to Generate Non-Uniformity Patterns

In this work, the non-uniformity patterns on the concentrator solar cell (CPV receiver) are generated by modifying the distance between the CPV receiver and the concentrator optics, named POE-receiver distance. In order to generate and analyse accurately these patterns, three boundary conditions have been fixed: the incident spectrum, the alignment of the set-up and the room temperature.

Firstly, the different irradiance profiles have been generated with the solar simulator, keeping the spectral distribution and the effective concentration constant. To achieve this, the three isotype-component cells were used to monitor the spectrum. These solar cells have a similar spectral response, SR, than each subcell of the TJSC under test; top, middle and bottom subcell respectively. The Spectral Matching Ratio parameter, SMR, has been used to compare the behaviour of the subcells for an incident spectrum with the calibrated isotypes at the reference spectrum (AM1.5D). In this case the SMR between top and middle subcells has been used to ensure a constant incident spectral distribution close to the AM1.5D spectrum [10]:

$$\text{SMR}_{\text{top/mid}} = \frac{I_{\text{sc,top}}^{\text{meas}}}{I_{\text{sc,top}}^*} / \frac{I_{\text{sc,mid}}^{\text{meas}}}{I_{\text{sc,mid}}^*} = \frac{\text{DNI}_{\text{top}}}{\text{DNI}_{\text{mid}}} \quad (4)$$

where $I_{\text{sc},i}^{\text{meas}}$ is the measured short-circuit current of the i -subcell (top or middle) isotype-component cell; the superscript *, means reference conditions (AM1.5D as incident spectrum at 1 sun) and the DNI_i is the i -subcell-effective direct normal irradiance. The incident spectrum has been set to be in the range of $\text{SMR}_{\text{top-mid}} = 1 \pm 0.02$.

Secondly, to adjust the alignment of the whole set-up to the continuous light, a halogen lamp located in the centre of the Xenon flash tube, was used by changing the angle in the same and perpendicular direction than planes of the lens and receiver (azimuth and elevation angles) of the adjustable support structure to diminish the possible effects of optical mismatches [7]. Besides, the on-focus position was designated as the position where I_{sc} maximised at equal incident DNI. Once the mono-modules are on-focus, the distance between the POE and the receiver in the optical axis is altered, so the distribution of light on the receiver is disturbed, to generate the different lighting patterns on TJSCs produced by the refractive concentrator. The incident DNI is increased to compensate the losses of the contribution of light generated on the receiver due to distancing different positions from the on-focus position. As a consequence, in all positions the effective concentration level, C_{eff} , is similar and defined as:

$$C_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{sc}}^{\text{meas}}}{I_{\text{sc}}^*} \quad (5)$$

The input C_{eff} has been set to 380 ± 3 suns for all the measurements. Finally, the laboratory temperature was maintained at $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ during all experimental campaign to avoid thermal effects in the results [11].

Characterisation of Non-Uniformity Patterns

The procedure of generating patterns is repeated to obtain a set of them. With the aim to characterise these patterns, the TJSC is replaced by the Lambertian diffuser, which will be used as a screen where the pattern pictures will be taken by the

CCD camera. This camera has a different spectral response (SR) to the TJSC, and therefore, this has to be modified to accurately characterise the light patterns. Taking this into account, two different band-pass colour filters have been introduced inside the CCD camera in order to achieve similar SRs. These band-pass colour filters enable a suitable spectral splitting between the blue and red contribution of the incident light. As a consequence, the spectral behaviour of the camera and the TJSC are similar. In order to show this, the Spectral Factor, SF, of both devices has been estimated [112]. This parameter allows the spectral behaviour of both devices to be compared and could be expressed as:

$$SF_{\text{device}} = \frac{J_{\text{sc,device}-i} \cdot \text{DNI}^*}{J_{\text{sc,device}-i}^* \cdot \text{DNI}} \quad (6)$$

where the term “device” refers to the TJSC or the CCD camera, the subscript i corresponds to the subcell top or middle considered, DNI is the broadband direct normal irradiance and $J_{\text{sc},i}$ is the short-circuit current density of the i -subcell (top or middle) for a specific incident direct spectrum $E_b(\lambda)$:

$$J_{\text{sc,device}-i} = \int E_b(\lambda) \cdot SR_{\text{device}-i}(\lambda) \cdot \tau_{\text{filter}} \cdot d\lambda \quad (7)$$

where τ_{filter} represents the transmissivity of a given band-pass filter; its value being 1 if the solar cell is considered.

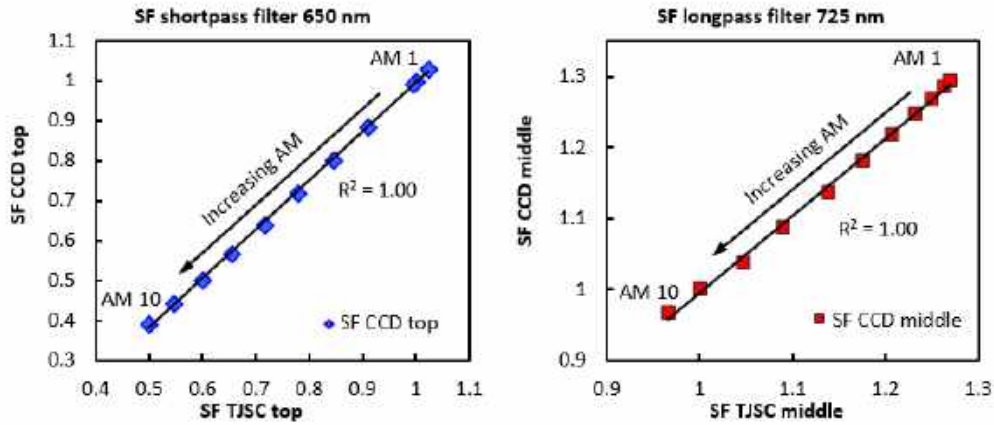


FIGURE 2. Filter selection for the CCD camera. a) simulated SF for the CCD camera and top-subcell for the top contribution and b) simulated SF for the CCD camera and middle-subcell for the middle contribution.

Figure 2 shows the relation between the simulated SF of the camera and the solar cell for the top and middle subcells. These values have been obtained by using the Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine (SMARTS) [12, 13, 14] and the equation defined above. At this stage, the air mass (AM) has been varied from 1 to 10 in order to cover a wide outdoor spectral range. The figure 2a) depicts the SF for the camera with the short-pass filter, replicating the top contribution, as a function of the SF of the top-subcell varying the incident spectrum from AM = 1 to 10. Analogously, figure 2b) represents the SF for the CCD camera versus the middle-subcell for the middle contribution. As can be seen in this picture, a high linearity can be observed in both approaches, with values of the R-square equal to 1. Therefore, similar tendencies to the TJSC subcells are achieved by introducing these filters inside the CCD camera. Thus, a better uniformity patterns characterisation can be studied with this sophisticated set-up.

Once it has been verified that the SR of the CCD camera is similar to the TJSC, the Peak-to-Average Ratio parameter, PAR, is going to be used to evaluate the patterns. This parameter is the most widely used to experimentally characterise and evaluate the impact of the light distribution on multi-junction solar cells [5, 6]. Despite its simplicity, it allows the effect of non-uniformity in the solar cells to be easily quantified, and could be defined as the peak to average I_{sc} obtained along the whole X-Y surface of the solar cell as:

$$PAR_i = \frac{I_{\text{sc},i \text{ peak}}(x,y)}{I_{\text{sc},i \text{ avg}}(x,y)} \quad (8)$$

RESULTS AND DISCUSSION

As previously mentioned, to evaluate the spatial non-uniformity of the patterns generated, the PAR parameter has been calculated for each one of these patterns. It is important to note that the value of the PAR is inversely related to spatial uniformity.

In our experiment, different results for a Fresnel lens case study were obtained: figure 3 left displays the light patterns produced by the Fresnel lens on the top (above pictures) and middle subcells (below pictures) when the POE-receiver distance is 2 mm shorter respect to the on-focus position (3a and 3c) and for the on-focus position (3b and 3d). As it can be seen, the performance of the light patterns is different when the POE-receiver distance is modified. At the position 2 mm shorter from the optics, the contribution of the top junction shows a much-localised distribution of the light in the centre of the cell, becoming the most intense position for the contribution of the blue rays (figure 3a). As the distance with the receiver increases, it is distributed more homogeneous and less intensely in the centre as shown in the on-focus position (figure 3b). On the other hand, the red rays distribution is much more uniform for distances closer to the optic, being the position -2mm (figure 3c) where the greatest homogeneity in the light distribution in the middle subcell is achieved. As the distance with the receiver increases, it is distributed in a more centralised way, generating a sharped Gaussian profile as observed in the on-focus position (figure 3d). This trend is confirmed by observing the PAR values of figure 3 right. The PAR_{top} decreases as the POE-receiver distance increases; while the PAR_{mid} has the opposite tendency; it increases as the distance of the receiver respects to the optics increases. Both PARs (PAR_{top} and PAR_{mid}) have only a difference of 0.5 between the highest and the lowest value. This shows that the spatial uniformity varies moderately in each subcell.

As can be expected, the effect of chromatic aberration is produced by refractive concentrators. In terms of spectral uniformity; when the receiver is closer to the on-focus position, a remarkable spectral relationship is obtained. In figure 3b and 3d can be observed a matching between top and red contribution. On the other hand, when the POE-receiver distance varies from the on-focus position (in both directions), the spectral uniformity becomes worse. Figures 3a and 3c represent the spectral mismatch between red and blue light contribution. As can be also seen, the FF is strongly affected by the spectral and spatial uniformity. It varies from around 0.72 to 0.81 from the maximum to the minimum distance to the POE. Finally, it can be seen that FF maximised its value in the position +1 mm. This maximum in the FF could be due to a trade-off between the uniformity spectral relationship and the spatial uniformity on the top subcell in the CPV receiver.

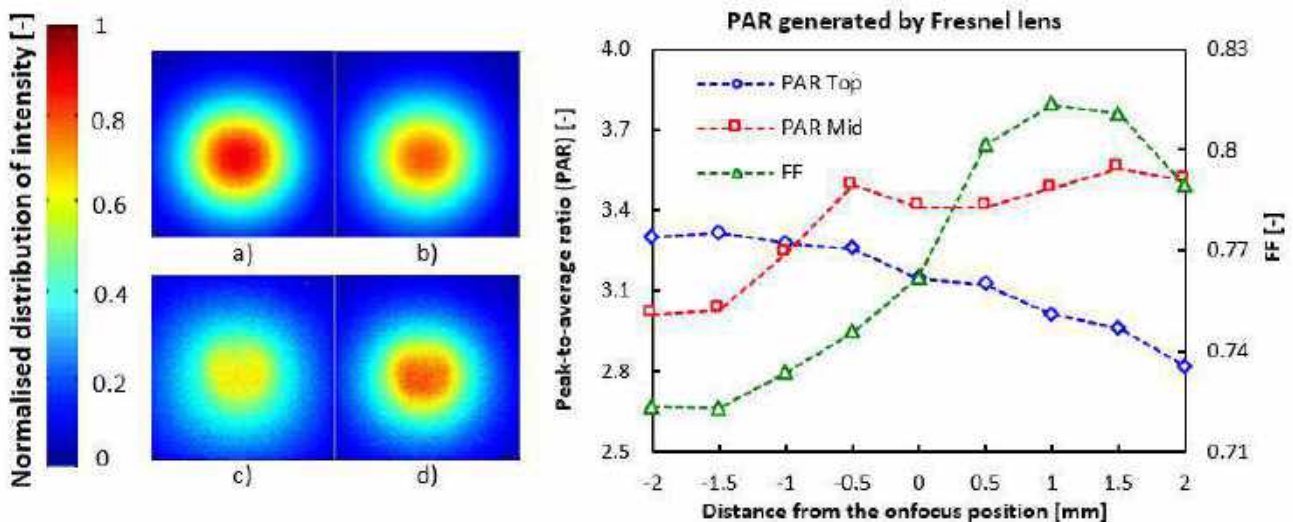


FIGURE 3. (Left) Light distribution produced by a Fresnel-lens on the top and middle subcells for the position 2 mm nearer from the optics a) for the top and c) for the middle contribution. In addition, b) top and d) middle distribution has been represented on the on-focus position, which is equivalent to the design focal point of concentrator optics. (Right) PAR_{top} , PAR_{mid} and FF for a refractive mono-module.

CONCLUSIONS

A detailed method of characterisation has been developed to generate, characterise and measure the effect of the uniformity light profiles on a TJSC caused by concentrator optics, in particular a Fresnel lens. This study allows for a better understanding of uniformity effects on the semiconductor and for an evaluation of each light distribution pattern received by each subcell, taking into account the spectral splitting phenomena. Among the results, it is worth mentioning the strong role that chromatic aberration plays in the light distribution patterns generated over the TJSC. The results also show that the POE-receiver distance is very sensitive to the spectral uniformity while the spatial distribution changes moderately. The electrical effects will be conditioned by the combination of spectral and spatial non-uniformities as can be seen in the FF that is strongly affected by the spectral and spatial uniformity.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is partially funded by European Regional Development Fund (ERDF) and Spanish Economy Ministry, grant number ENE2016-78251-R

REFERENCES

1. P. Pérez-Higueras, J.P. Ferrer-Rodríguez, F. Almonacid, and E.F. Fernández, "Efficiency and acceptance angle of High Concentrator Photovoltaic modules: Current status and indoor measurements" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 143-153, 2018.
2. H Baig, K.C. Heasman, and T.K. Mallick, "Non-uniform Illumination in Concentrating Solar Cells," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 5890-5909, 2012.
3. P.M. Rodrigo, E.F. Fernández, F.M. Almonacid, and P.J. Pérez-Higueras, "Quantification of the spectral coupling of atmosphere and photovoltaic system performance: Indexes, methods and impact on energy harvesting," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 163, pp. 73–90, 2017.
4. Eugene A. Katz, Jeffrey M. Gordon, Wondesen Tassew, and Daniel Feuermann, "Photovoltaic characterization of concentrator solar cells by localized irradiation," *Journal of Applied Physics*, vol. 100, no. 044514, 2006.
5. R Herrero et al., "Concentration photovoltaic optical system irradiance distribution measurements and its effect on multi-junction solar cells," *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, vol. 20, pp. 423-430, 2011.
6. M. Victoria, R. Herrero, C. Domínguez, I. Antón, and S. Sala, G. Askins, "Characterization of the spatial distribution of irradiance and spectrum in concentrating photovoltaic systems and their effect on multi-junction solar cells," vol. 21, pp. 308–318, 2011.
7. E.F. Fernández, J.P. Ferrer-Rodríguez, F. Almonacid, and P. Pérez-Higueras, "Current-voltage dynamics of multi-junction CPV modules under different irradiance levels," *Solar Energy*, vol. 155, pp. 39–50, 2017.
8. C. Domínguez, I. Antón, and G. Sala, "Solar simulator for concentrator photovoltaic systems," *Optics Express*, vol. 16, no. 19, pp. 14894–14901, 2008.
9. Optics, Edmund. White difusser. www.edmundoptics.com/p/125-x-125mm-white-diffusing-glass/3836
10. C. Domínguez, I. Antón, G. Sala, and Stephen Askins, "Current-matching estimation for multijunction cells within a CPV module by means of component cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, no. 7, pp. 1478–1488, 2013.
11. Gerhard Peharz*, Juan P. Ferrer Rodríguez, Gerald Siefert, and Andreas W. Bett, "Investigations on the temperature dependence of CPV modules equipped with triple-junction solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, pp. 54-60, 2011.
12. C. Gueymard, "Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance" *Solar Energy*, vol. 71, no. 5, pp. 325-346, 2001.
13. C. Gueymard, "SMARTS. A simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment. Professional paper FSEC-PF-270-95. Florida solar energy center, Cocoa, FL1995.
14. C. Gueymard, "The SMARTS spectral irradiance model after 25 years: New developments and validation of reference spectra" (2019) *Solar Energy*, 187, pp. 233-253.

Experimental characterisation of irradiance and spectral non-uniformity and its impact on multi-junction solar cells: refractive vs. reflective optics

Jose M. Saura^{a, b}, Pedro M. Rodrigo^{a, c, *}, Florencia M. Almonacid^a, Daniel Chemisana^b and, Eduardo F. Fernández^{a, *}

^aAdvances in Photovoltaic Technology (AdPVTech), CEACTEMA, Las Lagunillas Campus, University of Jaén (UJA), Jaén 23071, Spain.

^b Applied Physics Section of the Environmental Science Department, University of Lleida, 25001 Lleida, Spain.

^c Universidad Panamericana. Facultad de Ingeniería. Josemaría Escrivá de Balaguer 101, Aguascalientes, Aguascalientes, 20290, México.

* Corresponding authors:

prodrigo@ujaen.es (Pedro M. Rodrigo), eduardo.fernandez@ujaen.es (Eduardo F. Fernández)

Abstract

The impact of non-uniform illumination on triple junction solar cells equipped with either refractive or reflective optics without secondary optical elements is characterised by varying the concentrator-to-receiver distance. Indoor experiments covering both electrical measurements and photographs with a charge-coupled device camera are performed. The non-uniformities are examined by differentiating two spectral bands, those affecting the top and middle subcells. This allows the irradiance and spectral distributions to be analysed. The analysis is complemented with ray tracing simulations. Results show a different behaviour for the refractive and reflective systems. Irradiance non-uniformities in the case of the reflective system around the on-focus position are higher than those measured in the refractive system. However, the spectral non-uniformities that characterise the refractive system constitute only a residual effect in the reflective system. The drop in the solar cell fill factor caused by non-uniformities is mainly driven by the degradation of the slope of the I-V curve near the short-circuit point in the case of the refractive system, while it is mainly driven by the degradation of the slope of the I-V curve near the open-circuit point in the case of the reflective system. Both systems are very sensitive to the concentrator-to-receiver distance, a critical parameter that must be accurately designed in any concentrator system. The findings will allow the trade-off between increasing performance and increasing cost strategies to mitigate the non-uniformities in concentrator photovoltaic systems to be better evaluated.

Keywords: concentrator photovoltaics, chromatic aberration, multi-junction solar cell, non-uniformity, ray tracing, sun simulator

Nomenclature

<i>AM</i>	Air mass, dimensionless
<i>C</i>	Concentration, suns
<i>D</i>	Diameter of lens, mm
<i>d</i>	Distance of the receiver from the on-focus position, mm
<i>DNI</i>	Direct normal irradiance, W/m ²
<i>E</i>	Spectral distribution, W/(m ² ·nm)
<i>f</i>	Focal distance, mm
<i>FF</i>	Fill factor, dimensionless
<i>I</i>	Current, A
<i>J</i>	Current density, A/cm ²
<i>n</i>	Refractive index, dimensionless
<i>P</i>	Power, W
<i>PAR</i>	Peak-to-average ratio, dimensionless
<i>R</i>	Electrical resistance, Ω
<i>SF</i>	Spectral factor, dimensionless
<i>SMR</i>	Spectral matching ratio, dimensionless
<i>SR</i>	Spectral response, A/W
<i>SUR</i>	Spectral uniformity ratio, dimensionless
<i>th</i>	Thickness of the glass cover of a mirror, mm
<i>V</i>	Voltage, V
<i>x</i>	Cartesian coordinate (horizontal axis), mm
<i>y</i>	Cartesian coordinate (vertical axis), mm

Greek symbols

β	Angle of the slope of a facet in a Fresnel lens, °
η	Efficiency, dimensionless
θ	Angle that determines the direction of a ray path in the mirror configuration, °
λ	Wavelength, nm
τ	Spectral transmittance, dimensionless
Ω	Angle between the refracted light and the optical axis in a Fresnel lens, °

Subscripts

<i>546</i>	At 546 nm
<i>avg</i>	Average
<i>b</i>	Beam
<i>cell</i>	Solar cell
<i>device</i>	Device (solar cell or CCD camera)
<i>eff</i>	Effective
<i>filter</i>	Filter
<i>g</i>	Geometric
<i>i</i>	i-subcell (top, middle or bottom)

<i>max</i>	Maximum
<i>mid</i>	Middle subcell
<i>min</i>	Minimum
<i>mpp</i>	Maximum power point
<i>oc</i>	Open-circuit
<i>opt</i>	Optical
<i>peak</i>	Peak
<i>s</i>	Series
<i>sc</i>	Short-circuit
<i>sh</i>	Shunt
<i>top</i>	Top subcell

Superscripts

<i>1 sun</i>	At one sun
<i>c.c.</i>	Component cells
<i>CCD</i>	Charge-coupled device
<i>CSTC</i>	Concentrator standard test conditions
<i>meas</i>	Measured

Abbreviations

2D	Two dimensions
ASTM	American society for testing and materials
CA	Chromatic aberration
CCD	Charge-coupled device
CEACTEMA	Centre for advanced studies in earth sciences, energy and environment
CPV	Concentrator photovoltaic
CSTC	Concentrator standard test conditions
MJ	Multi-junction
MM	Spectral mismatch factor
PMMA	Poly(methyl methacrylate)
POE	Primary optical element
SMARTS	Simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine
SOE	Secondary optical element
TJSC	Triple-junction solar cell

1. Introduction

Concentrator photovoltaics (CPV) has achieved the highest conversion efficiencies of sunlight to electricity among all the terrestrial solar applications [1]. The aim of CPV is to replace the expensive semiconductor material by cheaper optical devices. CPV systems can take advantage of the use of small highly efficient multi-junction (MJ) solar cells that would be very expensive in non-concentrating applications. These cells are made up of several monolithically grown subcells with different band gap energies, interconnected in series by tunnel junctions, achieving two-terminal devices suitable for CPV module implementation. The broader exploitation of the sunlight spectrum

is the main reason for their high efficiency. CPV systems also benefit from the increase of the solar cell open-circuit voltage and the decrease of the temperature coefficient of efficiency with concentration [2].

A concern in CPV systems is the impact of non-uniform illumination on the solar cell surface due to the use of concentrators or other external reasons such as partial shading. Non-uniform illumination causes an increase of the solar cell effective series resistance, decreasing the fill factor (FF) and lowering the conversion efficiency. In addition, the poorly illuminated regions of the solar cells operate as dark diodes, contributing only with recombination current without photogeneration. Non-uniformity usually generates Gaussian irradiance profiles on the cell area with a peak irradiance localized on a small region. This region has, therefore, a peak current density that could exceed the tunnel junction threshold, causing a dramatic decrease of efficiency [3,4]. Another problem is related to chromatic aberrations (CAs) of the optics that cause non-uniform spectral distribution over the cell area. This spectral variation can lower the current generated by a specific subcell, limiting the total current provided by the device due to the series interconnection of the subcells. Moreover, areas with different limiting subcells can co-exist, causing lateral current flows in the layers connecting the subcells [5]. All these physical effects decrease the solar cell efficiency. Irradiance and spectral non-uniformities can cause a relative efficiency loss of around 4 % in a typical CPV system, while these losses can increase considerably in systems with a poorly designed optical configuration [6].

There are several strategies to limit the impact of non-uniformities, the most common being the use of secondary optical elements (SOEs) in the solar receivers, which act as light homogenizers, especially those that use nonimaging optics [7]. Other strategies imply a proper selection of solar cell size, doping and, front contact grid. These strategies can impose an extra-cost to the CPV system. Therefore, an in deep analysis of the impact of non-uniformities is essential for balancing the extra-cost of the chosen strategy with its benefits in terms of efficiency improvement.

In the scientific literature, there are some studies that use distributed solar cell models and ray tracing analysis for simulating the behaviour of solar cells under non-uniform illumination [8–14]. However, for these studies to be useful, detailed knowledge of the real light distribution patterns and structure of MJ solar cells must be available. In addition, the complexity of the models and the difficulty of modelling the imperfections of the optical elements can lead to simulated results different from the real systems. Because of this, the experimental approach becomes essential for investigating this topic. In [15], the effect of CA in two-junction two-terminal solar cells with linear dome Fresnel as primary optical element (POE) was measured, resulting in 4 % power loss compared to the four-terminal

device. In [16], authors presented the indoor characterisation of triple-junction solar cells (TJSCs) integrated with point-focus Fresnel lens. The FF and efficiency curves obtained after changing the POE-receiver distance allowed the CA effect to be identified. In [17], authors printed masks on transparent acetate film to reproduce Gaussian illumination profiles on TJSCs, which were measured in a concentrator cell tester. They also measured these cells integrated with a point-focus Fresnel lens with different SOE configurations, and photographed the irradiance profiles over a translucent Lambertian diffusing surface with a charge-coupled device (CCD) camera. Results showed a drop of FF with increasing irradiance peak-to-average ratio (PAR). The masked cells showed lower decay in FF than the realistic systems, which was attributed to CA (not present in the experiment with masks). In [18], an experimental set-up consisting of two outdoor reflectors that concentrate the light up to 10000 suns and optical fiber for transferring the light flux to a solar cell located indoors was developed. The experiment allowed a small area of the solar cell to be illuminated with a highly concentrated flux, while keeping dark the rest of the cell area. Tests under uniform irradiance were also performed by placing a square cross-section kaleidoscope on the solar cell. Results showed certain insensitivity of cell performance to the localized irradiance, although the decay for ultra-high concentration fluxes was observed. In [19], an indoor characterisation of the impact of the irradiance and spectral non-uniformity on TJSCs integrated with point-focus Fresnel lens and different SOE configurations was carried out by varying the POE-receiver distance and photographing the top and middle subcell irradiance profiles with a CCD camera equipped with suitable filters. The study was complemented with ray tracing simulations, which showed higher non-uniformity than the photographed profiles, although being useful to explain the behaviour under the non-uniformities. In [20], authors developed an ultra-thin and compact CPV module by attaching micro-cells directly below a lens array, without the use of SOEs. With this configuration, the optical losses were lowered to 9.6 %, although the non-uniformity losses reached 6.7 %. Overall, the decrease of the optical losses compensated the increase of the non-uniformity effects, giving a prototype that could improve the conventional CPV technology. In [21], the outdoor characterisation of TJSCs integrated with point-focus Fresnel lens and SOE was performed by reproducing partial shading on the primary optics. Results showed a decay of the maximum power proportional to the shaded area. In [22], triple-junction GaInP/GaInAs/Ge and single-junction GaAs solar cells were shaded directly on the cell area and measured indoors at one sun and by using a concentration reflector. A performance loss of around 4 % was found for severe partial shading, the behaviour under different shading conditions being quite robust. The cell performance was insensitive to the location of the shaded area on the solar cell surface.

In spite of the reported efforts for understanding the effects of irradiance and spectral non-uniformities on MJ solar cells, there is still a wide field of research. In this paper, the indoor characterisation of irradiance and spectral non-uniformity and its impact on TJSCs is carried out for two point-focus optical configurations without SOE: flat Fresnel lens and dish-shaped mirror. These are the most widely used POE configurations in current CPV systems. The non-uniformities are caused, in this case, by the characteristics of the POE itself and, by varying the POE-receiver distance. Although there are some previous studies on this topic, most of them focused on refractive optics, this study presents a comparative analysis between both types of optics (refractive and reflective). The irradiance profiles are photographed in two different spectral bands, those affecting the top and middle subcells, allowing CAs to be detected and quantified. A novel index is introduced to quantify the CA: the spectral uniformity ratio (*SUR*). The behaviour of the main electrical parameters of the solar cells is measured and interpreted from the point of view of the irradiance and spectral non-uniformity by varying the POE-receiver distance. The study is complemented with ray tracing simulations that help to explain the measured behaviour. The complete analysis sheds light on the impact of non-uniform illumination on refractive and reflective CPV systems and will help the designers in taking decisions on strategies for mitigating the non-uniformities and improving the system performance.

2. Materials and methods

2.1. CPV systems under study

Two different CPV single-units were analysed. Both modules are equipped with GaInP/GaInAs/Ge TJSCs, type 3C42A provided by AZUR SPACE Solar Power GmbH, with an area of $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$. In addition, they have a geometric concentration (C_g) of $\approx 560 \times$, C_g being the ratio between the POE and cell area. However, one uses a refractive concentrator based on a poly(methyl methacrylate) (PMMA) square Fresnel lens as POE, while the other uses a reflective optical element based on a dish-shaped mirror. The mirror has a circular aperture and is made of glass with an aluminium back coating. The glass thickness is 1.2 mm.

The main features of the concentrator optics of the CPV single-units under test are shown in table 1. The focal distance in the case of the dish-shaped mirror is 75 mm in agreement with the manufacturer specification. In the case of the Fresnel lens, the focal distance has been reduced to 152 mm in order to match the concentration ratio of both optical elements for a proper comparison. It should be noted that since the aspect ratio of the reflector is half of the lens (aspect ratio = 1.04), the sensitivity to misalignments is double and, therefore, careful optical positioning is necessary to carry out the

experiment with the dish-shaped mirror. The main electrical parameters at concentrator standard test conditions (CSTC) (CSTC: 1000 W/m² irradiance, 25 °C cell temperature and AM1.5D reference spectrum) [23] are shown in table 2. The spectral response (*SR*) of each subcell (top, middle and bottom) of the TJSC is shown in Fig. 1.

Table 1. Characteristics of the concentrator optics of the two single-units under study. The optical efficiency has been estimated as described in [34].

Parameter	Fresnel lens	Dish-shaped mirror
Aperture area [mm ²]	16900	16989
Focal distance [mm]*	152	75
Aspect ratio [-]	1.04	0.51
Facet spacing [mm]	0.381	-
Thickness [mm]	1.8	1.2
C _g [-]	559	561
Optical efficiency [%]	80.2	83.6

*Focal distance estimated at 546 nm (max. tolerance ± 5%), as provided by the manufacturer.

Table 2. Electrical parameters of the TJSC at 1000 suns: short-circuit current (I_{sc}), open-circuit voltage (V_{oc}), current at maximum power point (I_{mpp}), voltage at maximum power point (V_{mpp}), maximum power (P_{mpp}), fill factor (FF) and efficiency (η_{cell}), as provided by the manufacturer.

Parameter	Value
Size [mm ²]	5.5 x 5.5
I_{sc} [A]	4.629
V_{oc} [V]	3.159
I_{mpp} [A]	4.547
V_{mpp} [V]	2.727
P_{mpp} [W]	12.40
FF [-]	0.848
η_{cell} [%]	40.6

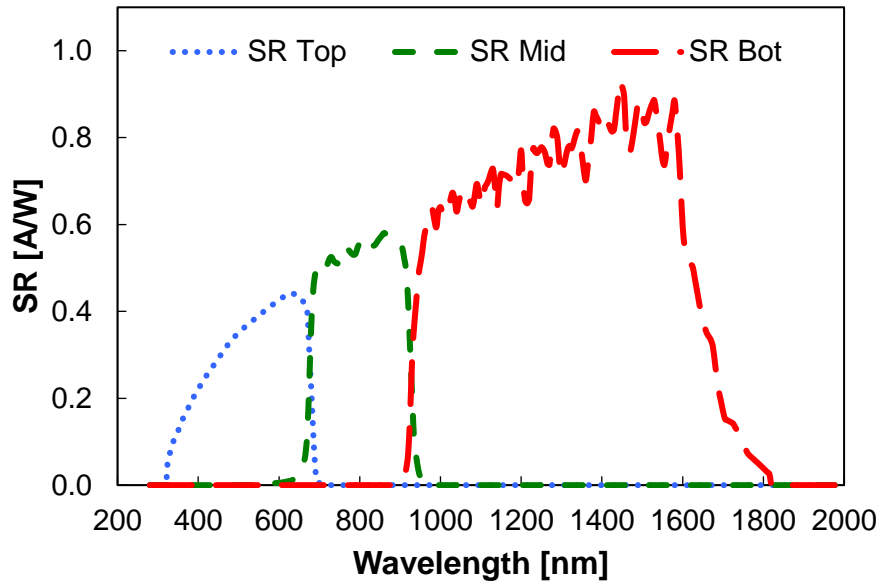


Figure 1. Spectral response of the top, middle and bottom subcells of the GaInP/GaInAs/Ge TJSC considered in this study, as provided by the manufacturer.

2.2. Experimental set-up

2.2.1. Elements

The experiments were carried out in a sun simulator, where the POE-receiver distance could be accurately varied. For each single-unit and POE-receiver distance, two experiments were performed. First, the solar cell I-V curve was measured. Second, the solar cell was replaced by a Lambertian-like diffuser screen, and the irradiance profile was photographed with a CCD camera. The experimental set-up consisted of the following main elements:

- A CPV solar simulator, multi-flash Helios 3198 (rated as AAA simulator) from Solar Added Value Company [24], to control the measurement conditions such as incident irradiance and spectrum. This solar simulator uses a Xenon flash lamp for simulating the solar radiation and a parabolic mirror that collimates the incident rays, reflecting them with a high spatial and spectral uniformity towards a limited work area [25]. The spectral irradiance distribution is equivalent to the AM1.5D reference spectrum, and the collimation angle is around $\pm 0.4^\circ$ [26].

- Three component isotype cells calibrated at the reference direct spectrum (ASTM G173-03; air mass = 1.5, aerosol optical depth at 500 nm = 0.084, water vapour = 1.42 cm [27]), provided by Solar Added Value Company, to monitor the spectral distribution of the light intensity.

- Colour and neutral filters, and different glass covers for the Xenon flash-lamp, also provided by Solar Added Value Company, to maintain the same spectral conditions for different irradiance values, see section 2.2.2.
- Opto-mechanical instruments like rails carriers, mounting posts and posts holders, etc., and an optical bench to support the receiver, and accurately modify and adjust the desired distance between the POE and the receiver.
- An opaque mask and a Lambertian-like diffuser screen provided by Edmund Optics [28,29], which consist of a white diffuser glass, to delimitate the size and receive the light distribution produced by the optics at the CPV receiver position. The main physical properties of this glass are: scattering is maximised with a lambertian-like distribution, absorption and transmission are balanced by adjusting the thickness, which is 1.2 mm, and does not affect the spectral distribution of the light in the range 350-1000 nm. Also, the light transmitted by the diffuser is hemispherical, so the light spot maintains its size and is not affected by any hypothetical change of the optical path. The operation bandwidth of the diffuser suits well the external quantum efficiency of the top and middle subcells investigated.
- A CCD camera (Allied Vision Manta) based on a Sony ICX274 sensor (pixel size $4.4 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$) with a documented spectral band ranging from around 400 to 1000 nm, and different band-pass filters to achieve a camera spectral response similar to the TJSC under investigation, see section 2.2.3. This device is used to characterize the light patterns over the Lambertian-like diffuser screen.

An example of the set-up and the main elements for the case of the experiment with the CCD camera and the Fresnel lens single-unit is shown in Fig. 2.

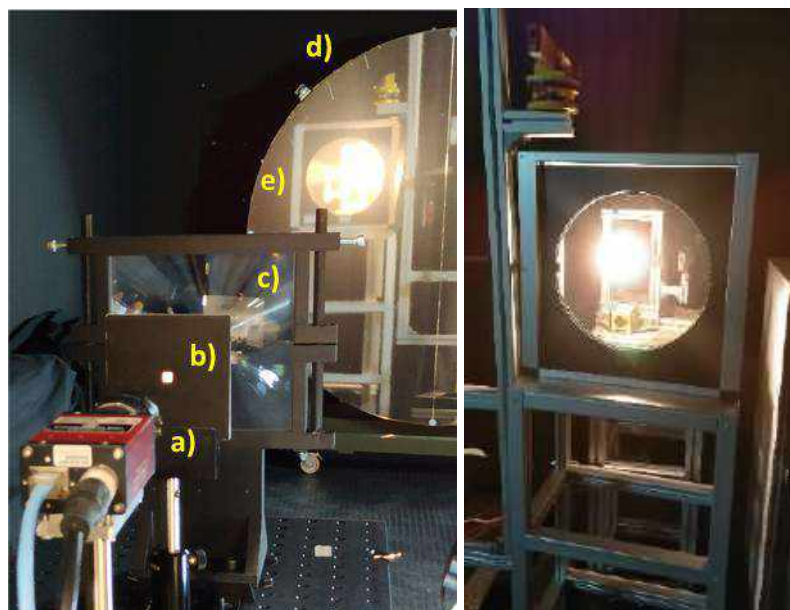


Figure 2. Left: Set-up used for the characterisation of non-uniformity patterns in the TJSC by using the Helios 3198 CPV solar simulator at the CEACTEMA in the University of Jaén: a) CCD camera, b) opaque mask and Lambertian-like screen, c) Fresnel lens, d) collimator mirror and e) Xe flash lamp and filters. Right: Detail of the light source (flash lamp + filters + holding structure) of the solar simulator.

2.2.2. Solar simulator operation

The solar simulator fixed three boundary conditions: the incident spectrum, the alignment of the set-up and the room temperature.

The input spectral distribution was monitored by using the component cells (c.c.) through the so-called Spectral Matching Ratio between the top and middle subcells ($SMR_{top/mid}^{c.c.}$) according to [30]:

$$SMR_{top/mid}^{c.c.} = \frac{\text{top-subcell effective irradiance}}{\text{mid-subcell effective irradiance}} = \frac{I_{sc,top}^{c.c.}}{I_{sc,top}^{c.c.TC}} / \frac{I_{sc,mid}^{c.c.}}{I_{sc,mid}^{c.c.TC}}, \quad I_{sc,top}^{c.c.}, I_{sc,mid}^{c.c.} > 0 \quad (1)$$

Where $I_{sc,i}^{c.c.}$ is the measured short-circuit current of the i -component cell (top or middle). This magnitude allows the spectral irradiance to be characterised. In this sense, a $SMR_{top/mid} > 1$ refers to a blue-rich spectrum, where the middle subcell is usually limiting the current, while a $SMR_{top/mid} < 1$ refers to a red-rich spectrum, where the top subcell is usually limiting the current [31]. In this case, the incident spectrum has been fixed to $SMR_{top/mid}^{c.c.} = 1 \pm 0.02$. This way, a constant incident spectral distribution equivalent to the AM1.5D spectrum is ensured [32,33].

The alignment of the CPV systems was adjusted by using a halogen lamp located in the centre of the Xe flash tube, as well as the adjustable supporting structure of the CPV solar simulator by using speed reducers. This procedure is carried out when the receiver is at the on-focus position and is repeated several times to verify that all the elements are correctly positioned and to ensure repeatability in the results. Based on this, the CPV system is considered to be aligned when the electrical output is maximum. Further information about this procedure can be found in previous work of the authors, for instance in [34]. Finally, the laboratory temperature was kept at 25 ± 0.5 °C to avoid thermal effects in the results [35].

The irradiance level of the solar simulator was varied according to the POE-receiver distance in order to keep constant the I_{sc} of the TJSC. First, the on-focus position was fixed at the distance at which the I_{sc} is maximal. The use of the I_{sc} instead of other parameters such as the P_{mpp} is more convenient in this study since it provides more flexibility in the experiment and allows the range of variation of the POE-receiver distance to be maximized. This criterion was considered to minimize the area of the light

spot and maximize the effective irradiance falling on the solar cell surface, *i.e.* the higher the irradiance the higher the current. It is worth mentioning that this distance doesn't have to be necessarily the same as the provided by the manufacturer, which is estimated at 546 nm. After that, the distance between the POE and the receiver in the optical axis varied up to ± 2 mm in 0.5 mm steps from the on-focus position. Hence, the distribution of the light on the receiver was disturbed. This generates different light patterns on the TJSC produced by the refractive or reflective concentrator. In addition, it is important to mention that, when the receiver is separated from the on-focus position, the size of the light spot on the TJSC surface tends to increase. Therefore, above a certain distance, some concentrated rays do not fall on the cell. This decreases the actual current and operating effective concentration (C_{eff}) of the device, as this is given by:

$$C_{eff} = \frac{I_{sc}^{meas}}{I_{sc}^{1sun}}, I_{sc}^{1sun} > 0 \quad (2)$$

Where I_{sc}^{1sun} is the short-circuit current at 1 sun, *i.e.* 4.629 mA, and I_{sc}^{meas} is the actual short-circuit current of the TJSC. In order to avoid the impact of different concentration ratios in the results, for each distance, the Direct Normal Irradiance (*DNI*) is modified to keep the I_{sc} at the same value as that at the on-focus position. For each irradiance value, the suitable combinations of colour, neutral filters and glass covers mentioned in the previous sub-section were considered to keep the incident spectrum at the reference value. This limits the maximum POE-receiver distance to ± 2 mm.

In Fig. 3, the short-circuit current as a function of the distance between the optics and the TJSC is shown. The I_{sc} of the single-unit based on a Fresnel lens has been set to 1.77 ± 0.02 A (≈ 380 suns effective concentration), while it has been set to 1.85 ± 0.02 A (≈ 400 suns effective concentration) for the dish-shaped single-unit. The small differences in the concentration ratio of both systems are related to different optical efficiencies (η_{opt}). Indeed, the dish-shaped concentrator presents a higher η_{opt} with a value of 83.6%, while it is 80.2% for the Fresnel-based concentrator. These efficiencies have been calculated from the values of I_{sc}^{meas} at the on-focus position by following the same procedure described in [36].

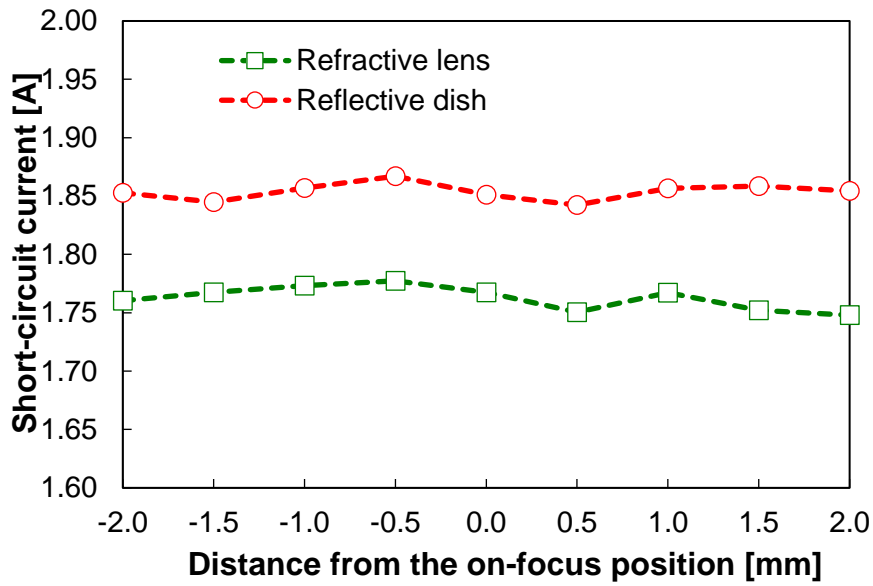


Figure 3. Fixed short-circuit current as a function of the distance between the POE and the receiver of the two single-units under study.

2.2.3. CCD camera tuning

To characterise the set of patterns by using the CCD camera, the TJSC is replaced by the Lambertian-like diffuser, which is used as a screen to capture the profiles. In addition, the SR of the camera was tuned to match the SR of the top and middle subcells. In particular, two different band-pass colour filters, short-pass and long-pass, were inserted inside the CCD camera. These band-pass colour filters enable a suitable spectral splitting between the red and blue contribution of the incident light. Therefore, the spectral behaviour of the camera and the TJSC become similar.

In order to show the above, the Spectral Factor (SF) of both devices has been estimated. This metric corresponds to the Spectral Mismatch Factor (MM) defined in the IEC 60904-7 by considering an ideal reference solar device with a flat spectral response [37]. The SF has been widely used to evaluate the spectral impact on PV and CPV devices for years [31,38]. In this sense, it allows the spectral behaviour of both devices to be compared and could be expressed as [39]:

$$SF_{device-i} = \frac{J_{sc,device-i} \cdot DNI^{CSTC}}{J_{sc,device-i}^{CSTC} \cdot DNI}, DNI > 0 \quad (3)$$

Where the term “device” refers to the TJSC or the CCD camera and $J_{sc,i}$ is the short-circuit current density of the i -subcell (top or middle) estimated as:

$$J_{sc,device-i} = \int_{\lambda_{min-i}}^{\lambda_{max-i}} E_b(\lambda) \cdot SR_{device-i}(\lambda) \cdot \tau_{filter}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

Where $\tau_{filter}(\lambda)$ is the spectral transmittance of a given band-pass filter, its value being 1 if only the solar cell is considered, $E_b(\lambda)$ is the actual spectral distribution, and $\lambda_{min-i}, \lambda_{max-i}$ are the lower and upper wavelength limits defined by the absorption band of the device under consideration.

The relation between the simulated SF of the camera, by using the two-band-pass filters, and the top and middle subcells for different spectral conditions is shown in Fig. 4. These values have been obtained by using the Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine (SMARTS) [40–42] and the equation defined above. In this figure, the air mass (AM) has been varied from 1 to 10 in order to cover a wide outdoor spectral range [43]. As can be seen in this figure, a high linearity can be observed in both cases, *i.e.* a R-square value of 0.99. This ensures similar tendencies under spectral changes between the subcells and the CCD camera. Thus, the irradiance and spectral non-uniformity profiles over the solar cell surface can be accurately characterised.

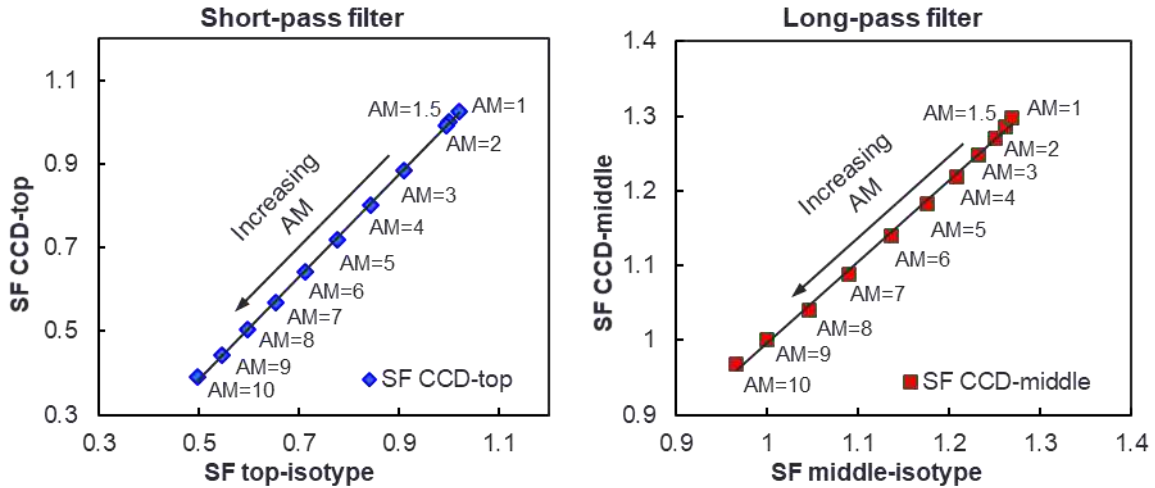


Figure 4. Simulated SF for the CCD camera by using the two band-pass filters considered (long-pass filter: 725 nm [44] and, short-pass filter: 650 nm [45]) vs. SF for the top and middle subcells. Note that the spectral absorption band of the camera is limited to a maximum wavelength of around 1000 nm.

2.3. Mathematical modelling

In this study, the experimental measurements are complemented by ray tracing simulations. It can be highlighted that the aim of the ray tracing model is not to reproduce the experimental results, but to help in understanding the behaviour of the systems and identifying the trends of the non-uniformity metrics. Because of this, the ray tracing model has been simplified. Instead of using a commercial software, the geometric relationships and the fundamental laws of refraction and reflection have been

implemented in a programming environment. Next, the mathematical modelling for the ray tracing simulations is described for the case of the Fresnel lens and the dish-shaped mirror.

2.3.1. Fresnel lens

In Fig. 5-left, a sketch of an incident and refracted ray for the most critical case of the Fresnel lens is shown. This case corresponds to the last ring of the lens, represented by a 2D cross-section. In this scheme, β represents the angle of the slope of the facet, N the normal to this slope, Ω the angle between the refracted light and the optical axis, f the focal distance and D the diameter of the lens. The refractive index (n) of the PMMA material as a function of the wavelength is shown in Fig. 5-right. For each wavelength, the sunlight is focused on a different point on the solar cell surface because of the change in n .

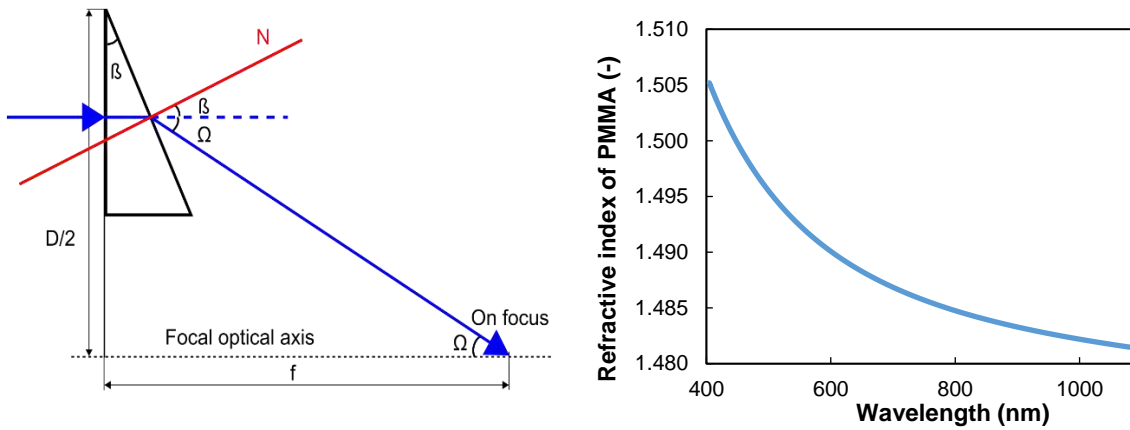


Figure 5. Left: 2D cross-section of the last ring of the Fresnel lens, and geometrical relationships between this facet and the focal distance. Right: Refractive index of the PMMA Fresnel lens for wavelengths within 400 to 1100 nm taken from [46].

Ω at 546 nm (Ω_{546}) is estimated by considering f and D of the lens listed in Table 1 as:

$$\Omega_{546} = \tan^{-1}\left(\frac{D/2}{f}\right) \quad (5)$$

Once this angle is estimated, β at 546 nm (β_{546}) is obtained by using the following relationship [47]:

$$\beta_{546} = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\Omega_{546}}{n_{546} - \cos\Omega_{546}}\right) \quad (6)$$

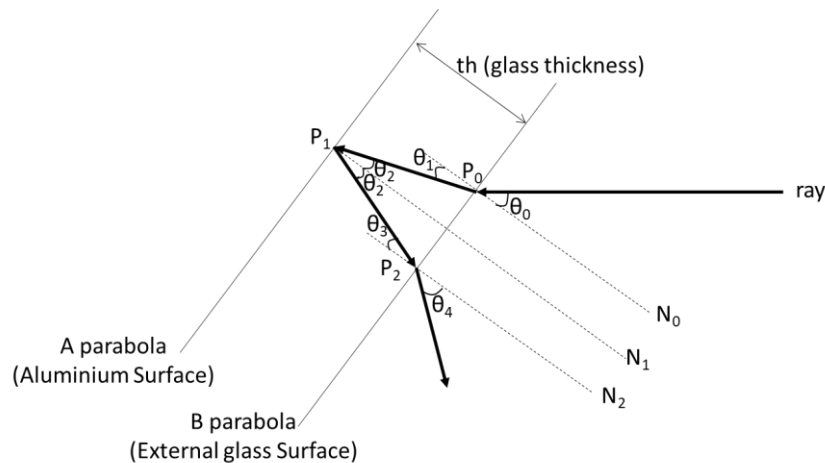
Where n_{546} is the refractive index at 546 nm, its value being 1.49. Finally, the Ω angle as a function of the wavelength can be estimated from the well-known Snell's law as:

$$\Omega(\lambda) = \sin^{-1}(n(\lambda) \cdot \sin\beta_{546}) - \beta_{546} \quad (7)$$

Based on the expressions above, $\Omega_{546} = 23.15^\circ$ and $\beta_{546} = 24.45^\circ$ have been obtained. These values, in combination with Eq. (7) and the geometry of Fig. 5-left, allow the slope of the refracted rays as a function of the wavelength to be approximated. Ray tracing can be then performed for each ray height and wavelength. Each ray has an assigned energy weight based on the standard ASTM G173 – 03 direct spectrum, which allows the irradiance level incident on each small segment on the solar cell surface to be determined for the considered POE-receiver distance. In addition, the SR of the subcells (Fig. 1) can be used to calculate the short-circuit current density distribution of each subcell.

2.3.2. Dish-shaped mirror

The dish-shaped mirror is made of glass with an aluminium back coating, $th = 1.2$ mm being the glass thickness. Therefore, each light ray is first refracted by the change of medium air-glass in the external glass surface, afterwards it is reflected by the aluminium surface and, finally, it is refracted again by the change of medium glass-air in the external glass surface. This double refraction and reflection is schematically shown in Fig. 6 a), while the refractive index (n) of the N-BK7 glass as a function of the wavelength is shown in Fig. 6 b). The change of n with the wavelength implies that rays with different wavelength focus on a different point on the solar cell surface. Therefore, this type of mirror is not completely free of CA, while it is true that this effect is small due to the low thickness of the glass cover.



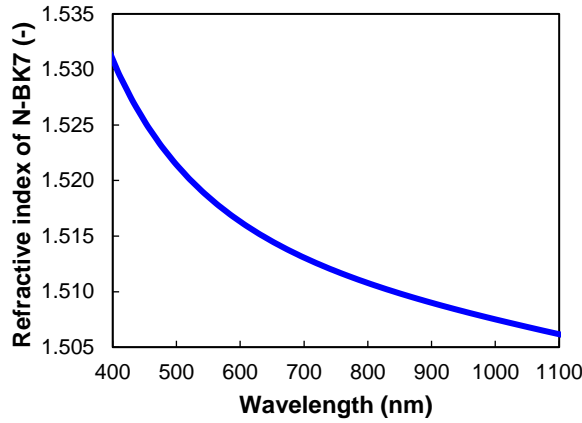


Figure 6. a): Detail of the 2D cross-section of the dish-shaped mirror and path of an incident light ray. b): Refractive index of the N-BK7 glass for wavelengths within 400 to 1100 nm taken from [48].

The geometric configuration can be represented by two parabolas: A parabola (reflective aluminium surface) and B parabola (external glass surface). These parabolas can be mathematically expressed as:

$$y^2 = 4 \cdot f \cdot x, x \geq 0 \quad (8)$$

$$y^2 = 4 \cdot f \cdot (x - th), x \geq th \quad (9)$$

Where the x-axis is the optical axis and the y-axis intercepts the x-axis at the A parabola vertex. In Fig. 6 a), N_0 is the normal to the B parabola at the point of interception of the incident ray, N_1 is the normal to the A parabola at the point of interception of the first refracted ray and, N_2 is the normal to the B parabola at the point of interception of the reflected ray. The θ angles shown in the figure determine the direction of the different paths of the light ray. θ_0 and θ_1 are related by the Snell's law as:

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_0}{n} \right) \quad (10)$$

Assuming ideal reflection, the input angle to the reflective surface is equal to the output angle (θ_2). The Snell's law is used again to relate θ_3 and θ_4 :

$$\theta_4 = \sin^{-1} (n \cdot \sin \theta_3) \quad (11)$$

The angles that define the different ray paths are: θ_0 (incident ray), $\theta_0 - \theta_1$ (first refracted ray), $\theta_0 - \theta_1 + 2 \cdot \theta_2$ (reflected ray) and, $\theta_0 - \theta_1 + 2 \cdot \theta_2 - \theta_3 + \theta_4$ (output ray). Based on the above, the intersections of the ray directions with the parabolas can be computed and the point P_2 can be obtained, as well as the slope of the output ray. The intersection of this line with the solar cell surface for a given POE-receiver distance can be also obtained. Therefore, considering the standard ASTM G173 – 03 direct spectrum and the SR of the subcells, the ray tracing analysis can be performed.

2.4. Indexes for quantifying the non-uniformities

From the irradiance distributions photographed by the CCD camera in the two spectral bands corresponding to the top and middle subcells, the patterns at each subcell are evaluated through the so-called peak-to-average ratio (*PAR*). This index is the most widely used nowadays to experimentally characterise and evaluate the impact of the light distribution on MJ cells, and can be defined as [17,19]:

$$PAR_i = \frac{Irradiance_{i,peak}^{CCD}(x,y)}{Irradiance_{i,avg}^{CCD}(x,y)}, Irradiance_{i,avg}^{CCD}(x,y) > 0 \quad (12)$$

Where the *i*-subscript refers to the subcell under consideration, top or middle. Despite its simplicity, the *PAR* allows the effect of non-uniformity in a solar cell to be easily quantified, and could be defined as the peak-to-average irradiance obtained along its whole *X-Y* surface. The value of the *PAR* is inversely related to the spatial irradiance uniformity, *i.e.* the higher the *PAR*, the poorer the uniformity. It is also important to note that the minimum possible value of the *PAR* is 1, which means a perfect spatial uniformity.

Eq. (12) provides useful information concerning the irradiance profiles over each subcell. However, it doesn't allow information concerning the spectral uniformity of the irradiance to be gathered. For this purpose, from the irradiance distribution measured at each subcell by the CCD camera, the $SMR_{top/mid}$ distribution across the *X-Y* surface can be used. We propose a novel index, defined as spectral uniformity ratio (*SUR*), which is expressed as:

$$SUR = 1 + \frac{SMR_{top/mid,max}^{CCD}(x,y) - SMR_{top/mid,min}^{CCD}(x,y)}{SMR_{top/mid,avg}^{CCD}(x,y)}, SMR_{top/mid,avg}^{CCD}(x,y) > 0 \quad (13)$$

The term $SMR_{top/mid,max}^{CCD}(x,y) - SMR_{top/mid,min}^{CCD}(x,y)$ in this equation refers to the amplitude of the distribution. If the amplitude is equal to 0, the value of *SUR* becomes equal to 1, which indicates a perfect spectral uniformity. On the other hand, if the amplitude is higher than 0, either because the maximum or minimum value of $SMR_{top/mid}$ are accentuated, the value of *SUR* becomes higher than 1, which indicates a poorer spectral uniformity. As can be seen, the *SUR* and *PAR* metrics can be understood in a similar way, *i.e.* the higher the *SUR* the poorer the spectral uniformity.

It is worth mentioning that the irradiance distribution over the spectral band of the bottom subcell is not analysed in this study. This is because of two reasons. First, the dispersion for optical materials is very low for high wavelengths and, therefore, the irradiance distribution for the bottom subcell is very similar to that for the middle subcell. Second, the current photogenerated by the bottom subcell is

higher than that of the top or middle subcells in state-of-the-art TJSCs and, therefore, the current in these cells is limited by the top or the middle subcell in normal operating conditions. Consequently, it has sense to focus on the top and middle subcell behaviour instead of the bottom subcell behaviour [17].

3. Results

This section is structured in three subsections: the results of the ray tracing analysis (3.1), the experimental results on irradiance and spectral non-uniformity (3.2) and, the experimental results on the impact of non-uniformity on electrical parameters (3.3). In every subsection, the analysis of the Fresnel lens system and the dish-shaped mirror system are differentiated.

3.1. Ray tracing analysis

For modelling the optical configurations, ideal optical surfaces and bulk were considered. This is far from reality because in the experimental systems there is light scattering in the surfaces and bulk. This scattering is caused by the material imperfections resulted from the manufacturing process. In addition, the spectral reflectivity was not modelled in the case of the dish-shaped mirror [49]. Therefore, the non-uniformities found in the ray tracing analysis are much higher than those measured in the real systems and, simulated *PAR* values are not comparable to experimental *PAR* values. However, the ray tracing analysis is useful because it allows the trends of the non-uniformity indexes to be identified. Similar trends should be found in the experiments, which gives a higher degree of reliability to the experimental results. Apart from the approximations commented above, the geometry of the optical elements simulated has been kept equal to the POEs under consideration. The only difference is that a circular aperture has been also considered for the Fresnel lens to maintenance the optical symmetry.

3.1.1. Fresnel lens

The simulated irradiance distributions over the spectral bands of the top and middle subcells for the case of the Fresnel lens single-unit are shown in Fig. 7-left and center respectively for several distances of the receiver from the on-focus position (d). The irradiance profiles follow Gaussian distributions with peak irradiance located at the center of the cell. The top and middle peak irradiances are plotted in Fig. 7-right as a function of d . For the top subcell, it can be seen that the peak irradiance decreases as d increases, *i.e.* when the receiver is more distant from the POE. For the middle subcell, the peak irradiance tends to increase as d increases. Therefore, the irradiance non-uniformity follows an opposite trend for the top and middle subcells: the top subcell irradiance is more uniform as d increases, while the middle subcell irradiance is less uniform as d increases. The unbalance between the top and

middle subcell currents is expected to be higher as d reaches higher values, situation where the middle subcell is going to provide excess current.

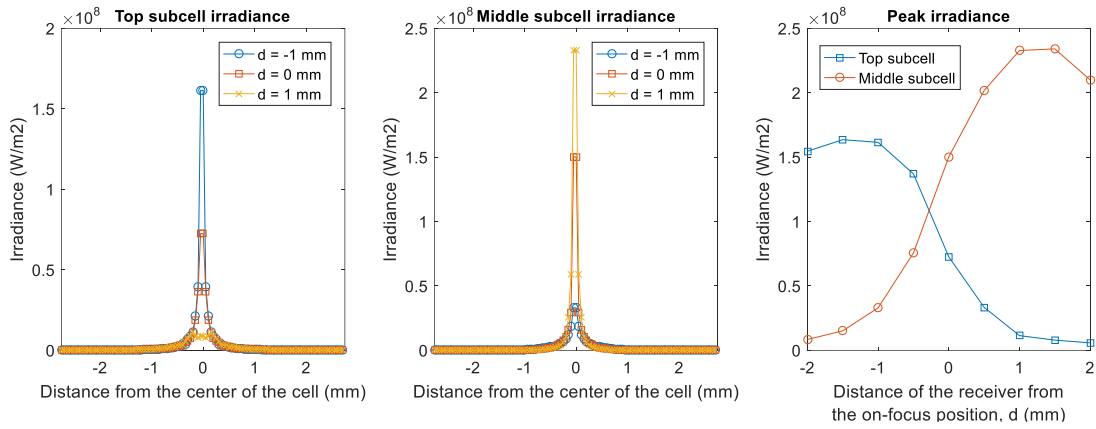


Figure 7. Simulated results for the Fresnel lens single-unit of the irradiance distribution on the spectral band of the top (left) and middle (center) subcells at a central outline for several distances of the receiver from the on-focus position (d) and, peak irradiance of the top and middle subcells as a function of d (right). Increasing d values mean longer POE-receiver distances ($d = 0$ mm corresponds to the on-focus position).

The simulated PAR_{top} , PAR_{mid} and, SUR indexes of the Fresnel lens system are represented in Fig. 8 as a function of d . The PAR_{top} and PAR_{mid} follow opposite trends as d increases: PAR_{top} tends to decrease, while PAR_{mid} tends to increase, which is in agreement with the results in Fig. 7. The biggest differences correspond to d values above 1, which is the operating region with higher impact of CA. This can be also observed in the SUR curve. Spectral non-uniformity grows with increasing d , reaching values of SUR above 2.2 for d values higher than 1.

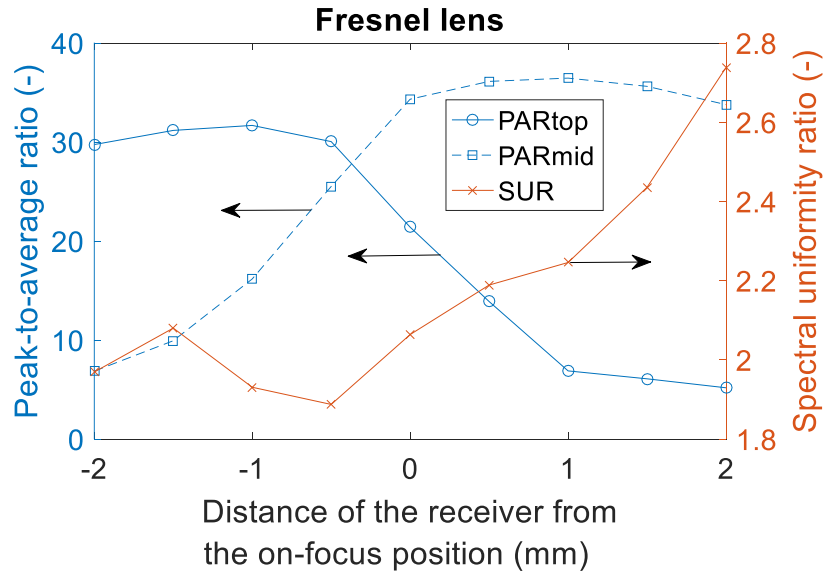


Figure 8. Simulated results for the Fresnel lens single-unit of the PAR_{top} , PAR_{mid} and, SUR indexes as a function of the distance of the receiver from the on-focus position.

3.1.2. Dish-shaped mirror

The simulated irradiance distributions over the spectral bands of the top and middle subcells for the case of the dish-shaped mirror single-unit are shown in Fig. 9-left and center respectively for several d distances. Only three curves for $d = -0.3, -0.2$ and, -0.1 mm are shown to avoid saturating the visualization of the graphs. The top and middle peak irradiances are plotted in Fig. 9-right as a function of d , for a range of d values between -0.6 and 0.6 mm. It can be seen that the top and middle subcell irradiances reach their maximum peak value at around $d = 0.0$ mm, which corresponds to the focus of the parabolic dish reflector. It can be highlighted that the trends of the top and middle subcell irradiances are similar: from low to high d values, the peak irradiance increases quickly until reaching a maximum and, after this, it decreases quickly. The dish-shaped mirror system shows great sensitivity to the POE-receiver distance, as can be realized by the small range of the x-axis in Fig.9-right.

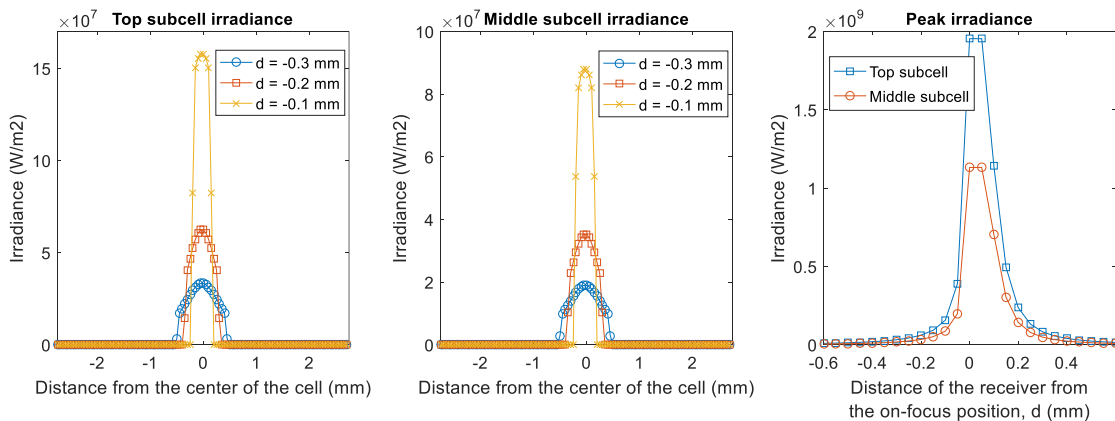


Figure 9. Simulated results for the dish-shaped mirror single-unit of the irradiance distribution on the spectral band of the top (left) and middle (center) subcells at a central outline for several distances of the receiver from the on-focus position (d) and, peak irradiance of the top and middle subcells as a function of d (right).

The simulated PAR_{top} , PAR_{mid} and, SUR indexes of the dish-shaped mirror system are represented in Fig. 10 as a function of d . This graph exhibits that PAR_{top} and PAR_{mid} evolve in a similar way: they grow towards a maximum with increasing d and, afterwards, they lower quickly, which is in agreement with the behaviour shown in Fig. 9. PAR_{top} and PAR_{mid} have similar values for any d distance, which indicates small impact of CA, as expected in a reflective optical system. The spectral non-uniformity can be examined by the behaviour of the SUR curve. The range of values of SUR is within 1.0 and 1.3. When comparing these values with those found for the Fresnel lens single-unit (range within 1.9 and 2.8, Fig. 8), it can be seen that the dish-shaped mirror has much lower values of SUR , *i.e.* much higher spectral uniformity. However, it is not completely free of CA due to the refraction in the glass cover. This small CA should be observable in the experimental measurements.

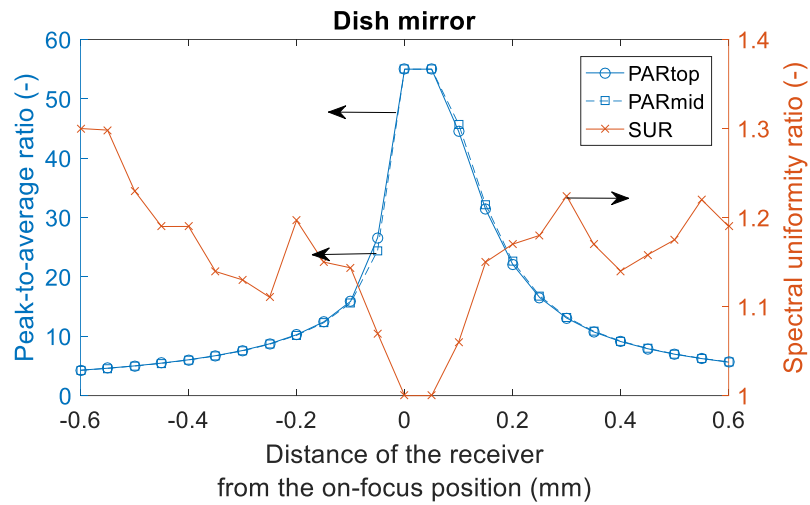


Figure 10. Simulated results for the dish-shaped mirror single-unit of the PAR_{top} , PAR_{mid} and, SUR indexes as a function of the distance of the receiver from the on-focus position.

3.2. Experimental results: Irradiance and spectral non-uniformity

3.2.1. Fresnel lens

Some examples of the irradiance distribution on the top and middle subcells for the Fresnel lens system as photographed by the CCD camera are shown in Fig. 11. The top figures represent the normalized irradiance profiles on the top subcell for $d = -2$ (left), 0 (center) and, 2 mm (right), while the bottom

figures represent the corresponding profiles on the middle subcell for the same d values. Qualitatively, these graphs exhibit that the irradiance pattern on the top subcell tends to be more uniform as d increases (increasing POE-receiver distance), while the irradiance pattern on the middle subcell tends to be less uniform as d increases. Therefore, the non-uniformity patterns show an opposite behaviour for the top and middle subcells as anticipated by the simulations (section 3.1.1). This behaviour is due to the different wavelength band that affects each subcell. Lower wavelength rays (top subcell) tend to focus at negative values of d and are more dispersed as d increases, while higher wavelength rays (middle subcell) tends to focus at positive values of d and are more dispersed as d decreases. The different refractive index of PMMA material as a function of the wavelength causes this effect.

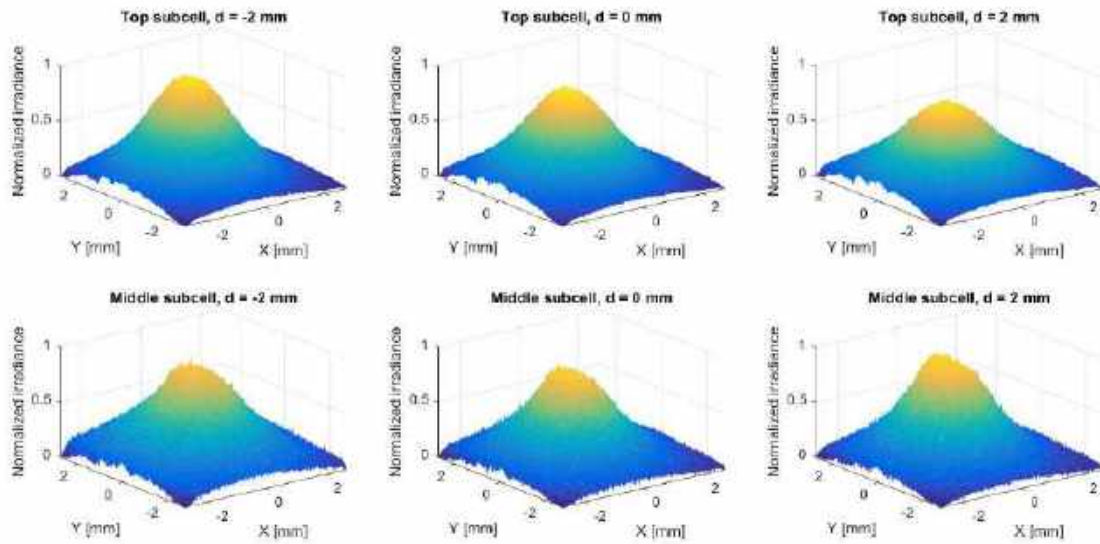


Figure 11. Examples of the light distribution on the top (top figures) and middle (bottom figures) subcells as photographed by the CCD camera for the Fresnel lens single-unit at distances of the receiver from the on-focus position of -2 (left), 0 (center) and, 2 mm (right). The irradiance intensity is normalized to 1.

The experimental results for the non-uniformity indexes (PAR_{top} , PAR_{mid} and, SUR) of the Fresnel lens system are shown in Fig. 12 as a function of d . The opposite behaviour of PAR_{top} and PAR_{mid} agrees with the comments in the last paragraph, *i.e.* PAR_{top} decreases with increasing d (more uniform irradiance on the top subcell) and, PAR_{mid} increases with increasing d (less uniform irradiance on the middle subcell). The PAR_{top} varies within 2.82 and 3.30, while the PAR_{mid} varies between 3.01 and 3.51. Both PAR s show a small range of variation with a maximum difference of around 0.6. This means that the irradiance non-uniformity varies moderately in each subcell when the POE-receiver distance changes considering a Fresnel lens. The SUR index decreases from $d = -2$ to $d = 0$ mm and, afterwards,

it increases from $d = 0$ to $d = 2$ mm. This means that the minimum impact of CAs takes place around the on-focus position. The increase at the right of the on-focus position is more pronounced than the decrease at the left of the on-focus position. For this reason, the highest CA effects take place at higher d values, region in which PAR_{top} and PAR_{mid} show the highest differences, which is in agreement with the simulation results. The experimental decay of SUR between $d = -2$ mm and $d = 0$ mm was also observed in the simulations. The SUR shows a range of variation between 1.54 and 1.77 for the Fresnel lens system.

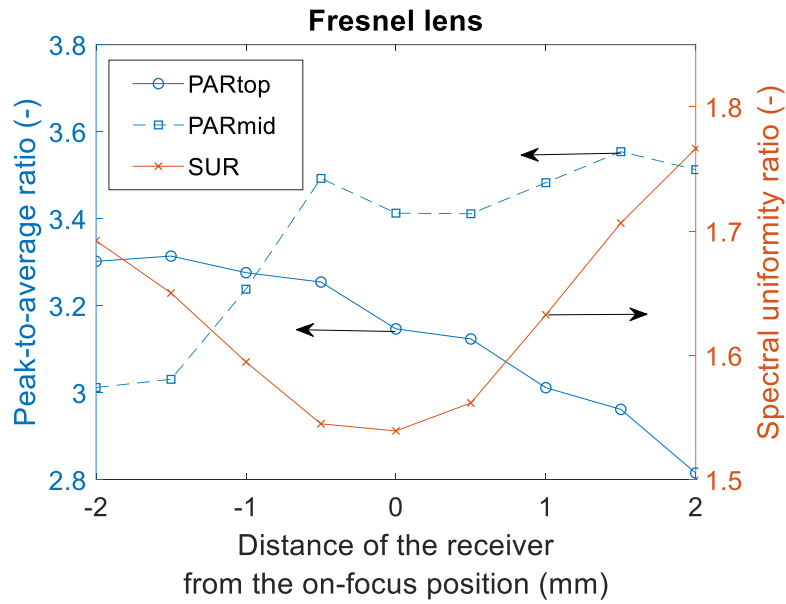


Figure 12. Experimental results for the Fresnel lens single-unit of the PAR_{top} , PAR_{mid} and, SUR indexes as a function of the distance of the receiver from the on-focus position.

3.2.2. Dish-shaped mirror

Some examples of the irradiance distribution on the top and middle subcells for the dish-shaped mirror system as photographed by the CCD camera are shown in Fig. 13. The top figures represent the normalized irradiance profiles on the top subcell for $d = -2$ (left), -1 (center) and, 0 mm (right), while the bottom figures represent the corresponding profiles on the middle subcell for the same d values. The patterns at $d = 1$ mm and $d = 2$ mm have not been represented as they follow an approximate symmetric behaviour. Qualitatively, these figures exhibit that the top and middle irradiances follow a similar trend, *i.e.* the non-uniformity grows from $d = -2$ mm to the on-focus position and, afterwards, it lowers from the on-focus position to $d = 2$ mm. The figures also show a great sensitivity of the non-uniformity on the POE-receiver distance. This is in agreement with the simulated results (section 3.1.2), although the sensitivity in the ray tracing results was even greater than in the experimental

results. As was mentioned, the experiments show more dispersion in the light patterns that could be attributed to the imperfections in the optical materials and the spectral reflectivity of the mirror (not modelled).

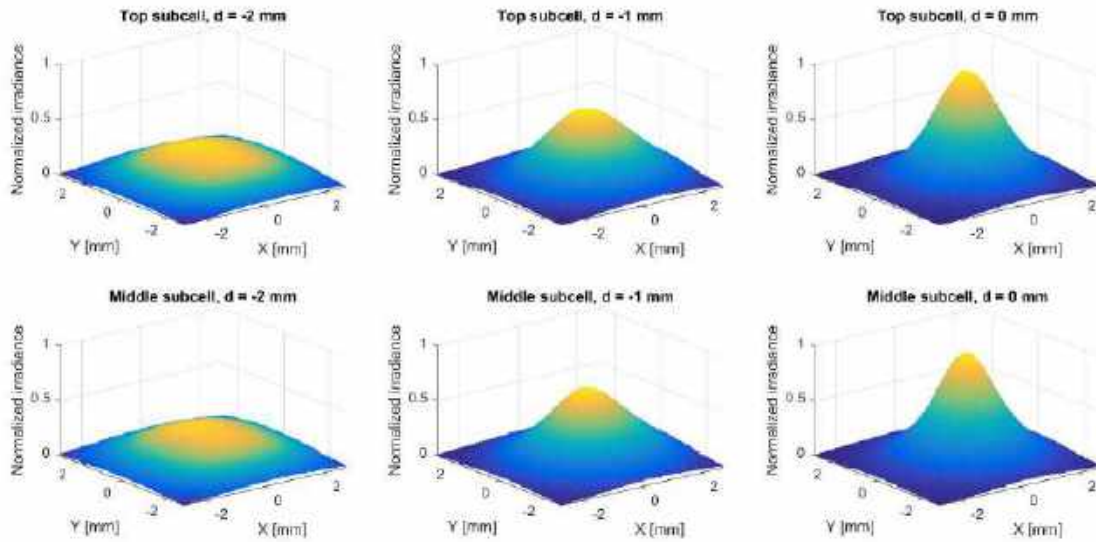


Figure 13. Examples of the light distribution on the top (top figures) and middle (bottom figures) subcells as photographed by the CCD camera for the dish-shaped mirror single-unit at distances of the receiver from the on-focus position of -2 (left), -1 (center) and, 0 mm (right). The irradiance intensity is normalized to 1.

The experimental results for the non-uniformity indexes (PAR_{top} , PAR_{mid} and, SUR) of the dish-shaped mirror system are shown in Fig. 14 as a function of d . The PAR_{top} and PAR_{mid} indexes show a symmetric trend with respect to the on-focus position. The PAR s achieve a maximum of 4.99 for the top subcell and of 5.23 for the middle subcell at the on-focus position. Aside this point, they drastically decrease up to a minimum of 2.1 for both junctions, a maximum variation of around 3.1. Therefore, PAR_{top} and PAR_{mid} show a similar behaviour and, the sensitivity of this optical configuration to the POE-receiver distance is very high. In addition, the PAR values around the on-focus position are greater than those measured for the Fresnel lens system, which indicates a higher degree of non-uniformity for the dish-shaped mirror system. The SUR values vary between a minimum of 1.23 and a maximum of 1.36. When comparing these values to those obtained for the Fresnel lens configuration (between 1.54 and 1.77), it can be seen that the dish-shaped mirror shows much lower CA effects, which is in agreement with the results of simulated SUR . However, this type of mirror with glass cover present some degree of CA (certainly small) that was detected in the experiments.

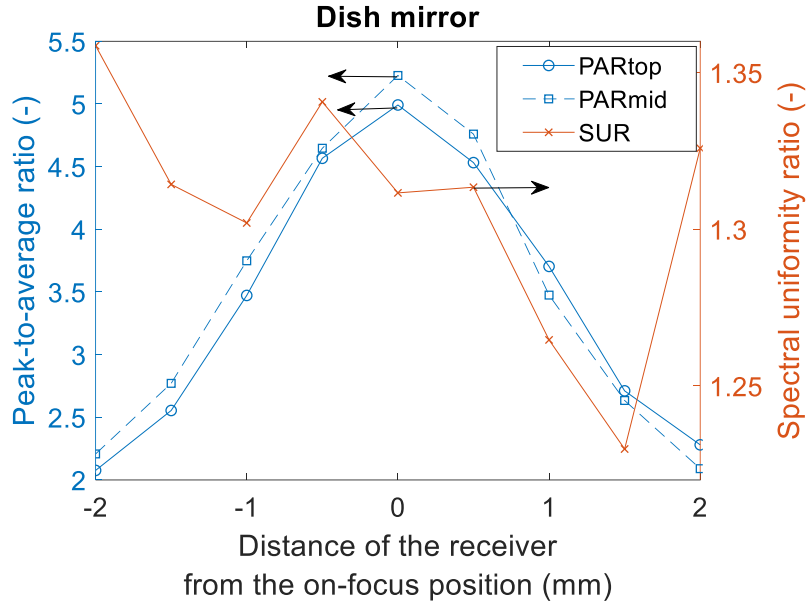


Figure 14. Experimental results for the dish-shaped mirror single-unit of the PAR_{top} , PAR_{mid} and, SUR indexes as a function of the distance of the receiver from the on-focus position.

3.3. Experimental results: Impact on electrical parameters

3.3.1. Fresnel lens

A summary of the I - V measurements carried out on the Fresnel lens single-unit for different distances of the receiver from the on-focus position is shown in Fig. 15. The operating conditions and FF of each curve are indicated in the legend. As the I_{sc} is kept constant in the different measurements by varying the sun simulator irradiance intensity (section 2.2.2), and given that the I - V curves do not exhibit significant changes in the V_{oc} by varying the POE-receiver distance, the P_{mpp} is directly proportional to the FF by definition:

$$P_{mpp} = FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc} \quad (14)$$

In the I - V curves, it can be seen that the slope near V_{oc} does not vary significantly by changing the POE-receiver distance. The main driver of losses due to non-uniformities is the change in the slope near I_{sc} . The higher FF for the Fresnel lens single-unit is obtained at $d = 1$ mm ($FF = 0.81$) and corresponds with the I - V curve with the slope near I_{sc} being more horizontal. The lower FF is obtained at $d = -2$ mm ($FF = 0.72$) and corresponds with the I - V curve with the slope near I_{sc} being more inclined.

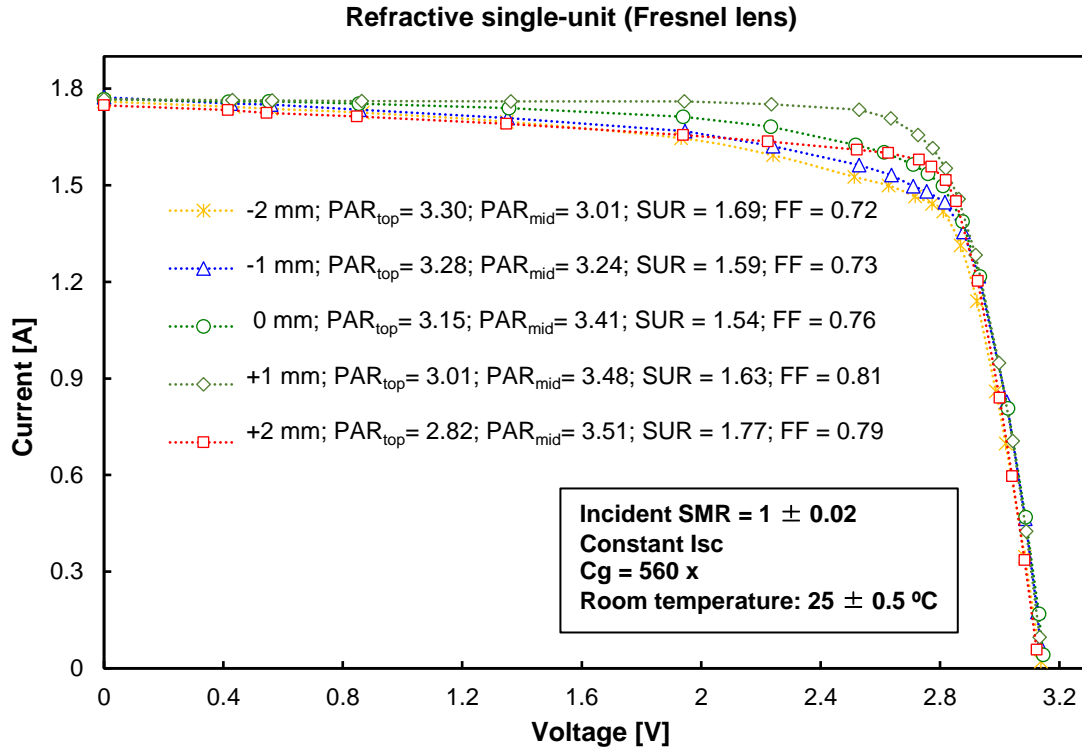


Figure 15. Experimental I - V curves of the Fresnel lens single-unit under different distances of the receiver from the on-focus position. The operating conditions and fill factor of each curve are indicated in the legend.

The detailed behaviour of P_{mpp} , V_{oc} (normalized to their maximum values) and, FF is shown in Fig. 16-left as a function of d , while the behaviour of the apparent shunt resistance (R_{sh}) and the apparent series resistance (R_s) is shown in Fig. 16-right. The apparent R_{sh} and R_s were estimated from the slopes of the I - V curves:

$$\text{Apparent } R_{sh} \approx - \left(\frac{dV}{dI} \right)_{I=I_{sc}} \quad (15)$$

$$\text{Apparent } R_s \approx - \left(\frac{dV}{dI} \right)_{V=V_{oc}} \quad (16)$$

It is worth to mention that these expressions are derived from an equivalent linear circuit of the solar cells, and it may not be applied to solar cells in general with nonlinear and distributed circuit nature. Concentrator solar cells are known as typical solar cells that need to be treated by a distributed circuit model and often show nonlinear response. For simplicity, in this study, only apparent values of R_{sh} and R_s have been calculated from the slopes of the I - V curves, which allows qualitatively differencing the electrical behaviour of the refractive and reflective systems.

V_{oc} remains almost constant for all the distances with a maximum variation lower than 1 %. This indicates that V_{oc} is given by the operating effective concentration and is not affected by non-uniformities. P_{mpp} and FF follow a similar behaviour and are strongly affected by the d distance. Their minimum value is at $d = -2$ mm (P_{mpp} shows 12 % decrease compared to its maximum value), they grow as d increases until reaching a maximum at $d = 1$ mm and, afterwards, they decrease for d values above 1 mm.

The apparent R_s shows a small variation for the considered POE-receiver distances, between 0.17 and 0.19 Ω . The apparent R_s is mainly affected by the irradiance non-uniformity. As the PAR values obtained for the Fresnel lens system are moderate, they do not affect significantly the apparent R_s . However, the apparent R_{sh} shows a significant range of variation, between 16 and 216 Ω . The apparent R_{sh} is influenced by the spectral non-uniformity combined with the top subcell irradiance non-uniformity and, as was mentioned, is the main cause of the variations in FF in the case of the Fresnel lens optical configuration. The peak apparent R_{sh} coincides with the peak FF at $d = 1$ mm. Aside this point, both the apparent R_{sh} and FF decrease. This behaviour can be explained as follows: at $d = -2$ mm, the CA is high and, this effect is enhanced by a high non-uniformity of the top subcell irradiance (Fig. 12), resulting in the worst values of apparent R_{sh} and FF . As d increases from -2 mm to the on-focus position, the CA decreases as well as the non-uniformity of the top subcell irradiance, resulting in increasing values of the apparent R_{sh} and FF . From $d = 0$ mm to $d = 1$ mm, the CA starts to get worse but the uniformity of the top subcell irradiance keeps improving, resulting in a growth of the apparent R_{sh} and FF until reaching its maximum at $d = 1$ mm. For the highest d values, in spite that the top subcell irradiance keeps improving, the severe CA dominates and causes a drop in the apparent R_{sh} and FF .

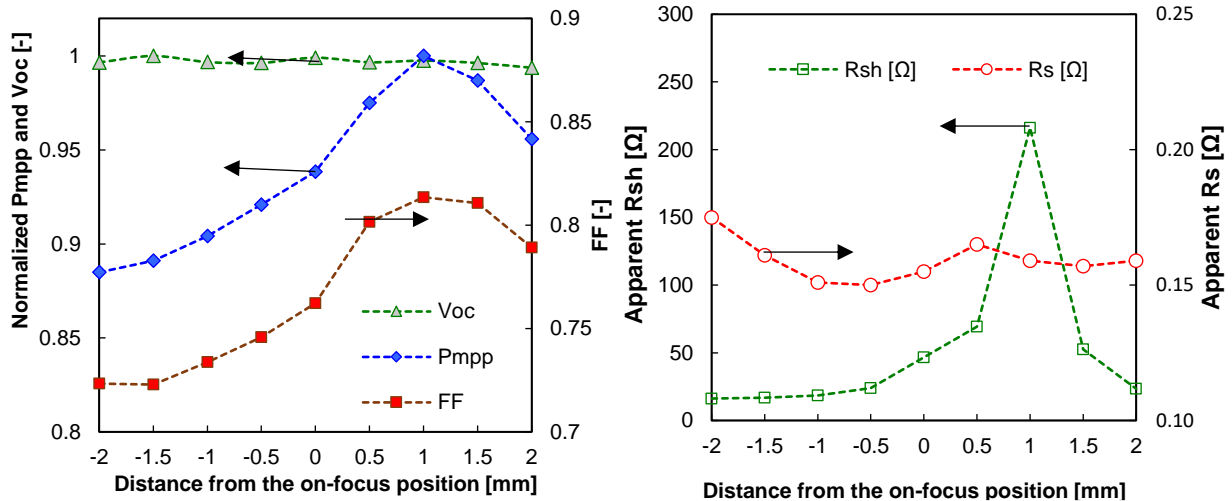


Figure 16. Left: Normalized maximum power, normalized open-circuit voltage and, fill factor of the Fresnel lens single-unit as a function of the distance of the receiver from the on-focus position for the Fresnel lens single-unit (normalization values: $P_{mpp} = 4.52$ W and $V_{oc} = 3.15$ V). Right: Apparent shunt and series resistance of the same device.

3.3.2. Dish-shaped mirror

A summary of the I - V measurements carried out on the dish-shaped mirror single-unit for different distances of the receiver from the on-focus position is shown in Fig. 17. The operating conditions and FF of each curve are indicated in the legend. As can be seen, the slope of the I - V curves near I_{sc} is quite horizontal, indicating that the change in the apparent R_{sh} is not a determinant effect in the FF evolution. In this case, non-uniformities affect mainly the slope of the curves near V_{oc} and, thus, the apparent R_s is the main driver of the non-uniformity losses. The worst curve with difference coincides with the on-focus position, giving a $FF = 0.72$.

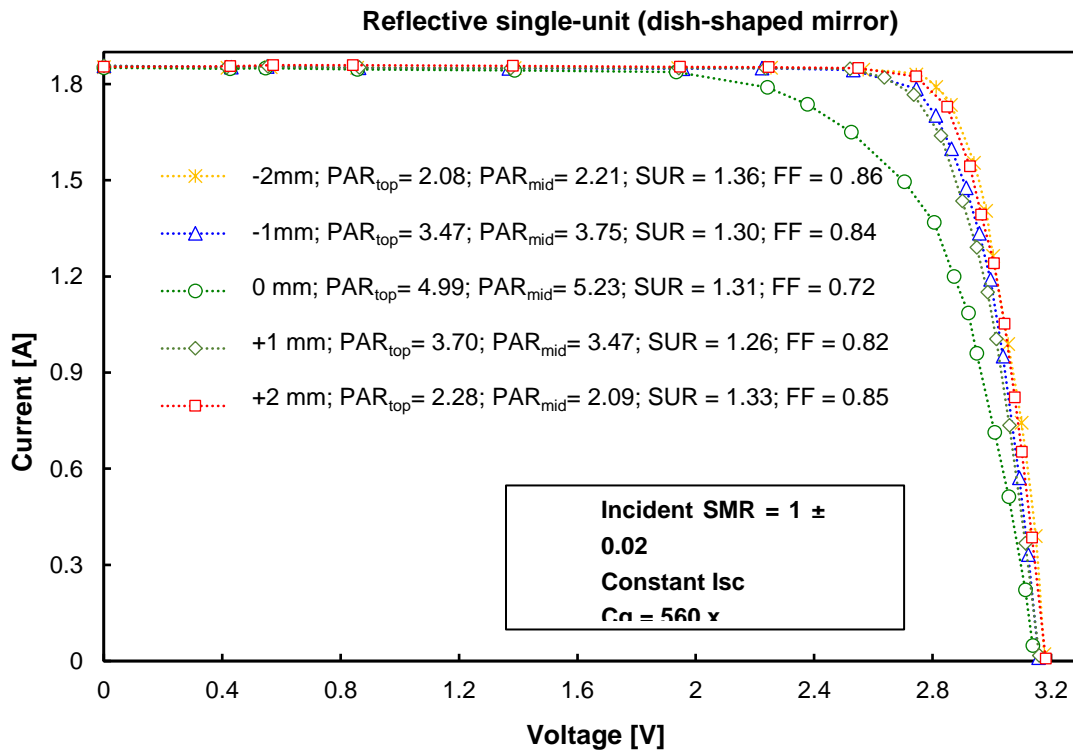


Figure 17. Experimental I - V curves of the dish-shaped mirror single-unit under different distances of the receiver from the on-focus position. The operating conditions and fill factor of each curve are indicated in the legend.

The detailed behaviour of P_{mpp} , V_{oc} (normalized to their maximum values) and, FF is shown in Fig. 18-left as a function of d , while the behaviour of the apparent R_{sh} and R_s is shown in Fig. 18-right. V_{oc}

is not practically influenced by the non-uniformities as in the case of the Fresnel lens single-unit. The P_{mpp} and FF show a symmetric behaviour with a pronounced decay at the on-focus position (P_{mpp} drops 17 % compared to its maximum value) and the best values for $d = -2$ mm and $d = 2$ mm. This behaviour is related to the high sensitivity of the irradiance uniformity on the POE-receiver distance (section 3.2.2). The worst uniformity takes place at the on-focus position and this affects strongly the FF .

The apparent R_{sh} varies in this case between 150 and 318 Ω . These are sufficiently high values to ensure a not significant degradation of the slope of the I-V curve near I_{sc} . The apparent R_{sh} is affected mainly by CAs but these effects are quite small in the case of the reflective system. However, the apparent R_s varies between 0.13 and 0.23 Ω , which affects the slope near V_{oc} and, consequently, the FF . The apparent R_s is influenced by the non-uniform irradiance distribution, reaching its worst value at the on-focus position and following a symmetrically pronounced decay aside this point. The higher PAR values measured for the dish-shaped mirror single-unit compared to the Fresnel lens single-unit cause the non-negligible change in the apparent R_s in the case of the reflective system.

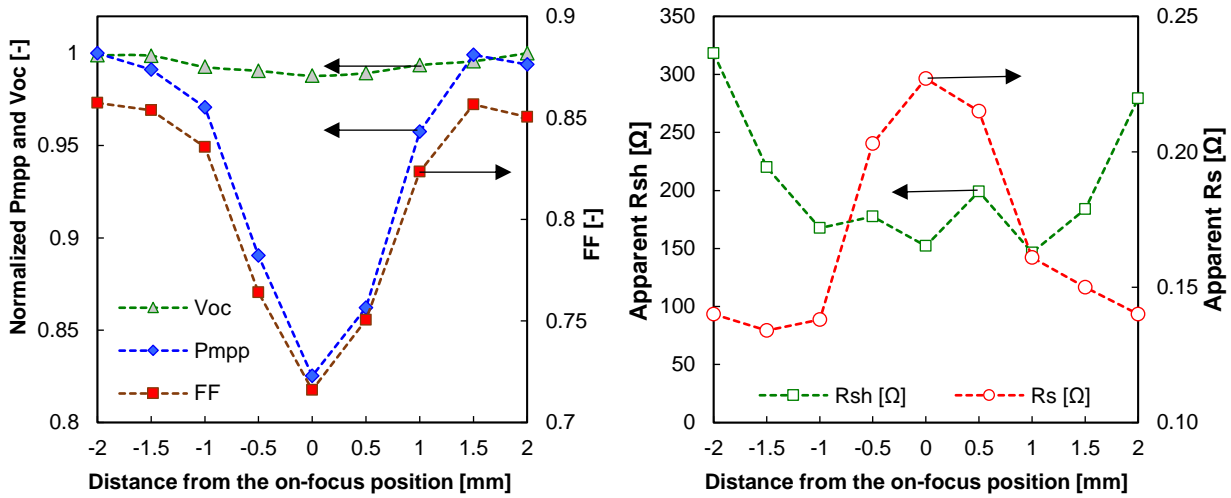


Figure 18. Left: Normalized maximum power, normalized open-circuit voltage and, fill factor of the dish-shaped mirror single-unit as a function of the distance of the receiver from the on-focus position for the Fresnel lens single-unit (normalization values: $P_{mpp} = 5.05$ W and $V_{oc} = 3.18$ V). Right: Apparent shunt and series resistance of the same device.

4. Conclusions

In this paper, the characterisation of non-uniform illumination on refractive and reflective concentrator photovoltaic systems equipped with triple junction solar cells without secondary optical elements has been carried out by varying the concentrator-to-receiver distance both, by a simulation procedure and

by indoor measurements. The results of the study will be useful for the designers to evaluate the trade-off between increasing cost and increasing efficiency of the strategies that mitigate the irradiance and spectral non-uniformity on the solar cells.

The different behaviour of the refractive and reflective systems has been analysed. Irradiance peak-to-average ratios are higher for the reflective system around the on-focus position (with maximum values of 4.99 for the top subcell and of 5.23 for the middle subcell) than those found for the refractive system over the whole range of concentrator-to-receiver distances (with values in the range of 2.82 to 3.30 for the top subcell and 3.01 to 3.51 for the middle subcell). In addition, the top and middle subcell irradiance distributions are symmetric with respect to the on-focus position for the case of the reflective system, while they follow an opposite trend for the case of the refractive system: the top subcell irradiance tends to be more uniform as the concentrator-to-receiver distance increases, while the middle subcell irradiance tends to be less uniform as the concentrator-to-receiver distance increases. The spectral non-uniformities are evident in the case of the refractive system with values of the spectral uniformity ratio within the range of 1.54 to 1.77, while the chromatic aberration in the case of the reflective system is quite small (spectral uniformity ratios between 1.23 and 1.36), although observable in the experiments. The small chromatic aberration of the reflective system is caused by the double refraction in the glass cover of the mirror. The fill factor variations as a function of the concentrator-to-receiver distance are driven by the change of the slope of the I-V curve near the short-circuit point in the case of the refractive system (affected by the combined effect of chromatic aberration and top subcell irradiance non-uniformity), while they are driven by the change of the slope of the I-V curve near the open-circuit point in the case of the reflective system (affected by the strong top and middle subcell irradiance non-uniformity).

The ray tracing simulations give values of the irradiance peak-to-average ratios much higher than those observed in the experiments because of several factors not modelled, such as the imperfections of the optical materials caused by manufacturing processes or the spectral reflectivity in the case of the mirror-based system. However, the simulations are a useful tool to identify the trends of the non-uniformity indexes. Overall, the simulated trends agree with the experimental results. It can be highlighted that the behaviour of both the refractive and reflective systems is strongly affected by the concentrator-to-receiver distance. Therefore, selecting an adequate distance for avoiding excessive performance loss is essential in the design of any concentrator system. This choice must be carried out through experimental procedures rather than simulation-only approaches.

Future work will focus on the analysis of non-uniformities on refractive and reflective concentrator systems equipped with secondary optical elements, as well as the analysis of other effects causing the non-uniformities such as partial shading.

Acknowledgments

This work has been partially funded by the project “UltraMicroCPV” (MICINN- Agencia Estatal de Investigación: PID2019-106497RB-I00/AEI/10.13039/501100011033) and by the project NACe-CPV/TE (Junta de Andalucía, PAIDI 2020: P18-RT-1595). P. M. Rodrigo thanks the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities because of the 2020-2024 Beatriz Galindo fellowship (BEAGAL18/00164) and, the Science and Technology National Council of Mexico (CONACYT) because of his designation as a member of the Mexican System of Researchers. E.F. Fernández thanks the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities for the funds received under the Ramón y Cajal programme (RYC-2017-21910). D. Chemisana thanks ICREA for the ICREA Acadèmia.

References

- [1] E.F. Fernández, F. Almonacid, P.M. Rodrigo, P.J. Pérez-Higueras, CPV systems, in: McEvoy’s Handb. Photovoltaics Fundam. Appl., 2018: pp. 931–985.
- [2] E.F. Fernández, G. Siefer, M. Schachtner, A.J. García Loureiro, P. Pérez-Higueras, Temperature coefficients of monolithic III-V triple-junction solar cells under different spectra and irradiance levels, in: AIP Conf. Proc., 2012: pp. 189–193. <https://doi.org/10.1063/1.4753865>.
- [3] W. Guter, A.W. Bett, I–V Characterization of Tunnel Diodes and Multijunction Solar Cells, IEEE Trans. Electron Devices. 53 (2006) 2216–2222.
- [4] A. Braun, B. Hirsch, E.A. Katz, J.M. Gordon, W. Guter, A.W. Bett, Localized irradiation effects on tunnel diode transitions in multi-junction concentrator solar cells, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 93 (2009) 1692–1695.
- [5] L.W. James, Effects of concentrator chromatic aberration on multi-junction cells, in: Proc. 1994 IEEE 1st World Conf. Photovolt. Energy Convers. - WCPEC (A Jt. Conf. PVSC, PVSEC PSEC), 1994: pp. 1799–1802 vol.2. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.1994.520652>.
- [6] H. Baig, K.C. Heasman, T.K. Mallick, Non-uniform illumination in concentrating solar cells, Renew. Sustain. Energy Rev. 16 (2012) 5890–5909.

- [7] R. Winston, J.C. Miñano, P. Benítez, 13 - APPLICATIONS TO SOLAR ENERGY CONCENTRATION, in: R. Winston, J.C. Miñano, P. Benítez (Eds.), *Nonimaging Opt.*, Academic Press, Burlington, 2005: pp. 317–394. <https://doi.org/10.1016/B978-012759751-5/50013-0>.
- [8] S.R. Kurtz, M.J. O’Neill, Estimating and controlling chromatic aberration losses for two-junction, two-terminal devices in refractive concentrator systems, in: *Conf. Rec. Twenty Fifth IEEE Photovolt. Spec. Conf. - 1996*, 1996: pp. 361–364. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1996.564020>.
- [9] K. Araki, M. Kondo, H. Uozumi, M. Yamaguchi, Experimental proof and theoretical analysis on effectiveness of passive homogenizers to 3J concentrator solar cells, in: *3rd World Conf. On Photovoltaic Energy Conversion*, 2003. Proc., 2003: pp. 853-856 Vol.1.
- [10] K. Nishioka, T. Takamoto, W. Nakajima, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka, T. Fuyuki, Analysis of triple-junction solar cell under concentration by SPICE, in: *3rd World Conf. On Photovoltaic Energy Conversion*, 2003. Proc., 2003: pp. 869-872 Vol.1.
- [11] J.M. Olson, Simulation of nonuniform irradiance in multijunction IIIV solar cells, in: *2010 35th IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, 2010: pp. 201–204. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2010.5614523>.
- [12] J.F. Wheeldon, C.E. Valdivia, A. Walker, G. Kolhatkar, D. Masson, B. Riel, S. Fafard, A. Jaouad, A. Turala, R. Arès, V. Aimez, T.J. Hall, K. Hinzer, GaAs, AlGaAs and InGaP Tunnel Junctions for Multi-Junction Solar Cells Under Concentration: Resistance Study, *AIP Conf. Proc.* 1277 (2010) 28–31. <https://doi.org/10.1063/1.3509213>.
- [13] I. García, P. Espinet-González, I. Rey-Stolle, C. Algora, Analysis of Chromatic Aberration Effects in Triple-Junction Solar Cells Using Advanced Distributed Models, *IEEE J. Photovoltaics*. 1 (2011) 219–224.
- [14] P. Espinet-González, I. Rey-Stolle, C. Algora, I. García, Analysis of the behavior of multijunction solar cells under high irradiance Gaussian light profiles showing chromatic aberration with emphasis on tunnel junction performance, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 23 (2015) 743–753.
- [15] S.R. Kurtz, D.J. Friedman, J.M. Olson, The effect of chromatic aberrations on two-junction, two-terminal, devices on a concentrator system [solar cells], in: *Proc. 1994 IEEE 1st World*

Conf. Photovolt. Energy Convers. - WCPEC (A Jt. Conf. PVSC, PVSEC PSEC), 1994: pp. 1791–1794 vol.2. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.1994.520650>.

- [16] H. Cotal, R. Sherif, The effects of chromatic aberration on the performance of GaInP/GaAs/Ge concentrator solar cells from Fresnel optics, in: Conf. Rec. Thirty-First IEEE Photovolt. Spec. Conf. 2005., 2005: pp. 747–750. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2005.1488240>.
- [17] R. Herrero, M. Victoria, C. Domínguez, S. Askins, I. Antón, G. Sala, Concentration photovoltaic optical system irradiance distribution measurements and its effect on multi-junction solar cells, Prog. Photovoltaics Res. Appl. 20 (2012) 423–430.
- [18] E.A. Katz, J.M. Gordon, D. Feuermann, Effects of ultra-high flux and intensity distribution in multi-junction solar cells, Prog. Photovoltaics Res. Appl. 14 (2006) 297–303.
- [19] M. Victoria, R. Herrero, C. Domínguez, I. Antón, S. Askins, G. Sala, Characterization of the spatial distribution of irradiance and spectrum in concentrating photovoltaic systems and their effect on multi-junction solar cells, Prog. Photovoltaics Res. Appl. 21 (2013) 308–318.
- [20] N. Hayashi, D. Inoue, M. Matsumoto, A. Matsushita, H. Higuchi, Y. Aya, T. Nakagawa, High-efficiency thin and compact concentrator photovoltaics with micro-solar cells directly attached to a lens array, Opt. Express. 23 (2015) A594--A603.
- [21] P. Rodrigo, E.F. Fernández, F. Almonacid, P.J. Pérez-Higueras, Outdoor measurement of high concentration photovoltaic receivers operating with partial shading on the primary optics, Energy. 61 (2013) 583–588.
- [22] L.A.A. Bunthof, S. Veelenturf, E.J. Haverkamp, W.H.M. Corbeek, D. [van der Woude], G.J. Bauhuis, P. Mulder, E. Vlieg, J.J. Schermer, Partially shaded III-V concentrator solar cell performance, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 179 (2018) 231–240.
- [23] International Electrotechnical Commission, IEC 62670-1 standard. Photovoltaic concentrators (CPV) - Performance testing - Part 1: Standard conditions, 2013.
- [24] Solar Added Value, Helios 3198, (2020). <http://solaraddedvalue.com/en/category/productos/helios-3198/> (accessed September 28, 2020).
- [25] E.F. Fernández, J.P. Ferrer-Rodríguez, F. Almonacid, P. Pérez-Higueras, Current-voltage

dynamics of multi-junction CPV modules under different irradiance levels, *Sol. Energy*. 155 (2017) 39–50.

- [26] C. Domínguez, I. Antón, G. Sala, Solar simulator for concentrator photovoltaic systems, *Opt. Express*. 16 (2008) 14894–14901.
- [27] ASTM International, ASTM G173 - 03 standard. Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface, West Conshohocken, PA, 2012.
- [28] Edmund Optics, 75 x 75mm White Diffusing Glass, (2020).
<https://www.edmundoptics.com/p/75-x-75mm-white-diffusing-glass/3842/> (accessed September 28, 2020).
- [29] Edmund Optics, 12.5 x 12.5mm White Diffusing Glass, (2020).
<https://www.edmundoptics.com/p/125-x-125mm-white-diffusing-glass/3836/> (accessed September 28, 2020).
- [30] C. Domínguez, I. Antón, G. Sala, S. Askins, Current-matching estimation for multijunction cells within a CPV module by means of component cells, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 21 (2013) 1478–1488.
- [31] P.M. Rodrigo, E.F. Fernández, F.M. Almonacid, P.J. Pérez-Higueras, Quantification of the spectral coupling of atmosphere and photovoltaic system performance: Indexes, methods and impact on energy harvesting, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 163 (2017) 73–90.
- [32] M. Theristis, E.F. Fernández, G.E. Georghiou, T.S. O’Donovan, Performance of a concentrating photovoltaic monomodule under real operating conditions: Part I – Outdoor characterisation, *Energy Convers. Manag.* 154 (2017) 311–321.
- [33] M. Theristis, E.F. Fernández, G.E. Georghiou, T.S. O’Donovan, Performance of a concentrating photovoltaic monomodule under real operating conditions: Part II – Power rating, *Energy Convers. Manag.* 156 (2018) 329–336.
- [34] J.P. Ferrer-Rodríguez, E.F. Fernández, H. Baig, F. Almonacid, T. Mallick, P. Pérez-Higueras, Development, indoor characterisation and comparison to optical modelling of four Fresnel-based high-CPV units equipped with refractive secondary optics, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 186 (2018) 273–283.

- [35] G. Peharz, J.P. Ferrer Rodríguez, G. Siefert, A.W. Bett, Investigations on the temperature dependence of CPV modules equipped with triple-junction solar cells, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 19 (2011) 54–60.
- [36] P. Pérez-Higueras, J.P. Ferrer-Rodríguez, F. Almonacid, E.F. Fernández, Efficiency and acceptance angle of High Concentrator Photovoltaic modules: Current status and indoor measurements, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 94 (2018) 143–153.
- [37] International Electrotechnical Commission, IEC 60904-7:2019, Photovoltaic devices - Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices, 2019.
- [38] E.F. Fernández, A. Soria-Moya, F. Almonacid, J. Aguilera, Comparative assessment of the spectral impact on the energy yield of high concentrator and conventional photovoltaic technology, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 147 (2016) 185–197.
- [39] M. Theristis, E.F. Fernández, F. Almonacid, P. Pérez-Higueras, Spectral Corrections Based on Air Mass, Aerosol Optical Depth, and Precipitable Water for CPV Performance Modeling, *IEEE J. Photovoltaics.* 6 (2016) 1598–1604.
- [40] C.A. Gueymard, SMARTS2, A simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment, Florida Sol. Energy Cent. FSEC-PF-27 (1995).
- [41] C.A. Gueymard, Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance, *Sol. Energy.* 71 (2001) 325–346.
- [42] C.A. Gueymard, The SMARTS spectral irradiance model after 25 years: New developments and validation of reference spectra, *Sol. Energy.* 187 (2019) 233–253.
- [43] E.F. Fernández, F. Almonacid, J.A. Ruiz-Arias, A. Soria-Moya, Analysis of the spectral variations on the performance of high concentrator photovoltaic modules operating under different real climate conditions, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 127 (2014) 179–187.
- [44] Edmund Optics, 725nm 12.5mm Diameter, High Performance Longpass Filter, (2020). <https://www.edmundoptics.com/p/725nm-125mm-dia-high-performance-longpass-filter/28548/> (accessed September 28, 2020).
- [45] Edmund Optics, 650nm 12.5mm Diameter, OD 2.0 Shortpass Filter, (2020).

<https://www.edmundoptics.com/p/650nm-125mm-diameter-od-2-shortpass-filter/7974/>
(accessed September 28, 2020).

- [46] M. Polyanskiy, Refractive index database, RefractiveIndex.INFO. (2020).
https://refractiveindex.info/?shelf=organic&book=poly%28methyl_methacrylate%29&page=Sczuruowski (accessed May 29, 2020).
- [47] J.P. Ferrer-Rodríguez, H. Baig, E.F. Fernández, F. Almonacid, T. Mallick, P. Pérez-Higueras, Optical modeling of four Fresnel-based high-CPV units, *Sol. Energy*. 155 (2017) 805–815.
- [48] M. Polyanskiy, Refractive index database, RefractiveIndex.INFO. (2020).
<https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=BK7&page=SCHOTT> (accessed June 1, 2020).
- [49] M. Wiesenfarth, I. Anton, A.W. Bett, Challenges in the design of concentrator photovoltaic (CPV) modules to achieve highest efficiencies, *Appl. Phys. Rev.* 5 (2018) 041601.

Capítulo 4: Introducción de óptica homogeneizadora para paliar los efectos de no- uniformidad en una MJSC

Capítulo 4: Introducción de óptica homogeneizadora para paliar los efectos de no-uniformidad en una MJSC

1. Introducción

Este capítulo persigue dos objetivos principales. En primer lugar, se persigue introducir patrones de no-uniformidad mediante el sombreado del concentrador primario y de este modo simular el efecto de no-uniformidad que se produce en un sistema CPV cuando un conjunto de módulos sombrea la fila posterior de módulos. El segundo objetivo consiste en cuantificar la no-uniformidad de la irradiancia y espectral producida sobre varios receptores y analizar las ventajas que aportan los receptores con óptica secundaria homogeneizadora en el rendimiento eléctrico.

Con estos objetivos, se decidió analizar tres unidades CPV. Todas ellas basadas en una lente Fresnel refractiva fabricada en PMMA y una célula solar de unión triple (TJSC). Cada una de las unidades CPV disponen de una concentración geométrica común de $C_g \approx 559x$, no obstante, estaban equipadas con un receptor diferente. Dos de los receptores consistían en una TJSC equipada con un elemento óptico secundario (SOE) para mejorar la uniformidad y la tolerancia angular. Además, se incluyó otro receptor sin SOE para comparar e investigar las ventajas del uso de homogeneizadores cuando el sistema CPV está expuesto a perfiles de iluminación altamente no-uniformes, como es el caso del sombreado. Los SOEs escogidos fueron una pirámide truncada refractiva (RTP) y el elemento *Single-Lens-Optical* (SILO-Pyramid) debido a su diferente forma de homogeneizar los rayos (reflexión total interna y refracción, respectivamente) y su notable aceptación angular y eficiencia óptica.

El trabajo realizado para desarrollar esta investigación se puede clasificar en dos enfoques principales: por un lado, se realizó una caracterización de los patrones de distribución de la luz generados sobre tres receptores CPV en función del factor de sombreado introducido; y por otro lado, se estudió el impacto de la no-uniformidad sobre los parámetros eléctricos.

2. Resultados y contribución al estado del arte

Análogo al capítulo 3, los experimentos fueron realizados mediante el uso de un simulador solar CPV en el laboratorio del CEACTEMA haciendo uso del mismo montaje experimental.

Con el propósito de disminuir los posibles efectos de otras variables y centrarnos en el estudio del efecto de uniformidad, se fijaron cuatro condiciones de contorno: 1) La irradiancia normal directa (DNI) se fijó en 1000 W/m^2 , 2) El balance espectral entre la subcélula *top* y la *middle* se acotó a $SMR_{top/mid} = 1 \pm 0.02$, 3) la temperatura de laboratorio se mantuvo a $25 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y finalmente 4) el alineamiento entre el POE, el receptor CPV y los rayos colimados.

Los patrones de sombreado se introdujeron sobre la superficie de la lente Fresnel. Estos patrones de sombreado consisten en colocar láminas opacas sobre la superficie del POE modificando la superficie sombreada (*shading factor*) en dirección ascendente en un rango de 0 a 80% respecto a la superficie total de la lente. Finalmente se caracterizaron los patrones de distribución de la luz sobre la célula solar mediante el uso de una cámara CCD.

2.1. Impacto en la no-uniformidad de los patrones de distribución de la luz

Se obtuvieron los perfiles de distribución de irradiancia sobre los rangos espectrales correspondientes a las subcélulas *top* y *middle* bajo diferentes rangos de sombreado de 0 a 80%.

En primer lugar, los patrones de luz mostraron una mejor uniformidad en las unidades CPV equipadas con óptica secundaria respecto a la unidad sin SOE. Adicionalmente, se pudo observar que los perfiles de irradiancia tendían a ser menos uniformes para ambas subcélulas a medida que se incrementaba el sombreado. Por otro lado, cabe destacar el peculiar comportamiento que se observó en la localización del pico de irradiancia en la unidad sin SOE. Ésta mostraba un desplazamiento hacia abajo en la subcélula *top*, mientras que en la subcélula *middle* hacía lo propio en sentido opuesto, desplazándose hacia arriba. Sin embargo, en las unidades con SOE resultó un desplazamiento hacia abajo en ambas subcélulas a medida que aumentaba el factor de sombreado.

Con todo ello, el análisis de no-uniformidad de la irradiancia corroboró una mejor uniformidad para las unidades equipadas con SOE, mostrando valores de PAR en ambas subcélulas más pequeños que para el caso de sin SOE en casi todos los rangos de sombreado analizados. Siendo el RTP la unidad CPV que mejor uniformidad espacial presentaba (PAR_{top} varía entre 1.5 y 2.3, mientras que el PAR_{mid} difiere entre 1.9 y 3.1). Asimismo, el SILO-Pyramid mostró peor uniformidad espacial que el RTP (PAR_{top} varía entre 1.6 y 3.8, mientras que el PAR_{mid} se muestra entre 2.1 y 3.8), pero notablemente mejor que la unidad sin SOE. Asimismo, la unidad sin SOE mostró un cambio en la tendencia una vez alcanza un 50 % de factor de sombreado. La no-uniformidad de la irradiancia en ambas subcélulas presentó un crecimiento hasta alcanzar $S = 50\%$ (PAR_{top} varía entre 3.2 y 3.4, en cambio PAR_{mid} difiere entre 3.4 y 3.6). Esto es debido a la agudización del pico de irradiancia en ambas subcélulas propiciado por el cambio espectral entre las longitudes de onda cortas y largas discutido anteriormente. Por otro lado, la no-uniformidad de la irradiancia tiende a reducirse para factores de sombreado superiores a 50 % como consecuencia de la mejora del perfil de irradiancia causada por la atenuación del pico de los perfiles producida por el cambio espectral.

Considerando la distribución espectral de irradiancia se puede concluir que el caso sin SOE mostraba de nuevo los peores resultados a medida que aumenta el sombreado mostrando valores de SUR en un rango entre 1.3 y 3.5. Por otro lado, el RTP presentó valores de SUR comprendidos entre 1.3 y 4.1. A pesar de alcanzar un mayor valor para un factor de sombreado de 80%, presenta valores de SUR más bajos para el resto de rangos analizados además de un comportamiento considerablemente más estable hasta $S = 50\%$. Finalmente, el SILO-Pyramid resultó ser la unidad con mejor uniformidad espectral comprendiendo unos valores de SUR entre 1.5 y 2.6.

2.2. Impacto en los parámetros eléctricos

En paralelo a la caracterización de los patrones de no-uniformidad generados sobre los tres receptores se trazaron las curvas IV para cada rango de sombreado y se analizaron sus parámetros eléctricos en condiciones estándar de medida para concentradores (CSTC). Según la norma IEC 62670-1. *Concentrator Photovoltaic (CPV) - Performance testing - Part 1: Standard conditions* (2013) en la cual se establece una irradiancia de 1000 W/m, temperatura de célula de 25 °C y un espectro incidente de referencia AM1.5D.

En primer lugar, es valorable destacar los resultados obtenidos analizando las tres unidades CPV sin aplicar patrones de sombreado. Asimismo, la unidad sin SOE mostró la mayor concentración eficaz y eficiencia óptica debido a no estar afectada por la atenuación producida en el dieléctrico de la óptica secundaria (PMMA). Por otro lado, las unidades CPV equipadas con SOEs presentaron una mayor aceptación angular y una mejor uniformidad espacial y espectral.

Se ha de prestar especial atención la evolución del punto de máxima potencia (P_{mpp}) debido a ser el responsable de la eficiencia y energía producida en condiciones reales de operación. Los resultados mostraron que en las tres unidades investigadas, la P_{mpp} disminuye linealmente con el sombreado, sin embargo, cada unidad presenta un comportamiento particular al sombreado.

Considerando la unidad sin SOE, el FF se pudo mantener constante para factores de sombreado inferiores al 30 % debido a la idéntica reducción entre la P_{mpp} y la corriente de cortocircuito. Será para factores de sombreado superiores a 30 % cuando cambie esta tendencia, agudizándose la reducción de la P_{mpp} respecto de la de la I_{sc} . Esto derivó en una disminución del FF de hasta un 12.6 % para un $S = 80\%$. Esta degradación del FF tiene su explicación considerando el notable aumento de la no-uniformidad espectral con el sombreado.

Respecto al RTP, se observó una menor reducción de la I_{sc} respecto al caso sin SOE, lo que derivó en una reducción en las pérdidas por sombreado y consecuentemente una mayor potencia producida. Adicionalmente, se observó una evolución de la P_{mpp} y de la I_{sc} muy similar para todos los rangos de sombreado analizados. Esto pudo ser debido a la mejora significativa de la uniformidad espacial que contribuye a reducir las pérdidas en el FF. De hecho, el FF tiende a incrementar hasta un $S = 60\%$. Este mismo fenómeno se observó en el SILO-Pyramid, donde el FF tendía a aumentar hasta alcanzar un $S = 50\%$. Una vez sobrepasa este rango de sombreado, el FF se reduce propiciado por un aumento de la no-uniformidad espacial en ambas subcélulas.

3. Publicación

- José M. Saura, Daniel Chemisana, Pedro M. Rodrigo, Florencia M. Almonacid, and Eduardo F. Fernández, “Effect of non-uniformity on concentrator multi-junction solar cells equipped with refractive secondary optics under shading conditions”, *Energy* (2021), under review.

Effect of non-uniformity on concentrator multi-junction solar cells equipped with refractive secondary optics under shading conditions

José M. Saura^{1,2}, Daniel Chemisana², Pedro M. Rodrigo¹, Florencia M. Almonacid¹, and Eduardo F. Fernández^{1*}

¹*Advances in Photovoltaic Technology (AdPVTech), CEACTEMA, University of Jaén (UJA), 23071 Jaén, Spain.*

²*Applied Physics Section of the Environmental Science Department, University of Lleida, 25001 Lleida, Spain*

* Corresponding author: eduardo.fernandez@ujaen.es

Abstract. Non-uniformity is a relevant concern of concentrator photovoltaic systems (CPV) due to its impact on the performance of multi-junction (MJ) solar cells. This work is focused on a state-of-the-art investigation related to the effects of shading on the irradiance profiles and electrical performance of MJ cells. For doing this, three different CPV single-units with a concentration of $\approx 559\times$ have been experimentally investigated indoors at the CPV laboratory of the University of Jaén. The units are made up of PMMA Fresnel lens and standard GaInP/GaInAs/Ge MJ cells. Also, SILO-Pyramid and RTP homogenizers have been considered. The results indicate that shading produces additional spatial and spectral non-uniformities, and that these are reduced by the use of homogenizers. In addition, the non-uniform spectral illumination has been identified as the main cause of the additional reduction of the performance of MJ solar cells. In this sense, the SILO-Pyramid provides the best results and shows a significantly stable spectral performance under shading conditions. For a No-SOE case, the maximum power shows a reduction of 86.3% for a shading factor of 80%, while it is only reduced by 83.2% and by 81.6%, respectively, for the RTP and SILO-Pyramid.

Keywords: concentrator photovoltaics, experimental investigation, homogenizers, shading, non-uniformity

1. Introduction

Concentrator photovoltaics (CPV) aims to replace the amount of expensive semiconductor material by cheaper optical elements. With this strategy, expensive, but high-efficiency, concentrator solar cells can be used. Bearing this in mind, CPV achieves the highest conversion efficiencies among all the PV

technologies [1]. In addition, it offers a promising route to lower the cost of solar electricity at locations with high solar energy resource above 2000-2500 kWh/m² [125, 126, 127]. Nowadays, a CPV module is largely based on the use of multi-junction (MJ) solar cells made up of various semiconductor materials with different energy gaps, usually a GaInP/GaInAs/Ge structure, to improve the spectrum absorption [128]. Regarding the concentrator optics, they usually consist of a primary optical element (POE) and a secondary optical element (SOE) per receiver [6]. The POE, usually a Fresnel lens, collects and concentrates the direct light received from the sun [7]. On the other hand, the SOE, e.g., pyramid, CPC, SILO, etc., homogenizes the concentrated sunlight over the solar cell surface and improve the angular tolerance of the CPV module [131]. Also, CPV widely uses simple and reliable passive cooling mechanisms, flat back plate or finned heat-sink, for heat dissipation and avoiding overheating of the solar cells [132, 133].

A relevant concern of CPV technology is related to the performance losses of solar cells operating under non-uniform illumination. This is due to the use of non-ideal concentrator optics, as well as other external factors such as the unavoidable shading produced when operating in outdoors [11, 12, 13]. Non-uniform illumination produces peak currents that could increase the series resistance losses, or even exceed the tunnel junction threshold of MJ cells, decreasing the fill factor and the efficiency as a consequence [14, 15]. In addition, the low illumination of some regions of the cell could increase the dark currents and recombination performance losses. Another critical concern is related to the chromatic aberrations (CAs) of refractive optics that cause a non-uniform spectral distribution on the cell surface. This can reduce the current of one specific subcell of the stack, and therefore, the overall current of the MJ cells due to the series tunnelling connection. In addition, the current of the MJ cell can be limited by a different subcell in different areas, which causes additional lateral current flows that also contributed to reduces the efficiency of the device [137]. Non-uniformity losses under normal operating conditions, e.g. without shading, can cause a relative efficiency loss of around 4 % in a typical CPV system, while they can increase considerably if the optical configuration is not properly designed [17]. Nowadays, the most widely used approach to minimize these performance losses is by the use of SOEs attached to the cell surface, which act as light homogenizers of the concentrated sunlight [138]. Bearing the above in mind, it can be stated that it is necessary to understand and quantify these non-uniformity losses for finding the optimum balance between cost and efficiency improvement of the CPV system under consideration.

There are several studies focused on the analysis of non-uniformity effects in the scientific literature. Some studies have investigated this phenomenon by using distributed solar cell models, see for instance refs. [139, 140, 141, 142, 143, 87, 88]. However, this approach presents relevant drawbacks. For instance, it is necessary to have a detailed knowledge of the actual irradiance distribution and structure of the MJ solar. Furthermore, the models are complex, and it is difficult to accurately consider the imperfections of the optical elements caused by the inherent manufacturing tolerances. Due to this, the experimental investigation becomes fundamental for investigating this topic. In [26], the authors used different masks of transparent acetate film to reproduce Gaussian illumination profiles on triple-junction solar cells, which were measured in a concentrator solar simulator. The results showed a clear decrease of the fill factor as the peak-to-average irradiance was increased. In [27], the authors developed an experimental set-up consisting of two outdoor reflectors that concentrate the light up to 10000 suns by using optical fibres. Due to this novel set-up, it was possible to illuminate a small area of the solar cell with an extreme concentrated intensity, while the rest of the cell was kept dark. The results showed that cell performance was not significantly affected by the localized irradiance, but a remarkable decrease under ultra-high concentration fluxes was demonstrated. In [28], the authors conducted an indoor characterisation of the impact of the irradiance and spectral non-uniformity on triple-junction solar cells integrated with point-focus Fresnel lens and different SOE designs. In [145], the authors proposed a thin and compact CPV module made up of micro-scale solar cells. In this case, SOE units were not considered. The results showed that non-uniformity losses reached a value 6.7 %. In [146], an outdoor experimental investigation of CPV receivers based on triple-junction solar cells integrated with point-focus Fresnel lens and SOEs under different shading conditions was carried out by the authors of the present work. The results indicated that the maximum power was reduced proportional to the shaded area of the POE. In [147], the authors investigated standard triple-junction and single-junction GaAs solar cells indoors by directly shading the cell area. The cells showed losses of around 4% and an independent behaviour to the location of shading over their surface.

Despite the remarkable studies commented above, further investigations are still needed to better understand the effects of non-uniformity on MJ solar cells. This work is intended to investigate the non-uniformity profiles produced by shading on point-focus POE Fresnel lens, and their effect on the performance of MJ cells equipped with different SOE units. The study is connected with the work recently presented by the authors focused on the characterization and evaluation of non-uniformities on the performance of MJ cells under reflective and refractive concentrator optics [32]. In this case, different shading conditions are produced on the surface of point-focus Fresnel lens by using opaque

masks. The spatial and spectral irradiance distribution is characterized by a CCD camera tuned to match the spectral response of the MJ cell under investigation. Also, different types of SOEs are considered. The irradiance profiles are linked with the electrical output of a standard MJ solar cell to better understand the performance losses of CPV systems under actual shading conditions.

2. Materials and methods

2.1. Description of the CPV system

Three different CPV single-units were analysed. All of them are based on a square poly(methyl methacrylate) (PMMA) Fresnel lens as primary optical element (POE) and on a standard triple-junction solar cell (TJSC). The area of the POE and of the concentrator solar cell are $130 \times 130 \text{ mm}^2$ and $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$, respectively. Consequently, they have a geometric concentration (C_g) of $\approx 559\times$, expressed as the ratio of the POE to the cell area. The main features of the POE, as provided by ORAFOL Fresnel Optics GmbH, are shown in Table 1 (note that the POE is the same for the three CPV units).

Table 3. Characteristics of the primary optical element (POE) of the single-units under study.

Parameter	Fresnel lens
Aperture area [mm^2]	16900
Focal distance [mm]*	152
Aspect ratio [-]	1.04
Facet spacing [mm]	0.381
Thickness [mm]	1.8
C_g [-]	559

*Focal distance estimated at 546 nm (max. tolerance $\pm 5\%$), as provided by the manufacturer.

Each of the CPV units is formed by a different receiver. Two of the receivers consist of a TJSC equipped with a secondary optical element (SOE) to improve the uniformity and angular tolerance. In addition, another receiver without SOE has been included for comparison purposes and for investigating the advantages of using homogenizers. The SOEs under consideration have been previously designed and experimentally investigated by the research team [33, 34]. Among the different SOEs, a Single-Lens-Optical element (SILO-Pyramid) and a refractive truncated pyramid (RTP) have been investigated. The SILO-Pyramid works as a lens that images the POE on the TJCS, while the RTP works under the total internal reflection (TIR) of the light. This helps for obtaining

more general results depending on the type of SOE. The SOEs have been manufactured by ANDALTEC (R&D center of Plastics – Foundation) by machining a PMMA block through computer numerical control (CNC). After this, the SOEs have been attached to the solar cells using an optical adhesive (Norland 68TH, $n=1.54$ for cured polymer). In this way, the coupling between the SOE and the cell is improved with the aim of reducing as much as possible the optical losses at the interface layers. Figure 1 shows some photos of the SOEs mounted on the TJSCs, as well as their main geometrical characteristics. Further details of these elements, and about their assembly and manufacturing, can be found in the references mentioned above.

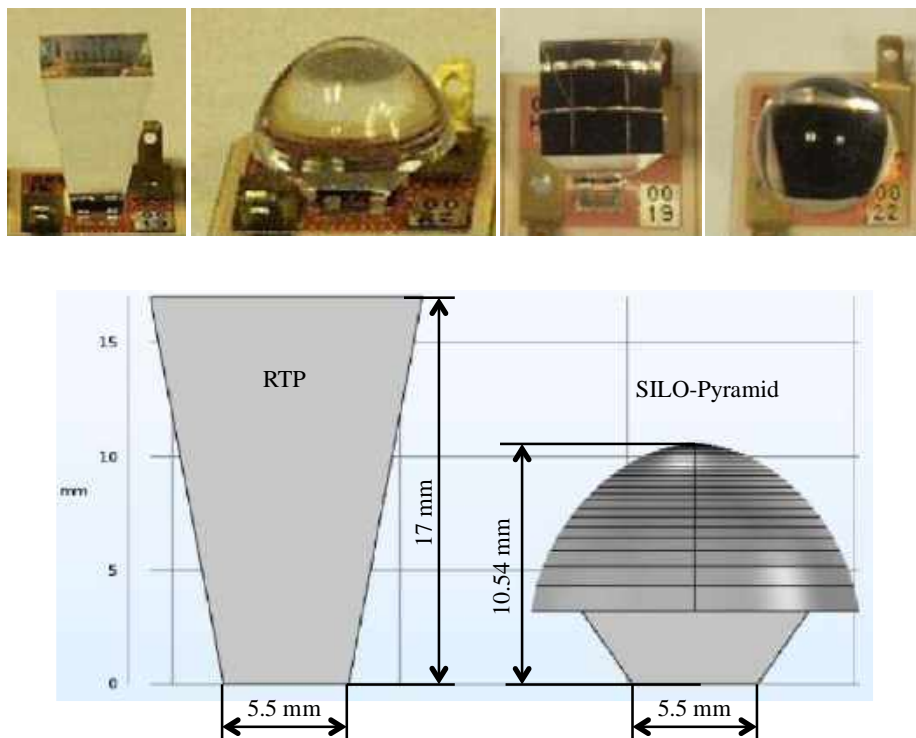


Figure 1. Photos (top) example and scheme (bottom) with the geometry and dimensions of the RTP and the SILO-Pyramid SOEs.

As commented, the CPV receivers are based on typical TJSCs, which are made up of GaInP/GaInAs/Ge materials. These cells have been provided by AZUR SPACE Solar Power GmbH (type 3C42A). The receiver without SOE (TJSC_{NO-SOE}) is based on a TJSC with an Antireflective Coating (ARC) adapted to air. On the other hand, the receivers equipped with a SOE were attached to TJSCs with an ARC adapted to glass, e.g. TJSC_{RTP} and TJSC_{SILO-Pyramid}. The main electrical parameters at concentrator standard test conditions (CSTC) (CSTC: 1000 W/m² irradiance, 25 °C cell temperature and AM1.5D reference spectrum) [151] of each individual cell are shown in Table 2. As can be seen,

the electrical parameters show a low standard deviation (σ), which ensures a low uncertainty in the experimental results caused by a possible mismatch among the cells. The spectral response (SR) of each subcell (top, middle and bottom) of the TJSC is also shown in Figure 2.

Table 2. Electrical parameters of the CPV receivers at CSTC and 1000 suns: short-circuit current (I_{SC}), open-circuit voltage (V_{OC}), current at maximum power point (I_{MPP}), voltage at maximum power point (V_{MPP}), maximum power (P_{MPP}), fill factor (FF) and efficiency (η_{cell}), as provided by the manufacturer.

Parameter	TJSC _{NO-SOE}	TJSC _{RTP}	TJSC _{SILO-Pyramid}	σ
I_{sc} [A]	4.629	4.605	4.609	0.013
V_{oc} [V]	3.159	3.145	3.146	0.008
I_{MPP} [A]	4.547	4.535	4.540	0.006
V_{MPP} (V)	2.727	2.724	2.724	0.002
P_{MPP} [W]	12.40	12.35	12.37	0.03
FF [-]	0.848	0.853	0.853	0.003
η_{cell} [%]	40.6	40.5	40.5	0.1

Table 3 shows the main parameters of each single-unit at CSTC recorded following the procedure described in the next sub-section. These magnitudes are in agreement with previous work of the team related to the experimental characterization of the CPV units also considered in this study (see Tables 3 and 4 of [34]). This gives further evidences concerning the robustness of the experimental procedure used. In this table, the operating effective concentration (C_{eff}) of each CPV unit has been estimated according to the following expression:

$$C_{eff} = \frac{I_{sc}}{I_{sc}^{1\text{sun}}} \quad (9)$$

where $I_{sc}^{1\text{sun}}$ is the short-circuit current of each CPV receiver at CSTC and 1 sun. Based on this, the optical efficiency (η_{opt}) can be calculated as:

$$\eta_{opt} = \frac{C_{eff}}{C_g} = \frac{I_{sc}^{meas}}{I_{sc}^{1\text{sun}}} \cdot \frac{1}{C_g} \quad (10)$$

Finally, this efficiency can be split in two factors as:

$$\eta_{opt} \approx \eta_{POE} \cdot \eta_{SOE} \quad (11)$$

where η_{POE} and η_{SOE} are the optical efficiency of the POE and of the SOE, respectively. Further details of the magnitudes shown in Table 3 and about the experimental procedure for their estimation can be found in [150, 152]. As can be seen in that table, the CPV unit without SOE shows the highest C_{eff} and η_{opt} since it is not affected by the attenuation produced by the PMMA SOEs. However, the CPV units equipped with SOEs present a higher acceptance angle (AA), which is critical to improve the angular tolerance of real case CPV modules. The improvement of the irradiance uniformity of the SOE units is the main topic of this paper, and will be discussed in the sections below.

Table 3. Experimental measurements of the electrical and optical parameters of the CPV units at CSTC: short-circuit current (I_{sc}), maximum power (P_{MPP}), fill factor (FF) and open-circuit voltage (V_{oc}), mono-module efficiency (η), effective concentration (C_{eff}), optical efficiency (η_{opt}), optical efficiency of the POE (η_{POE}), optical efficiency of the SOE (η_{SOE}) and acceptance angle (AA).

Parameter	NO-SOE	RTP	SILO-Pyramid
I_{sc} [A]	2.02	1.82	1.91
P_{MPP} [W]	4.99	4.39	4.37
FF [-]	0.78	0.77	0.73
V_{oc} [V]	3.17	3.15	3.15
η [%]	29.5	26.0	25.9
C_{eff} [suns]	436	396	414
η_{opt} [%]	77.96	70.86	74.12
η_{POE} [%]	77.96	77.96	77.96
η_{SOE} [%]	-	90.9	95.1
AA (°)	±0.6	±1.2	±0.8

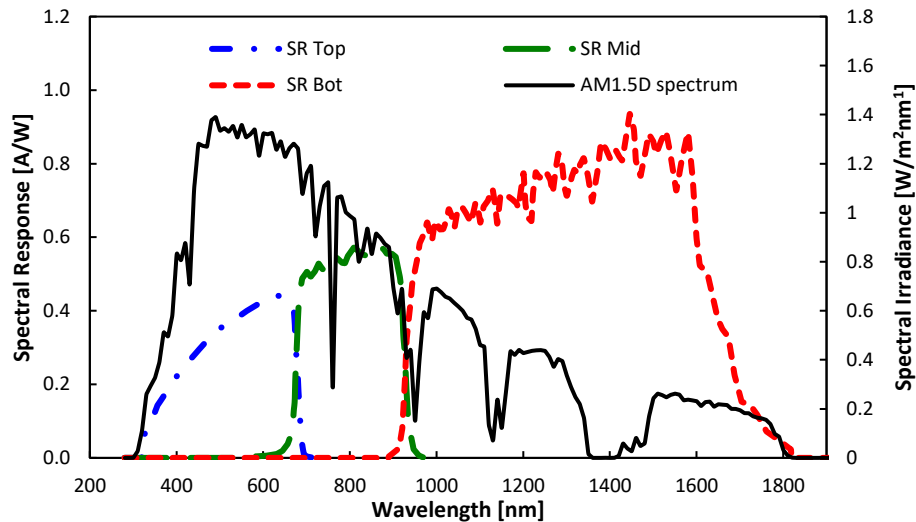


Figure 2. Terrestrial solar direct reference spectrum (AM1.5D, ASTM G173-03, in black) and spectral response (*SR*) provided by the manufacturer of each subcell (top in blue, middle in green and bottom in red) of the triple-junction solar cell (TJSC) made up of GaInP/GaInAs/Ge.

2.2. Experimental procedure

2.2.1. Main features of the set-up

The experimental campaign was performed at the CEACTEMA CPV laboratory of the University of Jaén. The set-up is analogous as the already presented by the authors in recent works [148, 153, 154], which is also shown in Figure 3. Due to the complexity of this set-up, and for facilitating the understanding of the experimental procedure, the main elements and features are also mentioned here:

- A CPV solar simulator, multi-flash Helios 3198 (rated as AAA simulator), equipped with different filters and glass covers, to control the input spectral irradiance, and to produce a spectrum equivalent to the AM1.5D and a high collimation angle (around $\pm 0.4^\circ$) [39, 40, 41].
- Three standard isotype cells calibrated at the reference direct spectrum (ASTM G173-03; air mass = 1.5, aerosol optical depth at 500 nm = 0.084, water vapour = 1.42 cm [42]) to monitor and ensure the standard spectral distribution of the light intensity [43].
- Opto-mechanical instruments and an optical bench for supporting and positioning the receivers at the desired distance over the optical axis of the POE.
- An opaque mask and a Lambertian-like diffuser screen to receive the light distribution produced by the optics at the CPV receiver position without affecting its spectral and spatial

distribution. This position corresponds to the output surface of the SOEs for those systems based on homogenizers.

- A CCD camera based on a Sony ICX274 sensor to measure the light patterns over the Lambertian-like diffuser. The camera has an operating spectral range within 400-1000 nm, and also uses different band-pass filters to achieve a spectral response similar to the TJSC under investigation. Further details of this can be found in [148, 157].

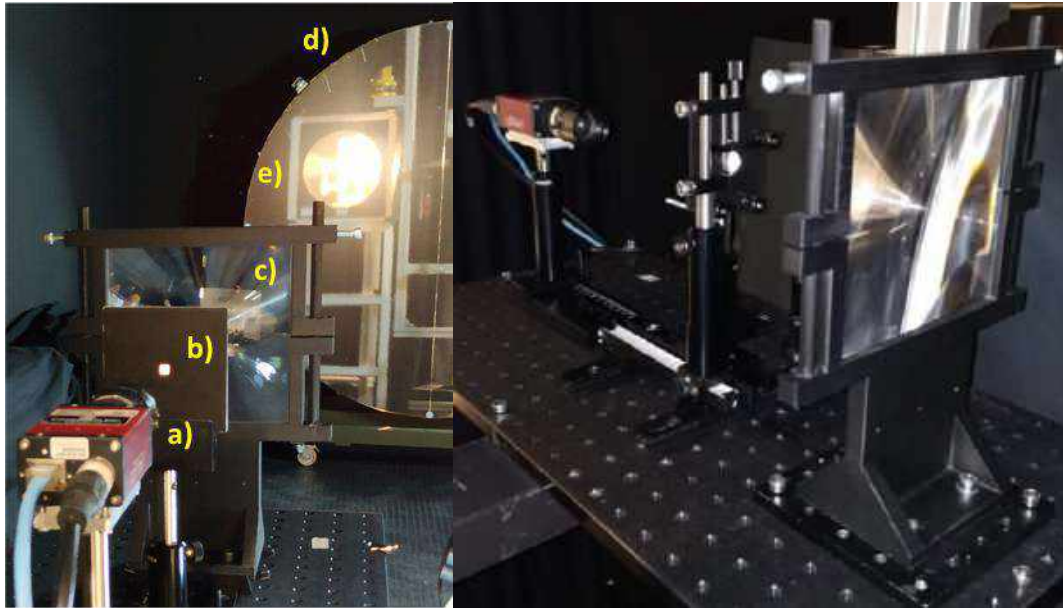


Figure 3. Left: Set-up used for the characterisation of the non-uniformity patterns produced on the TJSC by using the Helios 3198 CPV solar simulator at the CEACTEMA of the University of Jaén: a) CCD camera, b) opaque mask and Lambertian-like diffuser screen, c) Fresnel lens, d) collimator mirror and e) Xe flash lamp and filters. Right: Detail of the SILO-Pyramid and the opto-mechanical instruments like rails carriers, mounting posts and posts holders.

2.2.2. Experimental procedure to characterise the non-uniformity

In order to diminish the possible impact of other variables, and to focus this study on the effect of uniformity on MJSCs, four boundary conditions have been kept fixed, namely: 1) the direct normal irradiance (DNI) equal to 1000 W/m^2 , 2) the Spectral Matching Ratio between the top and middle ($\text{SMR}_{\text{top/mid}}$) equal to 1 ± 0.02 [44, 45], 3) the laboratory room temperature to $25 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, and finally, 4) the alignment among the POE, the receiver and the incident collimated rays. This way, the possible alterations in the experimental measurements caused by the change of the operating conditions are eliminated, or at least reduced as much as possible.

The correct alignment among the elements and the light source is essential to obtain trustable results and to ensure repeatability. The procedure to align the optical elements and the receiver, and to select the optimal position, is shown in Figure 4. As can be seen, the procedure is based on three main steps. First, (1) a visual alignment is conducted to minimize the area of the light spot using the continuous light mode of the simulator. After that, (2) the angles respect to the x and y axes (see Figure 5 for the definitions of the axes) are modified by using the speed reducers of the holding structure of the simulator to obtain the maximum I_{SC} . Finally, (3) the POE-receiver distance (d) along the optical, or z, axis is also modified to find the optimal position. As shown in the Figure, and as considered in previous studies, this position has been selected to maximize the output current, so the operating effective concentration of the systems.

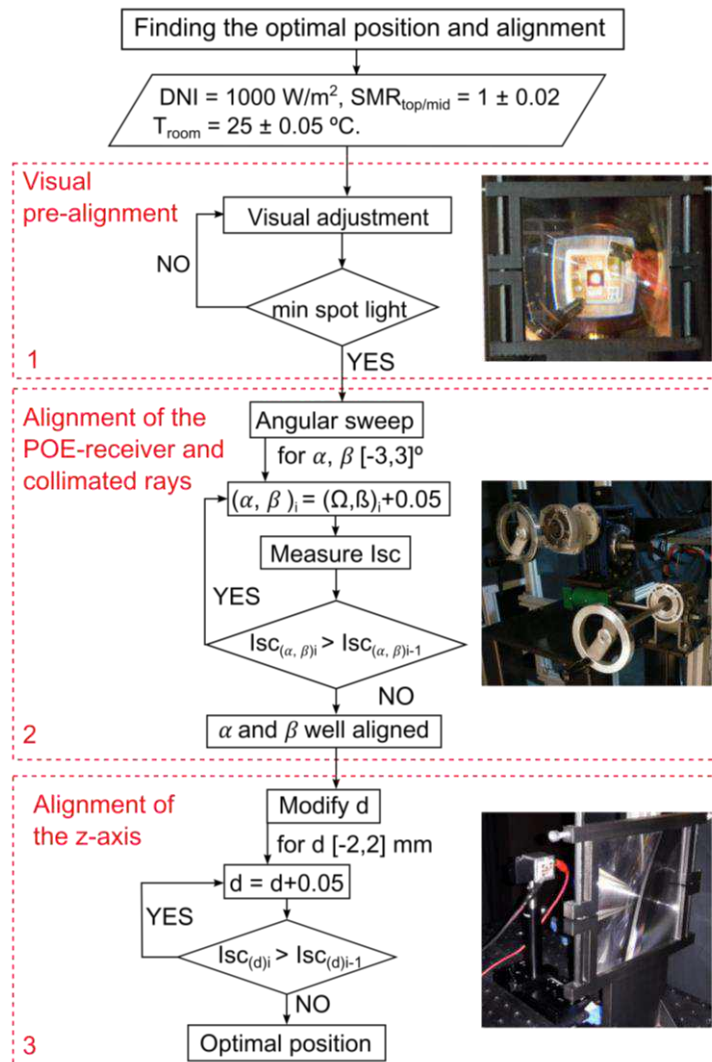


Figure 4. Flux diagram of the experimental procedure to align the CPV systems and to find the optimal position between the POE and the receiver: 1) Visual pre-alignment, 2) Alignment of the POE-receiver

and collimated rays and 3) Alignment of the z-axis (d : distance of the receiver along the z-axis, α : Rotation angle with respect to the y-axis, β : Rotation angle with respect to the x-axis and i : number of iteration).

Once the boundary conditions above have been fixed, different shading patterns have been produced on the POE of the CPV units, see Figure 5. These patterns are analogous to the previously considered by the authors to investigate the impact of shading on CPV modules and receivers in outdoors, which are representative of real shadows [146, 160]. The shading conditions have been produced by placing opaque cards on the Fresnel lens surface. The shading conditions on the POE surface is characterized by using a shading factor (S), defined as the ratio between the shaded and total area of the lens. For each CPV unit, the shaded surface is varied from 0 to 80 % in the vertical direction while the IV characteristics of the cells and the light patterns on the diffuser are recorded.

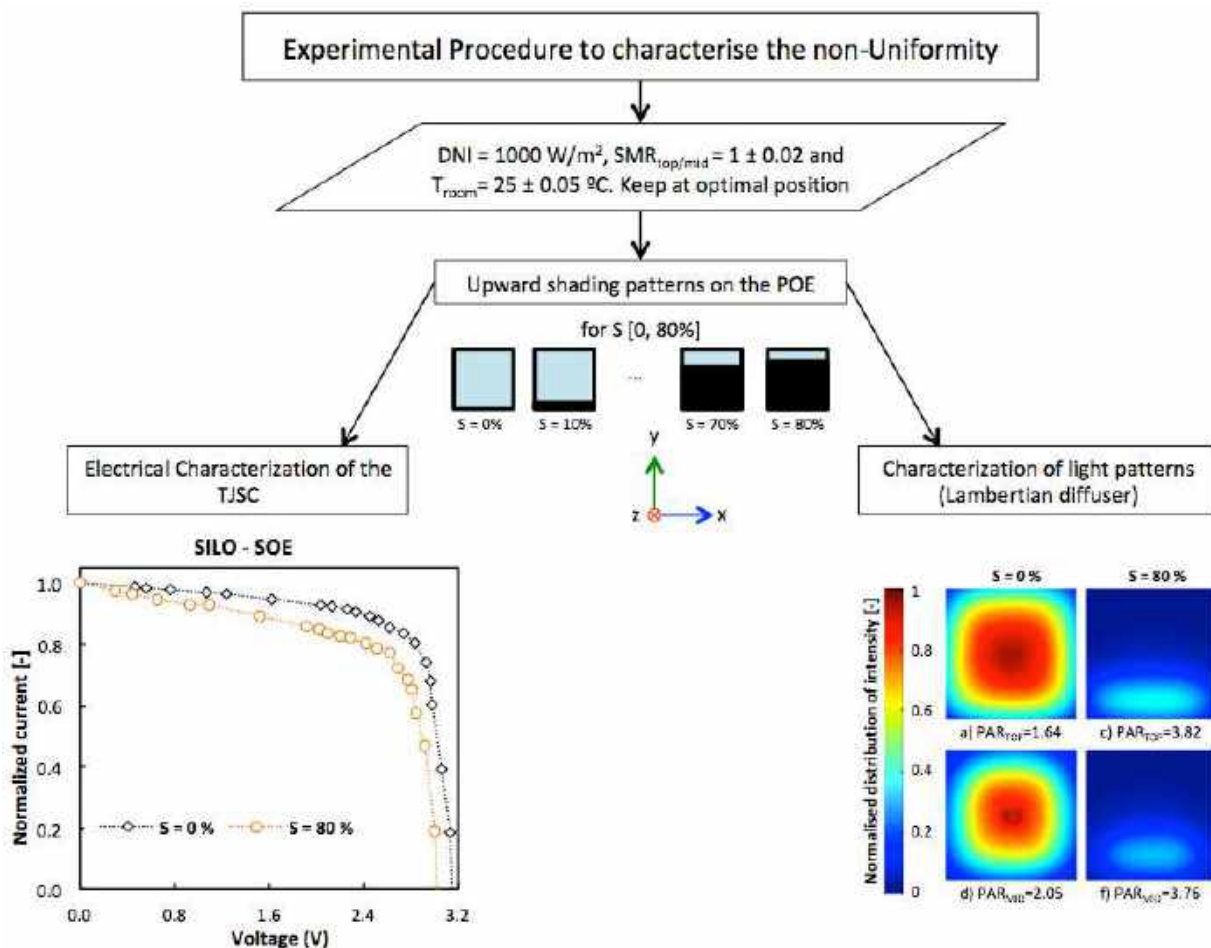


Figure 5. Flux diagram of the experimental procedure to characterise the non-uniformity of a CPV receiver applying shading patterns to the POE.

2.2.3. Indexes to characterize the non-uniformity

As commented, the illumination profiles are measured by using a CCD camera. This camera has been tuned, making use of the two band-pass colour filters, to have a similar spectral behaviour to the top and middle subcells, further details can be found in [32]. The irradiance profiles over each junction are characterized through the peak-to-average (PAR) and spectral uniformity ratio (SUR) metrics. The PAR can be defined as [26]:

$$PAR_i = \frac{Irradiance_{i,peak}^{CCD}(x,y)}{Irradiance_{i,avg}^{CCD}(x,y)} \quad (12)$$

where the i-subscript refers to the junction considered, top or middle. The PAR provides a simple measure of the peak-to-average irradiance across the X-Y surface of the cell. The PAR is inversely related to the spatial uniformity. This way, the higher the PAR the poorer the spatial uniformity. This index provides useful information related to the distribution of the concentrated sunlight. However, it does not give information concerning its spectral distribution. This is quantified by means of the SUR index, which has been recently introduced by the authors [32], as follows:

$$SUR = 1 + \frac{SMR_{top/mid,max}^{CCD}(x,y) - SMR_{top/mid,min}^{CCD}(x,y)}{SMR_{top/mid,avg}^{CCD}(x,y)} \quad (13)$$

The SUR is function of the $SMR_{top/mid}$ values obtained with the CCD camera, which can be defined as [43]:

$$SMR_{top/mid}^{c.c.} = \frac{top-subcell\ effective\ irradiance}{mid-subcell\ effective\ irradiance} = \frac{I_{sc,top}^{c.c.}}{I_{sc,top}^{CTSC}} / \frac{I_{sc,mid}^{c.c.}}{I_{sc,mid}^{CTSC}} \quad (14)$$

In this sense, the SUR can be understood in a similar way to the PAR, i.e., the higher the SUR the poorer the spectral uniformity. The SUR index allows the impact of the spectral non-uniformity produced by CPV optics to be investigated beyond the state-of-the-art studies.

3. Experimental results

3.1. Impact on the irradiance and spectral non-uniformity

Figure 6 shows the results of the spatial and spectral light distribution produced by the POE Fresnel lens under different shading conditions for the three CPV units. The left side shows some examples of the patterns photographed by the CCD camera for S values of 0%, 40% and 80%, while the right side shows the experimental results of the PAR_{Top} , PAR_{Mid} and SUR indexes for S values ranging from 0% to 80%.

As can be seen in Figure 6-left, the CPV units with SOEs present a better uniformity than the unit without SOE. Overall, it could be also concluded that the irradiance profiles tend to be less uniform as the shading factor is increased for both subcells. However, the location of the peak of irradiance on each subcell is different for the No-SOE and SOE units. Regarding No-SOE, it has been found that the peak of irradiance of the top and middle subcells shows an opposite tendency. The peak on the top subcell slightly moves downward, and in the opposite direction of the shading, while the middle one slightly moves upward. This can be understood considering the chromatic aberration of the PMMA Fresnel lens caused by the dependency of the refractive index with wavelength. In this sense, the shorter wavelengths tend to focus before the TJSC, while the longer ones focus after it [32, 28]. As a consequence, the shorter wavelengths mainly fall on the opposite side of TJSC to the side of the POE, while the longer ones mainly fall on the same side. Hence, shading reduces the irradiance on the opposite side of the top subcell in a greater extent, and in a lesser extent on the same side of the middle subcell. On the other hand, the peak of irradiance for the SOE CPV units shows a clear downward shift with shading for both subcells. This can be explained considering the SOEs geometrical characteristics and optical properties. Regarding the RTP, the majority of the rays are redirected towards the TJCS after one internal reflection. In addition, these fall on the same side than the face of the pyramid at which they are reflected to reduce the optical path and maximize the optical efficiency. So, they are mainly located on the opposite side of the cell to the side of the Fresnel POE. Hence, the peak of the irradiance moves downward and in the opposite direction to the shading. With regards to the SILO-Pyramid, it is designed to focus the rays coming from the last ring of the POE on the edge of the opposite side of the TJSC. Hence, as in the previous case, the shading mainly reduces the irradiance on the opposite side of the cell to the POE shading side. Hence, the illumination profiles also show a downwards shift and in the opposite direction to the shading.

As commented, Figure 6-right shows the experimental results of the PAR_{Top} , PAR_{Mid} and SUR metrics for shading factors ranging from 0% (no shading) to 80%. These values are in agreement with those commented above and indicate a clear better uniformity for the CPV units equipped with SOEs. The PAR values for the No-SOE unit tend to grow up to $S \approx 50\%$, with a value ranging from 3.2 ($S = 0\%$) to 3.4 for the top subcell, and from 3.4 ($S = 0\%$), to 3.6 for the middle subcell. Above $S \approx 50\%$, the PAR slightly decreases for both subcells. As shown, the PAR_{Top} reaches a value of 3.3 and the PAR_{Mid} of 3.2, both at an S value of 80%. This can be explained considering the effect of the chromatic aberration and the shading direction previously commented. Up to $S \approx 50\%$, the intensity of the peak of irradiance for each subcell is enhanced (PARs increases) due to the spectral shift discussed above. However, for $S > 50\%$, the opaque mask on the POE surface starts reducing the contribution of the light intensity coming from both the upper and lower sides around the optical axis of the Fresnel lens. As consequence, the irradiance profiles are slightly improved (PARs decreases) since the strong peak produced by the shift of the shorter and longer wavelengths is partially attenuated. Regarding the RTP, it can be concluded that it yields the best results, the PAR_{Top} ranges from 1.5 to 2.3 at $S = 0\%$ and $S = 60\%$, respectively. Above this S value, the PAR_{Top} is reduced up to 1.8 ($S = 80\%$) probably due to the same phenomenon above. On the other hand, the PAR_{Mid} does not show this changing tendency and increases from 1.9 ($S = 0\%$) to 3.1 ($S = 80\%$). With regards to the SILO-Pyramid, it also shows a worse uniformity with shading for both subcells, but remarkable better results than the No-SOE case. In this case, the PAR_{Top} ranges from a value of 1.6 ($S = 0\%$) to 3.8 ($S = 80\%$), and the PAR_{Mid} ranges from 2.1 ($S = 0\%$) to 3.8 ($S = 80\%$).

Finally, with regards to the spectral distribution of the irradiance, it can be also concluded that it shows poorer results as the shading is increased. Moreover, the No-SOE case shows once again the worst results with a SUR ranging from 1.3 ($S = 0\%$) to 3.5 ($S = 80\%$). On the other hand, the RTP presents values ranging from 1.3 ($S = 0\%$) to 4.1 ($S = 80\%$). It is true that this unit shows a similar SUR at $S = 0\%$ and a slightly higher value at $S = 80\%$ than the No-SOE case; however, it presents a lower SUR for the rest of shading conditions and a noteworthy stable behaviour up to $S = 50\%$. The SILO-Pyramid yields the best results with SUR values ranging from 1.5 ($S = 0\%$) to 2.6 ($S = 80\%$). The worse spectral uniformity with shading can be explained considering the spectral shift produced by shading commented above. Hence, it can be concluded that shading does not only contribute to reduce the spatial uniformity, but also to introduce additional spectral phenomena on multi-junction solar cells.

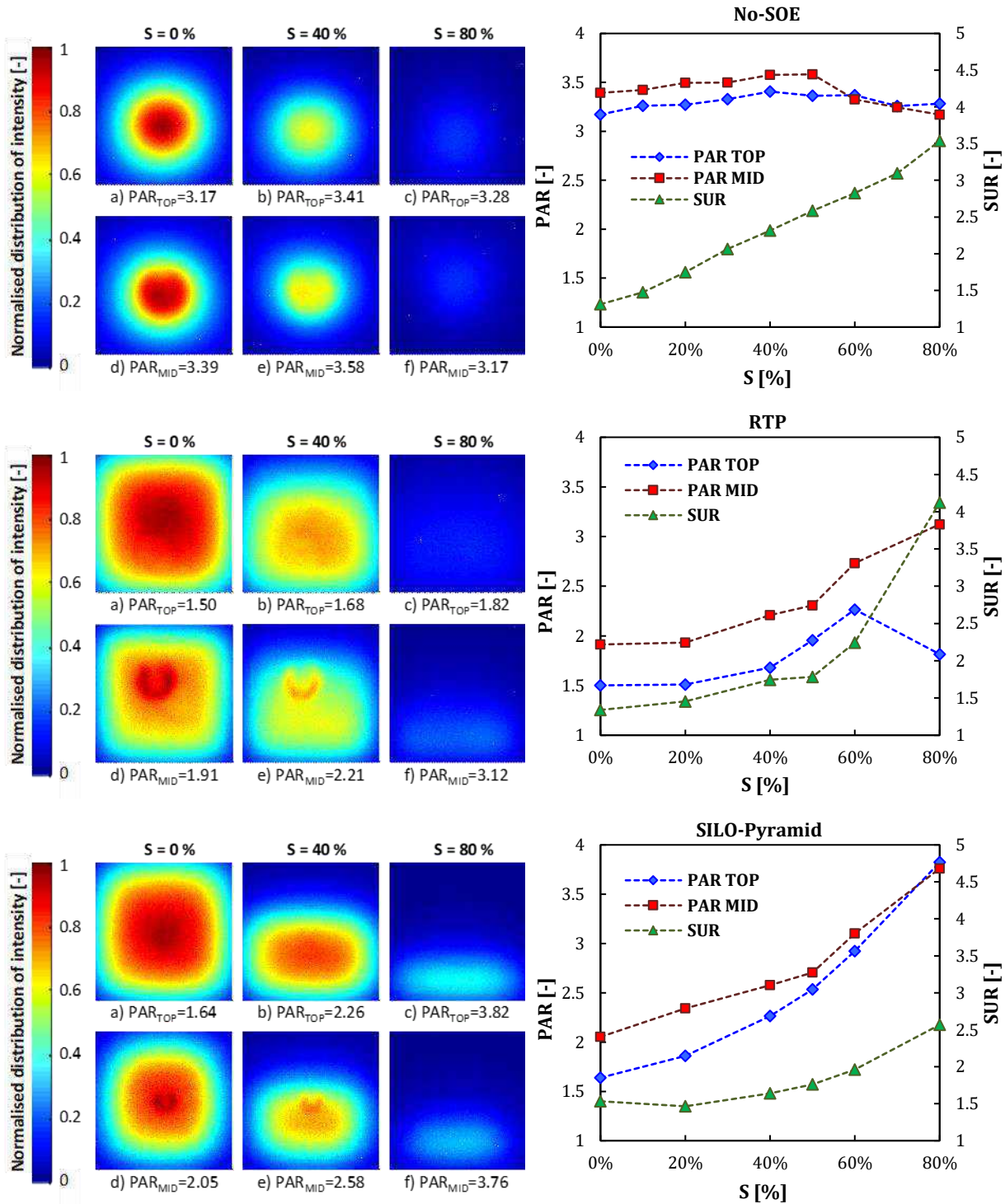


Figure 6. Characterization of the light distribution produced by the POE Fresnel lens as a function of the shading factor for the No-SOE (top), RTP (middle) and SILO-Pyramid (bottom) CPV single-units. Left: Example of photos recorded by the CCD camera for the top and middle subcells for a shading factor of 0%, 40% and 80% (note that the intensity is normalized to 1 for a better readability). Right: experimental results of the PAR_{Top}, PAR_{Mid} and SUR indexes as a function of the shading factor.

3.2. Impact on the electrical parameters

This sub-section aims to investigate the evolution of the main electrical parameters with shading for the three CPV unit configurations. Special attention is given to the P_{mpp} since it can be considered the most relevant parameter as it is the responsible of the efficiency and the energy harvested under actual operating conditions. Figure 7 shows the experimental results of this variable for S values ranging from 0% to 80%. In addition, the results obtained for the I_{sc} , V_{oc} and FF have also been included to better understand the performance.

Regarding the No-SOE case, it can be seen that the P_{mpp} decreases linearly with shading, with a maximum reduction of 86.3% at $S = 80\%$. In addition, it has also been found that it decreases almost equal than the I_{sc} up to a $S = 30\%$. This means that the P_{mpp} losses produced by shading up to this value are mainly due to the irradiance reduction and the possible current-mismatching effects, which are known to affect the I_{sc} in a larger extent. For $S > 30\%$, the decrease of the P_{mpp} is higher than that of the I_{sc} , with a maximum difference of 2.7% at $S = 80\%$. This higher reduction can be explained considering the remarkable increase of the non-uniformities, especially the spectral non-uniformity, which are quantified through the SUR index, see also Figure 6. The increase of the SUR has previously demonstrated to reduce the FF of multi-junction solar cells [32]. This is in agreement with the results shown in Figure 7. As can be seen, the FF is significantly reduced for $S > 30\%$ and shows a maximum reduction of 12.6% at $S = 80\%$.

With regards to the RTP unit, the P_{mpp} also decreases linearly with shading, with a maximum reduction of 83.2% at $S = 80\%$. In this case, the P_{mpp} and I_{sc} losses are almost equal for all the shading conditions. Regarding the I_{sc} , it is reduced in a lesser extent than for the No-SOE case, e.g. a maximum improvement of around 6% at 50%. This contributes to reduce the overall P_{mpp} shading losses as more current, and therefore more power, is being produced by the cell. On the other hand, the similar tendency of both magnitudes with shading is probably due to the significant improvement of the spatial uniformity, see Figure 6, which contributes to reduce the FF losses. Indeed, the FF is improved with the shading factor. These can be understood considering the relationship of this magnitude with the rest of the electrical parameters:

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (7)$$

As commented, the relation between the P_{mpp} and I_{sc} keeps almost constant under the different shading factors. In addition to this, the V_{oc} slightly decreases with irradiance due to the strong reduction of the effective concentration, which is the main driver of V_{oc} [47, 48]. This effect has been observed in the three CPV units with a maximum reduction of around 4% at $S = 80\%$ for all the cases. Due to this, the denominator of equation (7) tends to diminish in a smaller amount than the numerator. Hence, the normalized FF tends to be higher than one under shading conditions.

Finally, the SILO-Pyramid also shows a linear decrease of the P_{mpp} with shading. In this case, the maximum losses are equal to 81.6% at $S = 80\%$. As can be also seen, the P_{mpp} and I_{sc} reduction is approximately the same up to $S = 50\%$. This also explains why the FF is higher than one up to this shading condition. For $S > 50\%$, the FF is reduced, and therefore the P_{mpp} decreases in a higher amount than the I_{sc} . This reduction of the FF is probably due to the strong increase of the spatial non-uniformities in both subcells, see Figure 6.

The results of this work indicate that the SILO-Pyramid shows the best results under shading conditions. It shows average losses around 1.8% lower than the RTP unit and around 7.1% lower than the NO-SOE unit. This also seems to suggest that the non-uniformity spectral effects play the most relevant role under shading conditions. This can be concluded due to the fact that the spatial uniformity is better for the RTP while the spectral uniformity is better for the SILO-Pyramid, see also Figure 6. The results also confirm that the use of SOEs significantly diminish the losses produced by shading.

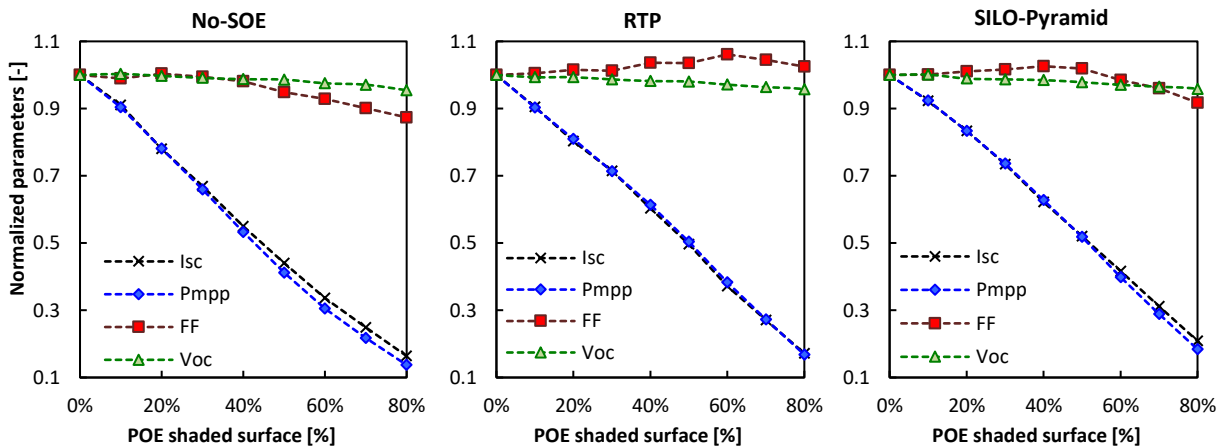


Figure 7. Experimental results of the maximum power (P_{mpp}), short-circuit current (I_{sc}), open-circuit voltage (V_{oc}) and fill factor (FF) as a function of the percentage of shaded surface of the POE for the

three CPV units. Note: the values are normalized to the IV parameters at CSTC shown in Table 3 for a better readability.

4. Conclusions

This paper is focused on the investigation of the non-uniformities produced by the presence of shading on the primary optical element (POE) of concentrator photovoltaic systems (CPV). An avant-garde methodology based on a novel experimental set-up and new metrics, such as the spectral uniformity ratio (SUR) recently introduced by the authors, has been used to conduct a state-of-the-art study concerning the effects of shading on the performance of multi-junction (MJ) solar cells. To achieve this goal, three different CPV single-units with a concentration of $\approx 559\times$ made up of PMMA Fresnel lens as POE and of standard GaInP/GaInAs/Ge MJ cells, have been considered. In addition, a Single-Lens-Optical element (SILO-Pyramid) and a refractive truncated pyramid (RTP) have been considered as secondary optical elements (SOEs). A No-SOE case has been also taken into account for comparison purposes and for investigating the advantages of using homogenizers.

The results confirm the benefits of using SOEs to reduce the non-uniformities produced by shading. For instance, the peak-to-average ratio (PAR) values for the No-SOE case tends to grow with the shading factor (S), and achieve values of 3.4 and 3.6 for the top and middle subcells, respectively, at $S \approx 50\%$. On the other hand, the RTP provides the best results with a PAR_{Top} ranging from 1.5 ($S = 0\%$) to 2.3 ($S = 60\%$), and a PAR_{Mid} ranging from 1.9 ($S = 0\%$) to 3.1 ($S = 80\%$). The SILO-Pyramid also shows a noticeable better performance than the No-SOE case, with a PAR_{Top} ranging from a value of 1.6 ($S = 0\%$) to 3.8 (80%), and a PAR_{Mid} ranging from 2.1 ($S = 0\%$) to 3.8 ($S = 80\%$). Regarding the spectral non-uniformity, it can also be concluded that it gets worse with shading. However, as in the previous case, the SOE units significantly contribute to reduce this effect. The No-SOE case shows a clear linear increase of the SUR with shading with a value ranging from 1.3 (0%) to 3.5 ($S = 80\%$). On the other hand, the RTP presents a more stable behaviour with a SUR ranging from 1.3 ($S = 0\%$) to 2.3 ($S = 80\%$), while the SILO-Pyramid provides the best results with a SUR ranging from 1.5 ($S = 0\%$) to 2.6 ($S = 80\%$).

Regarding the electrical impact, it can be concluded that the maximum power of the MJ cells decreases linearly with shading. In addition, shading produces additional losses on the power due to non-uniformity phenomena. As expected, the use of SOEs has been contributed to reduce these losses. The

No-SOE single-unit shows a maximum power reduction of 86.3% at $S = 80\%$. On the other hand, the RTP and SILO-Pyramid present a maximum reduction, respectively, of 83.2% and 81.6% at $S = 80\%$. The SILO-Pyramid gives the best results since it provides the best spectral uniformity. It can also be concluded that the non-uniform spectral effects are the main responsible of the additional losses produced by shading.

Future work will focus on the investigation of other optical configuration based on different type of POEs and SOEs, e.g. materials and geometries. Also, MJ cells made up of more layers, e.g. 4-junction and 5-junctions, are planned to be investigated as they are expected to be more affected by the spectral effects.

CRedit authorship contribution statement

Jose M. Saura: Validation, Investigation. **Daniel Chemisana:** Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing, Supervision. **Pedro M. Rodrigo:** Methodology, Software, Writing – review & editing. **Florencia M. Almonacid:** Writing – review & editing, Supervision, Funding acquisition. **Eduardo F. Fernández:** Conceptualization, Methodology, Writing – original draft, Project administration, Funding acquisition.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

This work has been partially funded by the project “UltraMicroCPV” (MICINN- Agencia Estatal de Investigación: PID2019-106497RB-I00/ AEI/10.13039/501100011033) and by the project NACe-CPV/TE (Junta de Andalucía, PAIDI 2020: P18-RT-1595). P. M. Rodrigo thanks the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities because of the 2020–2024 Beatriz Galindo fellowship (BEAGAL18/00164) and, the Science and Technology National Council of Mexico (CONACYT) because of his designation as a member of the Mexican System of Researchers. E.F. Fernández thanks the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities for the funds received under the Ramón y Cajal programme (RYC-2017-21910). D. Chemisana thanks ICREA for the ICREA Acadèmia.

References

- [1] E. Fernández, F. Almonacid, P. M. Rodrigo and P. J. Pérez-Higueras, “CPV systems, in: , 2018: pp.,” in *McEvoy’s Handb. Photovoltaics Fundam. Appl.*, Elsevier, 2018, p. 931–985.
- [2] D. Talavera, J. Ferrer-Rodríguez, P. Pérez-Higueras, J. Terrados and E. Fernández, “A worldwide assessment of levelised cost of electricity of HCPV systems,” *Energy Conversion and Management*, vol. 127, pp. 679-692, 2016.
- [3] D. L. Talavera, P. J. Perez-Higueras, F. Almonacid and E. F. Fernández, “A worldwide assessment of economic feasibility of HCPV power plants: Profitability and competitiveness,” *Energy*, vol. 119, p. 408–424, 2017.
- [4] H. G. Kamath, N. J. Ekins-Daukes, K. Araki and S. K. Ramasesha, “The potential for concentrator photovoltaics: A feasibility study in India,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 27, p. 316–327, 2019.
- [5] H. Cotal, C. Fetzer, J. Boisvert, G. Kinsey, R. King, P. Hebert, H. Yoon and N. Karam, “III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics,” *Energy and Environmental Science*, vol. 2, no. 2, pp. 174-192, 2009.
- [6] K. Shanks, N. Sarmah, J. Ferrer-Rodríguez, S. Senthilarasu, K. Reddy, E. Fernández and T. Mallick, “Theoretical investigation considering manufacturing errors of a high concentrating photovoltaic of cassegrain design and its experimental validation,” *Solar Energy*, vol. 131, pp. 235-245, 2016.
- [7] W. T. Xie, Y. Dai, R. Wang and K. Sumathy, “Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 6, pp. 2588-2606, 2011.
- [8] M. Victoria, C. Domínguez, I. Antón and G. Sala, “Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses,” *Optics Express*, vol. 17, no. 9, pp. 6487-6492, 2009.
- [9] L. Micheli, E. F. Fernández, F. Almonacid, T. K. Mallick and G. P. Smestad, “Performance, limits and economic perspectives for passive cooling of High Concentrator Photovoltaics,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 153, p. 164–178, 2016.
- [10] P. Rodrigo, E. Fernández, F. Almonacid and P. Pérez-Higueras, “Review of methods for the calculation of cell temperature in high concentration photovoltaic modules for electrical characterization,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , vol. 38, pp. 478-488, 2014.

- [11] P. Rodrigo, “Balancing the shading impact in utility-scale dual-axis tracking concentrator photovoltaic power plants,” *Energy*, vol. 210, no. 118490, 2020.
- [12] Y. Kim, “Modeling of high-concentrator photovoltaic systems for utility-scale applications,” *Green Energy and Technology*, vol. 190, pp. 153-175, 2015.
- [13] P. Rodrigo, R. Velázquez, E. Fernández, F. Almonacid and P. Pérez-Higueras, “Analysis of electrical mismatches in high-concentrator photovoltaic power plants with distributed inverter configurations,” *Energy*, vol. 107, pp. 374-387, 2016.
- [14] W. Guter and A. W. Bett, “I-V characterization of tunnel diodes and multijunction solar cells,” *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 53, no. 9, pp. 2216-2222, 2006.
- [15] A. Braun, B. Hirsch, E. A. Katz, J. M. Gordon, W. Guter and A. W. Bett, “Localized irradiation effects on tunnel diode transitions in multi-junction concentrator solar cells,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, pp. 1692-1695, 2009.
- [16] L. W. James, “Effects of concentrator chromatic aberration on multi-junction cells,” in *Proc. 1994 IEEE 1st World Conf. Photovolt. Energy Convers. (WCPEC)*, Hawaii, 1994.
- [17] H. Baig, K. C. Heasman and T. K. Mallick, “Non-uniform Illumination in Concentrating Solar Cells,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 5890-5909, 2012.
- [18] R. Winston, J. C. Miñano and P. Benítez, “Nonimaging Optics,” in *13 - Applications to solar energy*, Nonimaging Opt., Academic Press, Burlington., 2005, p. 317–394.
- [19] S. R. Kurtz and M. J. O'Neill, “Estimating and controlling chromatic aberration losses for two-junction, two-terminal devices in refractive concentrator systems,” in *Conf. Rec. 25th IEEE PVSC Photovolt. Spec. Conf*, Washington, D.C., 1996.
- [20] K. Araki, M. Kondo, H. Uozumi and M. Yamaguchi, “Experimental proof and theoretical analysis on effectiveness of passive homogenizers to 3J concentrator solar cells.,” in *3rd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan, 2003.
- [21] K. Nishioka, T. Takamoto, W. Nakajima, T. Agui, M. Kaneiwa, Y. Uraoka and T. Fuyuki, “Analysis of triple-junction solar cell under concentration by SPICE,” in *3rd World Conf. On Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proc vol. 1, 2003*, 2003.
- [22] J. M. Olson, “Simulation of nonuniform irradiance in multijunction III-V solar cells,” in *35th IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, 2010.
- [23] J. F. Wheeldon, C. E. Valdivia, A. Walker, G. Kolhatkar, D. Masson, B. Riel, S. Fafard, A. Jaouad, A. Turala, R. Arès, V. Aimez, T. J. Hall and K. Hinzer, “GaAs, AlGaAs and InGaP

Tunnel Junctions for Multi-Junction Solar Cells Under Concentration: Resistance Study,” in *6th International Conference on Concentrating Photovoltaics Systems (CPV-6)*, 2010.

- [24] I. García, P. Espinet-González, I. Rey-Stolle and C. Algora, “Analysis of Chromatic Aberration Effects in Triple-Junction Solar Cells Using Advanced Distributed Models,” *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*, vol. 1, no. 2, pp. 219-224, 2011.
- [25] P. Espinet-González, I. Rey-Stolle, C. Algora and I. García, “Analysis of the behavior of multijunction solar cells under high irradiance Gaussian light profiles showing chromatic aberration with emphasis on tunnel junction performance,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, pp. 743-753, 2015.
- [26] R. Herrero, M. Victoria, C. Domínguez, S. Askins, I. Antón and G. Sala, “Concentration photovoltaic optical system irradiance distribution measurements and its effect on multi-junction solar cells,” *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, vol. 20, pp. 423-430, 2012.
- [27] E. A. Katz, J. M. Gordon and D. Feuermann, “Effects of ultra-high flux and intensity distribution in multi-junction solar cells,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 14, pp. 297-303, 2006.
- [28] M. Victoria, R. Herrero, C. Domínguez, I. Antón, S. Askins and G. Sala, “Characterization of the spatial distribution of irradiance and spectrum in concentrating photovoltaic systems and their effect on multi-junction solar cells,” *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, vol. 21, p. 308–318, 2013.
- [29] N. Hayashi, D. Inoue, M. Matsumoto, A. Matsushita, H. Higuchi, Y. Aya and T. Nakagawa, “High-efficiency thin and compact concentrator photovoltaics with micro-solar cells directly attached to a lens array,” *Optic Express*, vol. 23, no. 11, pp. 594-603, 2015.
- [30] P. Rodrigo, E. F. Fernández, F. Almonacid and P. J. Pérez-Higueras, “Outdoor measurement of high concentration photovoltaic receivers operating with partial shading on the primary optics,” *Energy*, vol. 61, pp. 583-588, 2013.
- [31] L. A. A. Bunthof, S. Veelenturf, E. J. Haverkamp, W. H. M. Corbeek, D. van der Woude, G. J. Bauhuis, P. Mulder, E. Vlieg and J. J. Schermer, “Partially shaded III-V concentrator solar cell performance,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 179, pp. 231-240, 2018.
- [32] J. M. Saura, P. M. Rodrigo, F. M. Almonacid, D. Chemisana and E. F. Fernández, “Experimental Characterisation of irradiance and spectral non-uniformity and its impact on multi-junction solar cells: reflective vs refractive optics,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 225, p. 111061, 2021.

- [33] J. Ferrer-Rodríguez, H. Baig, E. Fernández, F. Almonacid, T. Mallick and P. Pérez-Higueras, “Optical modeling of four Fresnel-based high-CPV units,” *Solar Energy*, vol. 155, p. 805–815, 2017.
- [34] J. Ferrer-Rodríguez, E. Fernández, H. Baig, F. Almonacid, T. Mallick and P. Pérez-Higueras, “Development, indoor characterisation and comparison to optical modelling of four Fresnel-based high-CPV units equipped with refractive secondary optics,” *Solar Energy Materials and Solar Cells (SOLMAT)*, no. 186, pp. 273-283, 2018.
- [35] “Standard IEC 62670-1. Concentrator Photovoltaic (CPV) - performance testing Part 1: standard conditions.,” 2013.
- [36] P. Pérez-Higueras, J. Ferrer-Rodríguez, F. Almonacid and E. Fernández, “Efficiency and acceptance angle of High Concentrator Photovoltaic modules: Current status and indoor measurements,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 143-153, 2018.
- [37] J. M. Saura, E. F. Fernández, F. Almonacid and D. Chemisana, “Characterisation and impact of non-uniformity on multi-junction solar cells (MJSC) caused by concentrator optics,” *15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-15)*, vol. 2149, no. 020004, pp. 1-6, August 2019.
- [38] J. P. Ferrer-Rodríguez, J. M. Saura, E. F. Fernández, F. Almonacid, D. L. Talavera and P. Pérez-Higueras, “Exploring ultra-high concentrator photovoltaic Cassegrain-Koehler-based designs up to 6000x,” *Optics Express*, vol. 28, no. 5, pp. 6609-6617, 2020.
- [39] C. Domínguez, I. Antón and G. Sala, “Solar simulator for concentrator photovoltaic systems,” *Optics Express*, vol. 16, no. 19, p. 14894–14901, 2008.
- [40] “Solar Added Value S.L.,” [Online]. Available: <http://solaraddedvalue.com/en/category/productos/helios-3198/>.
- [41] E. Fernández, J. Ferrer-Rodríguez, F. Almonacid and P. Pérez-Higueras, “Current-voltage dynamics of multi-junction CPV modules under different irradiance levels,” *Solar Energy*, vol. 155, p. 39–50, 2017.
- [42] ASTM-International, “ASTM G173-03,” 2012. [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/G173.htm>.
- [43] C. Domínguez, I. Antón, G. Sala and S. Askins, “Current-matching estimation for multijunction cells within a CPV module by means of component cells,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, no. 7, p. 1478–1488, 2013.

- [44] D. Chemisana, A. Vossier, L. Pujol, A. Perona and A. Dollet, “Characterization of Fresnel lens optical performances using an opal diffuse,” *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 1, pp. 658-663, 2011.
- [45] M. Theristis, E. F. Fernández, G. E. Georghiou and T. S. O'Donovan, “Performance of a concentrating photovoltaic monomodule under real operating conditions: Part I – Outdoor characterisation,” *Energy Conversion and Management*, vol. 154, p. 311–321, 2017.
- [46] M. Theristis, E. F. Fernández, G. E. Georghiou and T. S. O'Donovan, “Performance of a concentrating photovoltaic monomodule under real operating conditions: Part II – Power rating,” *Energy Conversion and Management*, vol. 156, p. 329–336, 2018.
- [47] P. Rodrigo, S. Gutiérrez, R. Velázquez, E. F. Fernández, F. Almonacid and P. J. Pérez-Higueras, “A methodology for the electrical characterization of shaded high concentrator photovoltaic modules,” *Energy*, vol. 89, pp. 768-777, 2015.
- [48] E. Fernandez, N. Seoane, F. Almonacid and A. Garcia-Loureiro, “Vertical-tunnel-junction (VTJ) solar cell for ultra-high light concentrations (>2000 Suns),” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 40, no. 1, p. 8528429, 2019.
- [49] E. Fernández, F. Almonacid and A. Garcia-Loureiro, “Multi-junction solar cells electrical characterization by neuronal networks under different irradiance, spectrum and cell temperature,” *Energy*, vol. 90, pp. 846-856, 2015.

Capítulo 5: Diseño, modelado óptico, fabricación y caracterización experimental de concentradores a UHCPV

1. Introducción

Con el objetivo reducir el LCOE en la tecnología CPV se apostó por aumentar la concentración a la que operan los módulos y, de este modo, reducir la proporción del coste del material semiconductor respecto al coste total del sistema. En este capítulo se diseñó un concentrador reflexivo basado en el diseño Cassegrain-Koehler que logra concentrar los rayos desde cuatro unidades ópticas simétricas e independientes sobre una única célula solar. Estos diseños son óptimos para cumplir estos objetivos debido a su compacidad y acromatismo.

Este capítulo engloba dos enfoques principales: por un lado, el análisis teórico basado en el desarrollo en un modelo óptico por trazado de rayos que permitirá evaluar el rendimiento de diferentes diseños ópticos y por otro la fabricación y caracterización experimental del diseño elegido.

1.1. Modelo óptico: propiedades físicas

El modelo óptico se desarrolló a partir del software TracePro®, esta herramienta fue muy útil para analizar teóricamente el rendimiento del sistema óptico a la hora de concentrar los rayos sobre el receptor CPV y finalmente ser capaces de elegir el diseño adecuado para ser construido.

En primer lugar, se realizaron simulaciones preliminares para analizar y comparar diferentes configuraciones geométricas en función de la relación de aspecto del primario o f - $number_{POE}$. Estas simulaciones se llevaron a cabo asumiendo algunas aproximaciones y utilizando materiales de alta calidad óptica. En consecuencia, el modelo óptico tuvo en cuenta parámetros físicos como la distribución angular de los rayos del sol, el espectro terrestre estándar de referencia a 1000 W/m^2 , así como las propiedades ópticas dependientes de la longitud de onda que afecta a los diferentes elementos ópticos: 1) La refracción de la luz, implementada a través de los índices de refracción de los elementos dieléctricos. Entre ellos se encuentran el encapsulado diseñado para ser construido en sílice fundida y el Elemento Óptico Terciario (TOE) en vidrio Schott N-BK7. 2) La absorción de la luz, implementada mediante la ley de Beer-Lambert, tenida en cuenta a través de los coeficientes de absorción. 3) La transmitancia de las capas anti-reflexivas (ARC), para los elementos dieléctricos (el encapsulado y el TOE) se supuso del 98 %. 4) La reflectividad de los espejos POEs y SOEs se aproximó un valor del 98 %. 5) La dispersión se tuvo en cuenta a través del modelo de ABg utilizado para modelar la rugosidad de las superficies isotrópicas. 6) El receptor fue considerado un absorbedor ideal.

Con objeto de mejorar la precisión de la simulación óptica y hacer una comparación más apropiada de esta con el análisis experimental se decidió a modificar algunos parámetros del modelo óptico de tal manera que fuesen similares a un prototipo que se pudiera fabricar. Por ello se realizaron simulaciones más realistas con materiales más económicos como el aluminio para los POEs y SOEs, y PMMA para el encapsulado y el TOE. Entre los parámetros modificados del modelo óptico que conforman la simulación más realista destacan: 1) El uso de PMMA como material dieléctrico obliga a modificar los índices de refracción y por consiguiente el coeficiente de absorción también fue actualizado para este material. 2) La reflectividad de los espejos dependiente de la longitud de onda fue caracterizada mediante un espectrofotómetro *Cary 4000 UV-Vis* en el CICT (Universidad de Jaén). 3) El receptor deja de ser un absorbedor perfecto, y se consideran los valores de la respuesta espectral de cada subcélula (*top*, *middle* y *bottom*).

2. Resultados y contribución al estado del arte

2.1. Análisis teórico: análisis paramétrico y resultados de las simulaciones

El diseño desarrollado es modulable y escalable a diferentes ratios de concentración geométrica (2001x, 3015x, 4003x, 5028x y 6057x) modificando el tamaño y la distancia focal de los espejos primarios. Se compararon los diferentes diseños mediante un análisis paramétrico para analizar el impacto que tiene la relación de aspecto del diseño en el rendimiento óptico. Este análisis sigue dos estrategias principales: 1) Mantener constante la concentración geométrica y variar el $f\text{-number}_{POE}$ y 2) Mantener el $f\text{-number}_{POE}$ constante y modificar la concentración geométrica.

Los resultados mostraron que los diseños más compactos concentran los rayos de forma más eficiente. Esto es debido a que aumenta el tamaño aparente de la célula observado por el SOE y el camino óptico entre el SOE y la célula se reduce, aumentando la probabilidad de que los rayos impacten en la célula. Por otro lado, se observó que, para una relación de aspecto del POE determinada, el aumento en la C_g viene acompañado de un incremento en las dimensiones del POE y del SOE respecto a la célula (área fija). Esto generará rayos más anchos y una mayor dificultad para concentrarlos sobre el receptor, por tanto, la eficiencia óptica disminuye cuando se incrementa la concentración geométrica. Entre los resultados obtenidos sólo se consideraron aquellos diseños cuya eficiencia óptica fuera superior al 78% y conservase una aceptación angular (AA) superior a $\pm 0.30^\circ$.

2.2. Análisis experimental: fabricación y caracterización

Basándonos en los criterios y tendencias anteriormente mencionadas se eligió fabricar el

diseño del prototipo con una concentración geométrica de 3015x, una longitud de los espejos primarios de 151 mm de lado y un $f\text{-number}_{POE}$ de 0.63. Este diseño fue el resultado de un compromiso entre la máxima eficiencia óptica y la aceptación angular del concentrador obtenida en las simulaciones preliminares.

En el desarrollo del diseño mecánico de fabricación se empleó el método *poka-yoke*: cada elemento se ajusta en una sola orientación sin poderse realizar ningún ajuste. Se emplearon materiales económicos en su fabricación: PMMA para el encapsulado y el TOE; mientras que los espejos POE y SOE fueron fabricados en aluminio. A estos últimos se les aplicó un acabado superficial para mejorar la reflectividad en las superficies ópticas.

A continuación, el prototipo fabricado a UHCPV se caracterizó experimentalmente en el laboratorio del CEACTEMA usando el simulador solar *CPV Helios 3198*. Se realizó una caracterización eléctrica del prototipo bajo condiciones de prueba de referencia de concentradores (CSTC); $DNI = 1000W/m^2$, temperatura de ambiente = 25 °C y espectro de referencia AM1.5D. Además, se evaluó el impacto de la no-uniformidad sobre una MJSC en condiciones de UHCPV. Todos estos análisis favorecieron un mejor entendimiento del comportamiento del prototipo UHCPV y permitió predecir su comportamiento a sol real.

Entre los resultados de la caracterización eléctrica del prototipo destacan: una $AA \pm 0.30^\circ$, una concentración eficaz resultante de 938 soles y consecuentemente una eficiencia óptica del 31.1%. Cabe destacar la discrepancia con los resultados obtenidos en la simulación óptica con las aproximaciones realistas: $AA \pm 0.41^\circ$, una concentración eficaz resultante de 1753 soles y una eficiencia óptica de 58.1%.

El estudio de uniformidad producida en el prototipo UHCPV se llevó a cabo mediante la caracterización de los patrones de uniformidad formados a la salida del terciario (TOE). Los valores del PAR mostraron una uniformidad bastante considerable PAR_{top} de 2.2 y PAR_{mid} 2.3, teniendo en cuenta el nivel de concentración alcanzado (938 soles)

Esto se abordó con el montaje experimental desarrollado en el capítulo 3. Se ha de tener en cuenta que el efecto de la no-uniformidad en módulos se intensifica cuando se opera a UHCPV. Esto pone más relevancia todavía realizar un estudio sobre los patrones de iluminación generados sobre el receptor y de este modo tener un conocimiento más exhaustivo del comportamiento del dispositivo PV.

2.3. Comparación entre los resultados de las simulaciones y experimentales

Para dar respuesta a la discrepancia entre los resultados experimentales y las simulaciones ópticas se hicieron pruebas experimentales de reflectividad de las superficies ópticas y se

representó un diagrama de limitación de corrientes. De este modo se pudo comprender de forma más precisa la causa de esta baja eficiencia óptica, siendo los siguientes fenómenos los principales responsables: 1) la dispersión de la luz en superficies ópticas debido a las imperfecciones de las superficies; 2) el deficiente acoplamiento óptico entre célula y TOE; y 3) la limitación de corriente en el rango de la subcélula top debido a la elevada absorción en los espejos a bajas longitudes de onda.

Los resultados de la caracterización de los patrones de uniformidad aportaron resultados experimentales muy similares, $PAR_{top} = 2.2$ y $PAR_{mid} = 2.3$. Este parámetro junto a la similar distribución de la luz para ambas subcélulas demuestra el pequeño impacto de la aberración cromática. Finalmente, analizando esta similitud entre patrones y la curva de aceptación angular se puede concluir que tanto el diseño geométrico como la construcción del prototipo son correctos en términos de posición y alineamiento.

3. Publicación

- Juan P. Ferrer-Rodríguez, José M. Saura, Eduardo F. Fernández, Florencia Almonacid, Diego L. Talavera, and Pedro Pérez-Higueras. “Exploring ultra-high concentrator Photovoltaic Cassegrain-Koehler-based designs up to 6000x”. *Opt. Express* 28 (5), 6609–6617 (2020).

Exploring ultra-high concentrator photovoltaic Cassegrain-Koehler-based designs up to 6000×

JUAN P. FERRER-RODRÍGUEZ,¹ JOSÉ M. SAURA, EDUARDO F. FERNÁNDEZ,²
FLORENCIA ALMONACID, DIEGO L. TALAVERA, AND PEDRO PÉREZ-HIGUERAS

Centre for Advanced Studies on Energy and Environment (CEAEMA), Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas
s/n, Jaén 23071, Spain

¹jjferrer@ujaen.es

²eduardo.fernandez@ujaen.es

Abstract: Ultra-High Concentrator Photovoltaic (UHCPV) designs with up to more than 6000× geometrical concentration and optical efficiency of 80% are demonstrated in this paper by means of ray tracing simulations. These are developed based on Cassegrain-Koehler concentrators [Opt. Letters **41**, 1985 (2016)], with four pairs of paraboloid-hyperboloid mirrors and a central receiver composed of four Cartesian ovals of revolution. Designs at different geometrical concentrations are analyzed based on their aspect ratios (F-number). The most compact designs exhibit highest optical efficiencies. Moreover, a 3015× geometrical concentration one-cell prototype, made of aluminum and PMMA (poly(methyl methacrylate)), is fabricated and characterized indoors, achieving an effective concentration of 938 suns. This represents the CPV module with the highest geometrical concentration that has been experimentally investigated that could be found in the scientific literature.

© 2019 Optical Society of America under the terms of the [OSA Open Access Publishing Agreement](#)

1. Introduction

High Concentrator Photovoltaic (HCPV) modules are known to achieve the highest efficiency (43.4%) among all existing photovoltaic (PV) technologies [1]. They utilize small solar cells and concentrator optical systems to achieve effective concentrations, C_{eff} (also known as the average irradiance, which is the product of the optical efficiency with the geometrical concentration), which is greater than that of 300 suns [164]. To be competitive, the development of so-called ultra-high CPV systems with C_{eff} exceeding that of 1000 suns could prove to be a promising strategy due to the significant reduction in the amount of semiconductor materials that can be achieved [165]. Moreover, this motivates the use of novel ultra-efficient, albeit more expensive, concentrator cells [166, 167].

Few existing works have developed optical designs that achieve ultra-high (UH) concentrations [168]. Karp et al. designed a compact micro-optic waveguide to concentrate sunlight up to the intensity of around 2500 suns, assuming the optical efficiency, η_{opt} , to be greater than 80% [7]. Ghosal et al. announced a commercial module working at a concentration of around 950 suns [8]. Zamora et al. achieved the same results and presented experimental measurements of a Fresnel-Koehler concentrator working at the concentration of around 900 suns with $\eta_{opt} \approx 80\%$ [9]. Coughenour et al. also presented experimental measurements of a concentrator with the concentration of ~ 1000 suns, with an approximate η_{opt} of 80% [10]. More recently, Shanks et al. demonstrated the possibility of achieving concentrations within the range of 3000-4300 suns with $\eta_{opt} \approx 55\%$ -75% [168]. The last result is promising, but future studies are still needed to achieve ultra-high levels with a better η_{opt} .

This study explores geometrical concentrations within 3000×-6000× by using a one-cell design previously developed by the authors based on multiple off-axis Cassegrain units to achieve the concentration of almost 1700 suns with $\eta_{opt} = 73\%$ –assuming that standard optical materials are used. This design, which can be called Cassegrain-Koehler as it utilizes the principle of Koehler illumination [11], is analyzed in depth in the present study. The analysis is performed theoretically in terms of the aspect ratio of the primary mirrors. Moreover, a 3015× one-cell prototype is fabricated and characterized in a CPV solar simulator to serve as a proof of concept. This represents the CPV module with the highest experimentally investigated geometrical concentration that could be found in the literature.

2. Cassegrain-Koehler-based UHCPV design

The Cassegrain-Koehler-based UHCPV design utilizes four independent optical units to concentrate sunrays on a central receiver. Primary Optical Element (POE) mirrors are paraboloids, whereas SOE (Secondary Optical Element) mirrors are hyperboloid, as depicted in Fig. 1-left. For each optical unit, the POE focus and the SOE near focus correspond to each other (point “F” in Fig. 1). The SOE far focus (point “G”) is located inside the correspondent Cartesian oval of revolution of the Tertiary Optical Element (TOE). The TOE is

composed of four Cartesian ovals of revolution, whose length is maintained at 20 mm. This design principle can be scaled to different geometrical concentration ratios, C_g , and aspect ratios of the POE mirrors, by changing the size and focal distance of the POE mirrors, f_{POE} .

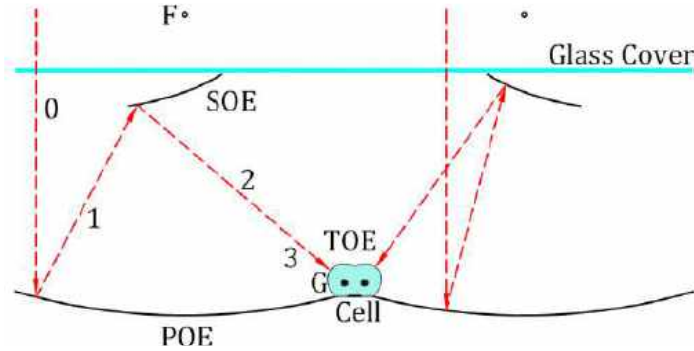


Fig. 1. Sketch of the UHCPV Cassegrain-Koehler (left)[12].

3. Theoretical analysis

3.1 Parametric analysis

The optical design of the Cassegrain-Koehler-based UHCPV one-cell concentrator is analyzed for different geometrical configurations while keeping the optical parameters related to the light and their interactions with the optical elements involved constant. For this purpose, optical modeling is applied in the ray tracing simulations, based on the theory described in [13] and experimentally validated in [14], in which a series of optical wavelength-dependent properties are taken into account. State-of-the-art optics are considered in this section to explore the performance limits of the proposed design. Sunrays are considered to have solar angular distribution and the standard reference terrestrial spectrum normalized to 1000 W/m^2 . Both dielectric elements, i.e., cover and TOE, are simulated to have antireflective coatings (ARs) of 98% transmittance. The cover is considered to be constructed from fused silica, whereas the TOE is considered to be constructed from glass Schott N-BK7. Light absorption (Beer-Lambert law) is accounted for within the TOE using a wavelength-dependent absorption coefficient. Reflectors POE and SOE are considered as the first surface mirrors accounting for 98% of the total reflectance, including reflection scattering. The ABg scatter model, which is a modified inverse-power-law-model, is used to model the roughness of the isotropic surface [15], with the following values: integrated bidirectional reflectance distribution function, BRDF = 0.01324%, and bidirectional transmission distribution function, BTDF = 0.01450%. No wavelength dependency is applied to the reflectors at this point. Finally, the solar cell is considered to be an ideal absorber.

In total, five different C_g in the range of UHCPV are considered: $2001\times$, $3015\times$, $4003\times$, $5028\times$, and $6057\times$. For each C_g , the $F\text{-number}_{POE}$ is varied to analyze the impact of the aspect ratio of the design on its optical performance. To standardize the analysis, every design considered was chosen to correspond to one of the following values of $F\text{-number}_{POE}$: 0.52, 0.63, 0.75, 0.86, 0.98, or 1.09. Note that $F\text{-number}_{POE}$ is defined to be the ratio of f_{POE} and the length of the diagonal of the POE mirror.

However, the SOE mirrors do not impose the aforementioned constraints on C_g and $F\text{-number}_{POE}$, and therefore, the $f_{l\text{-}SOE}$ value needs to be adjusted to focalize the concentrated rays on the solar cell. Then, for each C_g and $F\text{-number}_{POE}$, a value is obtained for $F\text{-number}_{l\text{-}SOE}$ with the restriction of maintaining the acceptance angle (AA) at a value greater than $\pm 0.30^\circ$. Note that $F\text{-number}_{l\text{-}SOE}$ is defined to be the ratio of $f_{l\text{-}SOE}$ over the length of the shortest diagonal of the convex kite-like SOE. AA denotes the angle at which η_{opt} decreases by 10% with respect to its value under normal incidence and should be greater than $\pm 0.30^\circ$, which is sufficient for a typical solar tracker [168]. The $F\text{-number}_{l\text{-}SOE}$ values obtained for each C_g are observed to be constant, with a global deviation of only 4%. In ascending order of C_g , the observed $F\text{-number}_{l\text{-}SOE}$ values are 3.57, 3.43, 2.79, 2.74, and 2.49, respectively. These required $F\text{-number}_{l\text{-}SOE}$ values decrease with C_g as the distance between the solar cell and the SOE mirrors increases with C_g . Designs whose $F\text{-number}_{l\text{-}SOE}$ values for each C_g are remote from those listed, will lead to poor results for either η_{opt} or AA. The geometrical parameters have been summarized in Table 1.

3.2. Simulation results and discussion

The optical simulation results have been presented in Table 1 and summarized in Fig. 2, in which η_{opt} has been plotted versus $F\text{-number}_{POE}$, for each C_g .

Table 1. Geometrical parameters, optical efficiency and acceptance angle values.

$f\text{-number}_{POE}$ [mm]	2001×		3015×		4003×		5028×		6057×	
	η [%]	AA [°]	η [%]	AA [°]	η [%]	AA [°]	η [%]	AA [°]	η [%]	AA [°]
0.52	83.7	±0.37	83.0	±0.31	-	-	-	-	-	-
0.63	83.7	±0.44	83.3	±0.32	82.8	±0.34	82.0	±0.30	-	-
0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	80.0	±0.30
0.86	82.5	±0.42	82.3	±0.32	81.8	±0.32	80.6	±0.32	79.9	±0.31
0.98	-	-	-	-	-	-	79.3	±0.31	78.7	±0.30
1.09	80.6	±0.34	80.2	±0.32	80.1	±0.35	-	-	-	-

For each value of $F\text{-number}_{POE}$, only designs with relatively good performance are considered, i.e., $AA > \pm 0.30^\circ$ and $\eta_{opt} > 78\%$. Note that certain cases under study do not satisfy both criteria, e.g., $C_g = 6057\times$ and $F\text{-number}_{POE}$ lower than 0.75. These designs, which do not correspond to the aforementioned criteria, approximately correspond to the shadowed area depicted in Fig. 2.

η_{opt} ranges from a minimum of 78.7% ($C_g = 6057\times$, $F\text{-number}_{POE} = 0.98$) to a maximum of 83.7% ($C_g = 2001\times$, $F\text{-number}_{POE} = 0.52$), and decreases, in general, with $F\text{-number}_{POE}$ values, independent of C_g . The decreasing trend in η_{opt} with respect to $F\text{-number}_{POE}$ holds, in general, for all the analyzed C_g . Therefore, the most compact designs (ones with the lowest aspect ratio) perform the best at concentrating sunrays on the solar cell. This is due to two primary reasons: the lower apparent size of the solar cell as observed by the SOE mirrors, and the longer optical path of the concentrated rays—especially those between the SOE mirrors and the TOE. Both effects tend to reduce the probability of a concentrated ray reaching the solar cell.

Corresponding to a specific value of $F\text{-number}_{POE}$, η_{opt} is inversely proportional to C_g . For instance, corresponding to $F\text{-number}_{POE} = 0.86$ and ascending order of C_g , the corresponding η_{opt} values are 82.5%, 82.3%, 81.8%, 80.6%, and 79.9%. As C_g increases, the dimensions of POE and SOE mirrors also increase relative to the solar cell (with fixed area). This causes wider ray beams to impinge on the TOE and the solar cell, and therefore, increases the difficulty of concentrating the sunrays onto the solar cell.

Designs with a fixed $F\text{-number}_{POE}$ increase in height, h , as C_g is increased. For example, in the case of $F\text{-number}_{POE} = 0.86$, the h values are 132 mm, 158 mm, 178 mm, 194 mm, and 210 mm, respectively. Note that the change in h ranges from 86 mm ($C_g = 2001\times$ and $F\text{-number}_{POE} = 0.52$) to 227 mm ($C_g = 6057\times$ and $F\text{-number}_{POE} = 0.98$).

The lowest value of the acceptance angle proposed in the designs is $\pm 0.30^\circ$ (especially in cases with higher C_g), whereas the designs with lowest C_g exhibit the greatest AA values. This is the case of designs with $C_g = 2001\times$ and $F\text{-number}_{POE} = 0.63$, with $AA = \pm 0.44^\circ$.

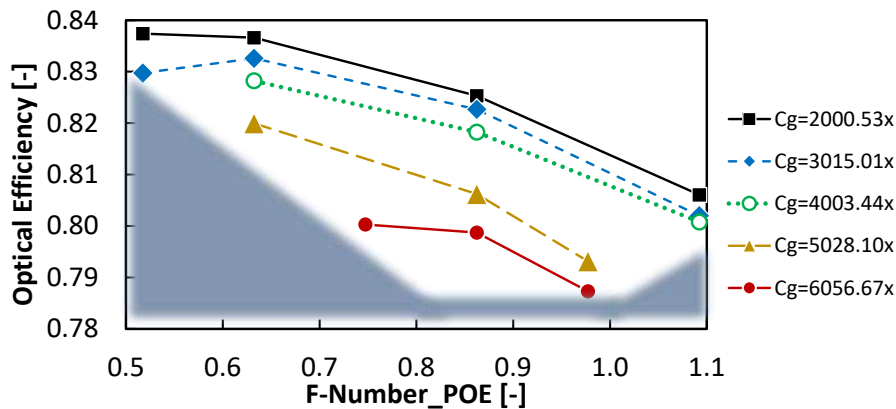


Fig. 2. η_{opt} of the investigated designs as a function of the $F\text{-number}_{POE}$ and depending on C_g . The shadowed area represents the rejected designs, i.e., those with $\eta_{opt} < 78\%$ or $AA < \pm 0.30^\circ$.

4. 3015× One-cell prototype

4.1. Design and fabrication

The design that has been selected to be fabricated in this study has a geometrical concentration of 3015×, with the total length of the POE mirror plates being 151 mm and a height of around 125 mm. It is designed to have the following focal distances: $f_{POE} = 135.04$ mm, $f_{1-SOE} = 131$ mm, and $f_{2-SOE} = 25$ mm. The corresponding F-numbers are $F\text{-number}_{POE} = 0.63$ and $F\text{-number}_{1-SOE} = 2.72$. Note that these values of $F\text{-number}_{1-SOE}$ are lower than those obtained from theoretical analysis in subsection 3.2, where it was estimated

to be 3.43. The reason for this variation is that, with a lower $F\text{-number}_{I\text{-SOE}}$, the AA of the design selected for fabrication is expected to be higher than that of the design considered in Table 1. Thus, this value increases the probability of obtaining a prototype suitable for a real sun tracker. However, the low value may result in a reduction in the expected optical η_{opt} .

The mechanical design of the UHCPV one-cell prototype follows the poka-yoke methodology: every part fits in only one specified orientation. For instance, the SOE mirrors are inserted on the PMMA (poly(methyl methacrylate)) cover and no further orientation adjustment is allowed after the screws are tightened. The PMMA cover (of 6 mm depth) affixes the SOE mirrors in the correct position and orientation. Moreover, the TOE is modified to have a truncated inverted pyramidal base that corresponds to the solar cell surface. Fig. 3 depicts a transverse cut along a diagonal of the 3D model of the selected design (left), and (right) a detailed view of the TOE along with the solar cell receiver.

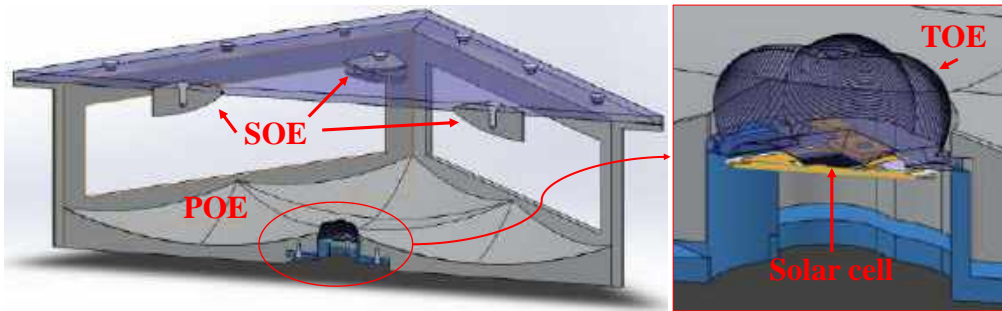


Fig. 3. (Left) Transverse diagonal cut of the 3D design of the UHCPV one-cell prototype. (Right) Detail of the TOE along with the solar cell receiver.

The UHCPV one-cell prototype is fabricated using PMMA and aluminum, which are standard and relatively inexpensive materials. Polishing is the only optical surface treatment applied. The triple-junction, 3J, AZUR SPACE solar cell is a square of 5.5 mm length, with spectral response, $SR_{subcell}(\lambda)$, as given in Fig. 7. Fig. 4 presents a photograph of the UHCPV one-cell prototype (left) and details of an SOE mirror (top right) and the TOE (bottom right). The polished surface of the SOE can be also seen.

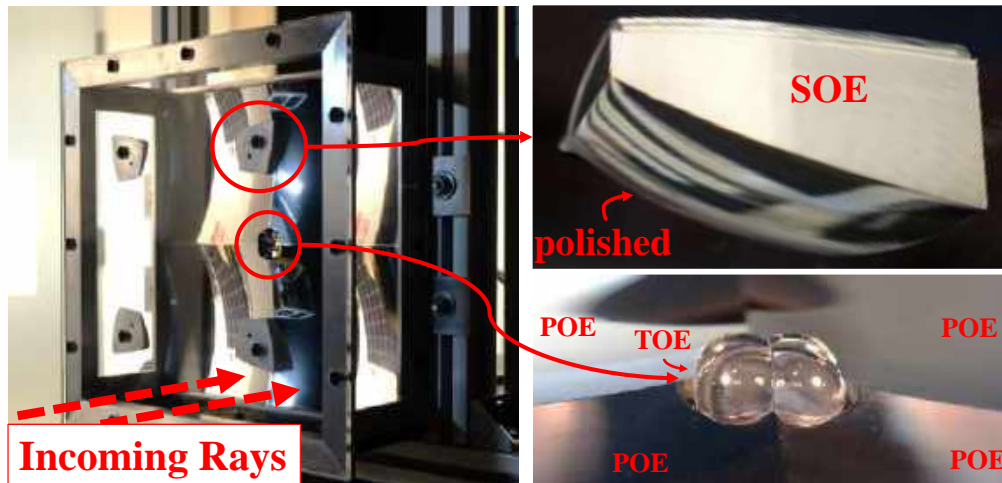


Fig. 4. (Left) Photograph of the UHCPV one-cell prototype. (Top right) detail of an SOE mirror along with the polished surface. (Bottom right) Detail of the TOE.

4.2 Experimental setup

Indoor characterization is performed using the CPV Solar Simulator Helios 3198. This multi-flash solar simulator produces an angular distribution of rays of $\pm 0.3^\circ$, similar to real sunrays. The spectral distribution of the flash light is that of a Xenon discharge lamp and, from the point of view of the typical 3J solar cell, is equivalent to that of the sunrays. This CPV solar simulator is of class AAA and is a characterization tool widely used in CPV [178, 179]. The I-V characteristics are obtained under conditions equivalent to concentrator standard test conditions (CSTC), i.e., DNI (Direct Normal Irradiance) = 1000 W/m^2 , spectrum $SMR(top/mid) = 1 \pm 0.01$, and ambient temperature = $25 \text{ }^\circ\text{C}$. The spectrum is monitored using a Tri-Band spectro-heliometer from Solar Added Value using the Spectral Matching Ratio (SMR) between the top and the middle subcells—known as the $SMR(top/mid)$ metric [180]. $SMR(top/mid)$ evaluates the spectral balance

of the incoming light with respect to the top and middle isotype-component cells. The UHCPV one-cell prototype is mounted on the support structure of the solar simulator (Fig. 1-right). In addition, the uniformity profiles on the solar cell surface are obtained using the set-up introduced in [181]. This consists of a Lambertian diffuser and a CCD camera, as well as various non-neutral filters to correspond to the $SR(\lambda)$ of the camera and that of each subcell.

4.3 Experimental results

The electrical characterization of the UHCPV one-cell prototype at CSTC yielded the following electrical values: (short-circuit current) $I_{sc} = 4.342$ A, (voltage at open circuit) $V_{oc} = 3.20$ V, (maximum power) $P_{mp} = 10.50$ W, (fill factor) $FF = 75.7\%$ and efficiency = 11.5 %. This characterization corresponds to an effective concentration, $C_{eff} = C_g \cdot \eta_{opt}$, of 938 suns, i.e., the I_{sc} measured is 938 times higher than its calibrated I_{sc} value (4.63×10^{-3} A) under the illumination of 1 sun. Such a value of C_{eff} implies an η_{opt} of 31%.

This η_{opt} value is lower than expected and can be attributed to several factors: i) greater light scattering on the optical surfaces than expected, ii) light spillage from the solar cell surface due to deficient optical coupling between the TOE and the solar cell, and iii) an excessive top-subcell current limitation, as depicted in Fig. 5-left, where the subcell's current limitation diagram has been presented [180]. The ratio of the normalized current of the UHCPV one-cell prototype and the effective irradiance measured by the top subcell remains constant up to around $SMR(top/mid) = 1.12$. Therefore, the top subcell limits the current up to the blue-rich spectral condition of the incoming irradiance. This may be attributed to greater absorption of irradiance in the top subcell range than expected. This point will be further discussed below. The current limitation effect in the top-subcell was not observed in Fresnel refractive (PMMA) concentrators that had been previously investigated [13]. Future research can analyze the source of those losses to improve the UHCPV one-cell prototype.

With regard to the measured angular tolerance (consult Fig. 5-right, black points), the experimental acceptance angle is around $\pm 0.30^\circ$.

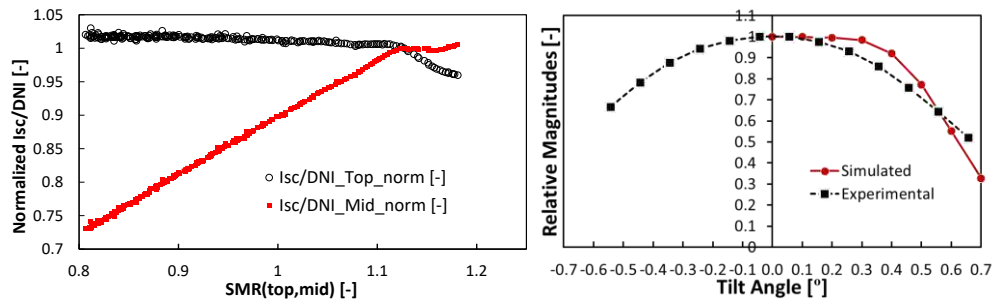


Fig. 5. (Left) Subcell current limitation diagram. (Right) Simulated and experimental acceptance angle curves.

With regard to the uniformity of the generated $J_{sc,subcell}$, Fig. 6 demonstrates both the simulated $J_{sc,subcell}$ plots obtained via ray tracing of the top (left) and middle (right) subcells. The associated experimental measurement has been explained in section 4.2. The measured results demonstrate relatively good uniformity, i.e., a peak-to-average (PAR) ratio of 2.2 for the top subcell and that of 2.3 for the middle subcell.

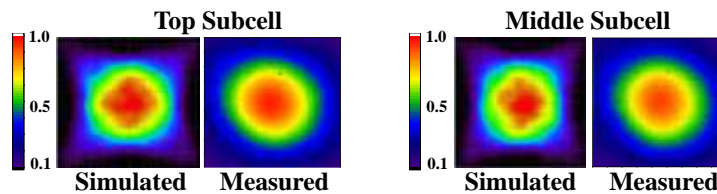


Fig. 6. Simulated short-circuit current density plots of the top and middle subcells, as well as acquired pictures (CCD camera) of concentrated light for the spectral ranges of the top and middle subcells.

4.4 Comparison of experimental results with those obtained via optical modeling

The properties of the elements described in sub-section 4.1 (fabricated materials instead of state-of-the-art materials) are included in the ray-tracing optical modeling, to compare its results with the experimental results and achieve a better understanding of the UHCPV one-cell prototype. For transparent elements, refractive index and absorption coefficient of PMMA, α_p , are included in the ray tracing simulations. The mirrors are modeled using the wavelength-dependent reflectance measured in our institution, using a Cary 4000UV-Vis spectrophotometer, from a polished planar plate sample made of aluminum. This reflectance is

relatively low: 86% at 550 nm. These optical properties have been summarized in Fig. 7. The ABg scatter model is also applied, as discussed in Section 3 (theoretical analysis). The 3J solar cell is modeled using the $SR_{subcell}(\lambda)$ values (consult Fig. 7).

These new optical simulation results obtained using inexpensive fabricated materials, exhibit an η_{opt} of 58.1% (3J solar cell is considered), which implies an effective concentration of 1753 suns ($\approx 87\%$ higher than the measured). Note that, in this case, three subcells are considered to calculate η_{opt} . Thus, in this case, η_{opt} can be considered as the polychromatic optical efficiency [20], and therefore, its value may be lower than the case in which the solar cell is considered to be an ideal absorber. The simulation results for short-circuit current density values, $J_{sc,subcell}$, are 27.4 A/cm² (top subcell), 28.2 A/cm² (middle subcell), and 28.7 A/cm² (bottom subcell). $SMR(top/mid)$ results achieve the value 0.98 ($\approx 10\%$ lower spectral losses than measured), which corresponds to the so called “red-rich” spectral conditions, although it is very close to unity [21]. The lower $SMR(top/mid)$ value obtained from the simulation can be attributed to absorption of short-wavelength light by the aluminum surfaces of POE and SOE. This also confirms the top cell’s experimentally measured current limitation, but to a lesser extent. Therefore, it indicates that there could be additional optical losses at shorter wavelengths that could explain the lower performance of the UHCPV one-cell prototype at those intervals. The study of other causes to explain the lower optical efficiency obtained, such as issues like additional light scattering or light spillage as previously mentioned, will be the aim of future works in this field.

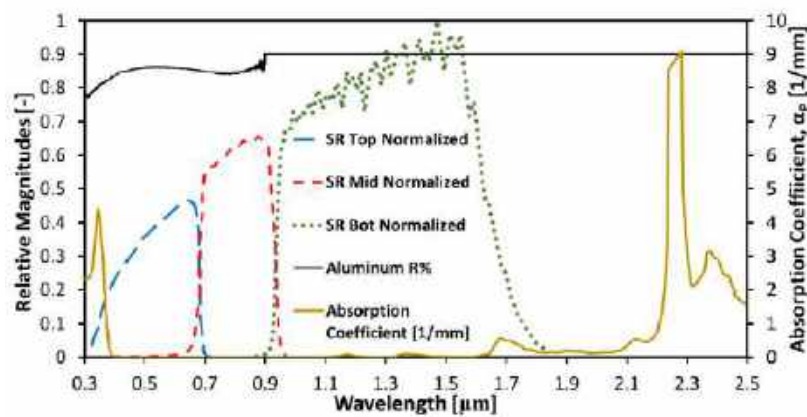


Fig. 7. Material and surface properties included in the optical simulations: spectral response of each subcell, absorption coefficient of PMMA and reflectance of aluminum.

The optical modeled acceptance angle was detected to be $\pm 0.41^\circ$ (consult Fig. 5-right, red points). This is $\approx 0.1^\circ$ higher than the measured result (an increase of $\approx 37\%$). The sharper drop in the AA values compared to the measurements may be attributed to the effect of imperfections that may be present in the fabricated elements on the optical surfaces. These may provoke the rays to be scattered to a greater extent than in the simulations. The measured patterns presented in Fig. 6 indicate that the illumination uniformity is similar to the simulated $J_{sc,subcell}$ results, with PAR values of 4.0 for the top subcell and 4.1 for the middle subcell. The results concerning AA and illumination uniformity confirm that, despite the optical losses encountered, the geometrical design and construction of this UHCPV one-cell prototype is correct in terms of the position and alignment of the optical elements.

5. Conclusions and future work

This study analyzed the design limits of Cassegrain-Koehler ultra-high concentrator photovoltaic modules (UHCPV) [12]. First, a parametric analysis based on the aspect ratio (F-number) of the primary mirrors at different geometrical concentration ratios was carried out. Concentrations of up to almost 5000 suns were theoretically achieved via ray tracing simulations over a 5.5 mm side solar cell using TracePro® optomechanical software. Optical efficiencies of up to almost 84% were estimated for designs at 2000 \times the geometrical concentration ratio, whereas it only decreased to 80% for the design at 6056 \times . The most compact designs were the most efficient independent of the geometrical concentration ratio. This is an interesting conclusion, as one of the main intentions of the design proposed is to increase the compactness of CPV modules, to reduce the amount of materials, loads supported by the trackers, etc. Moreover, none of the designs analyzed had an acceptance angle lower than $\pm 0.30^\circ$.

To test the theoretical design, a 3015 \times one-cell prototype was fabricated and characterized in a CPV solar simulator. It utilized inexpensive materials, such as PMMA (polymethyl methacrylate) and aluminum. The UHCPV one-cell prototype achieved up to around 938 suns of effective concentration. This represents the

CPV module with the highest experimentally investigated geometrical concentration that could be found in existing literature. It corresponded with an optical efficiency of 31%, which is lower than the optically modeled efficiency (58%). An evinced excessive top-subcell current limitation may be the cause of the lower optical performance obtained, apart from other possible problems, such as light scattering on the surfaces or light spillage on the solar cell. The UHCPV one-cell prototype recorded a worse acceptance angle value ($\pm 0.30^\circ$) than the simulation one ($\pm 0.41^\circ$) but was still very close to it. The geometrical design was also validated via the experimental results based on the images of the concentrated light in the light homogenizer element (TOE).

In future works, the identification of the source of the top-subcell current limitation, as well as that of the lower optical efficiency, needs to be carried out. Light scattering on surfaces is to be checked, and the soundness of the optical coupling between the TOE and the solar cell must also be verified. To improve the performance of the UHCPV one-cell prototype, materials with higher optical quality and better surface finishing (better polishing, antireflective coating, highly reflective coatings, etc.) may be needed. Moreover, scaling such designs to micro-concentrators and the feasibility of their fabrications are to be investigated.

Funding

Spanish “Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICINN)” and ERDF (European Union) (ENE2016-78251-R); Eduardo F. Fernández is supported by the MICINN under the Ramón y Cajal 2017 program (RYC-2017-21910).

Acknowledgments

The authors thank Lambda Research Co. for its donation of TracePro® optical software. The authors also want to thank the CICT-UJA (Centro de Instrumentación Científico-Técnica of the University of Jaén) and the Fundación Andaltec I+D+i.

Disclosures

The authors declare no conflicts of interest.

References

1. M. Steiner, G. Siefert, T. Schmidt, M. Wiesenfarth, F. Dimroth and A. Bett, “43% sun light to electricity conversion efficiency using CPV,” *IEEE J. Photovolt.* **6**, 1020–1024 (2016).
2. P. Pérez-Higueras, J. P. Ferrer-Rodríguez, F. Almonacid and E. F. Fernández, “Efficiency and acceptance angle of High Concentrator Photovoltaic modules: Current status and indoor measurements,” *Renew. Sustain. Energy Rev.* **94**, 143–153 (2018).
3. C. Algora and I. Rey-Stolle, “The Interest and Potential of Ultra-High Concentration,” in *Next Generation of Photovoltaics, Springer Series in Optical Sciences*, Berlin (Springer-Verlag, 2012), 23–60.
4. B. Paquette, A. Boucherif, V. Aimez and R. Arès, “Novel multijunction solar cell design for low cost, high concentration systems,” *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **24**, 50–158 (2015).
5. E. Fernandez, N. Seoane, F. Almonacid and A. Garcia-Loureiro, “Vertical-tunnel-junction (VTJ) solar cell for ultra-high light concentrations (>2000 suns),” *IEEE Electron Device Lett.* **40**(1), 44–47 (2019).
6. K. Shanks, J. P. Ferrer-Rodríguez, E. F. Fernández, F. Almonacid, P. Pérez-Higueras, S. Senthilarasu and M. T. Mallick, “A >3000 suns high concentrator photovoltaic design based on multiple Fresnel lens primaries focusing to one central solar cell,” *Sol. Energy*, **169**, 457–467 (2018).
7. J. Karp, E. Tremblay, J. Hallas and J. Ford, “Orthogonal and secondary concentration in planar micro-optic solar collectors,” *Opt. Express*, **19**(S4), A673–A685 (2011).
8. K. Ghosal, D. Lilly, J. Gabriel, M. Whitehead, S. Seel, B. Fisher, J. Wilson and S. Burroughs, “Semprius field results and progress in system development,” *IEEE J. Photovolt.* **4**(2), 703–708 (2014).
9. P. Zamora, P. Benítez, R. Mohedano, A. Cvetković, J. Vilaplana, Y. Li, M. Hernández and J. Chaves, “Experimental characterization of Fresnel-Köhler concentrators,” *J. Photon. Energy* **2**, 021806-1–021806-12 (2012).
10. B. M. Coughenour, T. Stalcup, B. Wheelwright, A. Geary, K. Hammer and R. Angel, “Dish-based high concentration PV system with Köhler optics,” *Opt. Express*, **22**(S2), A211–A224 (2014).
11. R. Wiston, J. Miñano and P. Benítez, *Nonimaging Optics* (Elsevier-Academic Press, 2005).
12. J. P. Ferrer-Rodríguez, E. F. Fernández, F. Almonacid and P. Pérez-Higueras, “Optical Design of a 4-Off-Axis-Unit Cassegrain Ultra-High Concentrator Photovoltaics Module with a Central Receiver,” *Opt. Letters*, **41**(9), 1985–1988, (2016).
13. J. P. Ferrer-Rodríguez, H. Baig, E. F. Fernández, F. Almonacid, T. Mallick and P. Pérez-Higueras, “Optical modeling of four Fresnel-based high-CPV units,” *Sol. Energy* **155**, 805–815 (2017).
14. J. P. Ferrer-Rodríguez, E. Fernández, H. Baig, F. Almonacid, T. Mallick and P. Pérez-Higueras, “Development, indoor characterisation and comparison to optical modelling of four Fresnel-based high-CPV units equipped with refractive secondary optics,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **186**, 273–283 (2018).
15. H. Frey and R. Hamid, *Handbook of Thin-Film Technology* (Springer, 2015), Chap. 12.
16. E. Fernández, J. P. Ferrer-Rodríguez, F. Almonacid and P. Pérez-Higueras, “Current-voltage dynamics of multi-junction CPV modules under different irradiance levels,” *Sol. Energy* **155**, 39–50 (2017).
17. C. Domínguez, I. Antón and G. Sala, “Solar simulator for concentrator photovoltaic systems,” *Opt. Express* **16**(19), 14894–14901 (2008).
18. C. Domínguez, I. Antón, G. Sala and S. Askins, “Current-matching estimation for multijunction cells,” *Prog. in Photovolt: Res. and Appl.* **21**(7), 1478–1488 (2013).

Capítulo 5: Diseño, modelado óptico, fabricación y caracterización experimental de concentradores a UHCPV

19. J. M. Saura, E. F. Fernández, F. M. Almonacid and D. Chemisana, "Characterisation and impact of non-uniformity on multi-junction solar cells (MJSC) caused by concentrator optics," 15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-15), **2149**(August), 020004-1–020004-6 (2019).
20. P. Benitez, J. Miñano, P. Zamora, R. Mohedano, A. Cvetkovic, M. Buljan, J. Chaves and M. Hernández, "High performance Fresnel-based photovoltaic concentrator," *Opt. Express***18**(S1), A25-A40 (2010).
21. P. Pérez-Higueras and E. F. Fernández, "Multijunction Concentrator Solar Cells: Analysis and Fundamentals," in *High Concentrator Photovoltaics* (Springer, 2015), Chap. 2.

Capítulo 6: Discusión general de los resultados

Esta tesis se ha enfocado en el estudio experimental de la no-uniformidad producida en células CPV, así como en el diseño, fabricación y caracterización de un módulo de ultra-alta concentración. Estos estudios comprenden desde la generación de los patrones de no-uniformidad hasta su caracterización y la medición de la respuesta eléctrica del dispositivo fotovoltaico. En ellos se estudiaron diferentes tipos de óptica (refractiva y reflexiva) con y sin óptica secundaria. Las tendencias de los resultados experimentales vienen respaldadas por las simulaciones obtenidas mediante un modelo óptico de trazado de rayos. En paralelo, se trabajó en el diseño de un módulo a UHCPV compacto que posteriormente se fabricó y caracterizó experimentalmente.

En los siguientes párrafos se discuten las principales características y particularidades a tener en cuenta según el orden lógico vinculado a las diferentes etapas y objetivos de la investigación.

Uno de los pilares fundamentales para el desarrollo de esta tesis consiste en el desarrollo de un montaje experimental en laboratorio para reproducir y caracterizar los patrones de uniformidad generados por la óptica concentradora y realizar su posterior análisis del comportamiento eléctrico en el dispositivo CPV. Los principales hitos relacionados con este objetivo de la tesis serían:

- **Alineamiento del sistema CPV y búsqueda de la posición óptima entre concentrador y receptor CPV**

Con el propósito de obtener unos resultados fiables y que aseguren repetitividad es de obligado cumplimiento el correcto alineamiento entre los elementos ópticos, el receptor CPV y la fuente de luz. El procedimiento para alinear los elementos ópticos y el receptor, así como encontrar la posición óptima *on-focus* se basa en tres pasos principales: Primero, (1) se realizó un alineamiento visual que minimice la superficie del *spot* de luz mediante el uso de la lámpara del simulador en modo continuo. A continuación, (2) se modificaron los ángulos de inclinación y orientación, respecto a los ejes x e y respectivamente, mediante el uso de dos cajas reductoras de velocidad montadas sobre la estructura de soporte. Mediante este proceso se puede asegurar una precisión de alrededor 0.1° por vuelta. Este procedimiento se realizó varias veces para verificar que todos los elementos están situados en la posición correcta y asegurar que los resultados tienen repetitividad. En este paso, el sistema se considera alineado en el ángulo que maximiza la corriente de cortocircuito. Finalmente, (3) se modificó también la distancia POE-receptor (d) a lo largo del eje óptico (eje z) para encontrar la posición óptima. Al igual que en el paso anterior, esta posición es la que maximiza la corriente de cortocircuito y, por consiguiente, la concentración efectiva del sistema. Este criterio se utilizó en este trabajo para proporcionar mayor flexibilidad en el experimento y maximizar el número de rayos que impactan sobre la célula solar.

Cabe destacar que, una vez encontrada la posición óptima, y habiendo realizado correctamente el procedimiento de alineación, no será necesario realinearlo para cada distancia POE-receptor. Esto es debido a que el receptor se mueve sobre el eje focal del POE, de esta manera, el alineamiento no depende de la distancia POE-receptor.

- **Distribución angular y espacial de la lámpara del simulador solar**

Considerando el simulador solar, los filtros de color y las mallas neutras utilizadas en los experimentos, se puede concluir que se mantuvo tanto la distribución angular, espacial y espectral de la luz incidente. Para lograr esto, se utilizó el simulador solar *multi-flash Helios 3198* ubicado en el laboratorio de la Universidad de Jaén con una superficie de iluminación uniforme de alrededor 2 metros de diámetro, clasificado como rango AAA de acuerdo a los estándares de CPV. Los filtros y mallas utilizados consisten en una capa que modifica la distribución espectral (filtros de color) y atenúa (malla o filtro neutro) la luz total emitida por la lámpara hacia el espejo parabólico. Esto significa que la luz que impacta sobre el espejo parabólico, que actúa como colimador, es uniformemente modificada. Por tanto, la luz reflejada por el colimador no muestra ninguna modificación espacial. Respecto al impacto angular, la posible mínima modificación que estos elementos puedan introducir es eliminada por el espejo colimador.

- **Importancia de mantener constante los niveles de concentración**

Para estudiar las no-uniformidades producidas por la óptica concentradora se modificaron las distancias entre el POE y el receptor, esto genera diferentes patrones de iluminación sobre el receptor. Como consecuencia de este procedimiento, la irradiancia incidente en la célula solar se reduce. Si la concentración efectiva no fuera corregida adaptando la irradiancia con el simulador, se producirían dos efectos al mismo tiempo que afectarían al comportamiento eléctrico de la célula: 1) modificación de los perfiles de irradiancia (espectral y espacialmente) y 2) modificación de la concentración. Ambos tendrían un impacto crítico en la curva IV de la célula. En este sentido, se decidió fijar la concentración eficaz para eliminar el efecto de la concentración en la MJSC. De otra manera sería imposible, o muy difícil, distinguir los efectos debidos a la variación de los patrones de luz (responsables de generar no-uniformidades) de los efectos causados por la modificación de la irradiancia efectiva.

- **Caracterización de los patrones**

El propósito aquí fue demostrar que es posible adaptar la cámara CCD mediante la correcta selección de filtros pasa-banda para obtener un comportamiento espectral similar al de las subcélulas *top* y *middle* de una célula solar estándar de triple-unión. Para dar fiabilidad a la modificación realizada en la cámara mediante los filtros pasa-banda, éstos fueron

seleccionados mediante el análisis de su respuesta bajo múltiples espectros entre $AM = 1$ y $AM = 10$. Este rango virtualmente cubre todos los rangos espectrales en el exterior. $AM = 1$ corresponderá a un espectro con alto contenido en azules y con altos valores de rayos UV, mientras que $AM = 10$, representará un espectro extremo rico en rojos con una contribución UV despreciable.

- **Índices para cuantificar la no-uniformidad (PAR y SUR)**

El índice PAR, (peak-to-average ratio) es uno de los parámetros más utilizados para caracterizar experimentalmente la distribución de la luz en células multi-unión. A pesar de que su medida no permite tener en cuenta todos los fenómenos producidos por la no-uniformidad, agrupa en un parámetro simple la distribución espacial de la luz sobre la célula solar y permite evaluar fácilmente su impacto. Sin embargo, este parámetro no aporta información relativa a la uniformidad espectral de la irradiancia. Con este propósito, se planteó la introducción del índice SUR en la publicación número 2. El índice SUR, (spectral-uniformity ratio) es función de los valores $SMR_{top/mid}$ obtenidos experimentalmente con la cámara CCD. Este índice permite estudiar cuantitativamente el impacto de la no-uniformidad espectral producido por la óptica CPV. Éste representa una gran contribución al campo de la caracterización, ya que hasta el desarrollo de esta tesis no existía en la literatura ningún índice válido para caracterizar la uniformidad espectral de las células fotovoltaicas.

Ambos índices, PAR y SUR pueden entenderse de manera similar. De igual modo que los mayores valores de PAR representan una peor uniformidad espacial, los mayores valores de SUR representarán una peor uniformidad espectral.

- **Distribución de los patrones y particularidad del sistema reflexivo**

Tras analizar la distribución de la irradiancia en las subcélulas *top* y *middle* en el caso del sistema reflexivo se percibió una evolución simétrica respecto a la posición de *on-focus*, mientras que en el caso del sistema refractivo presentan tendencias opuestas. Asimismo, los valores de PAR mostraron una amplia diferencia para las diferentes posiciones analizadas, en torno a 3.1 en estos sistemas, mientras que sólo alcanzaba un valor cercano a 0.5 para el sistema refractivo. Esto evidencia una mayor sensibilidad a la distancia concentrador-receptor y a la no-uniformidad de la irradiancia en los sistemas reflexivos.

Asimismo, en el sistema reflexivo se encontró que la no-uniformidad de la irradiancia (PAR) de ambas subcélulas evolucionaba de forma similar en todo el rango de distancias concentrador-receptor. Esto indica un menor impacto de la AC, como es esperado en los sistemas compuestos por óptica reflexiva. Esto se pudo corroborar también mediante el análisis del índice SUR. El estudio indicó que las no-uniformidades espectrales se hacen

más notables en el caso del sistema refractivo con mayores valores de SUR (1.54 a 1.77), mientras que la aberración cromática en el caso del sistema reflexivo es bastante más pequeña (con valores de SUR de 1.23 a 1.36), pero no despreciable. Este pequeño efecto de AC se pudo caracterizar experimentalmente y es debido principalmente a la cobertura de vidrio que el espejo tiene adherida al aluminio. En la interfaz vidrio-aire se producen dos refracciones que dan lugar a una pequeña no-uniformidad espectral en el receptor.

- **Discrepancia entre los resultados simulados y experimentales**

Se consideró apropiado desarrollar un modelo teórico por simulación de rayos simplificado capaz de dar solidez a los resultados experimentales teniendo en cuenta la complejidad y novedad de los experimentos llevados a cabo. Con este objetivo, se desarrolló un modelo óptico simplificado en el cual se consideraron superficies ópticas y volúmenes ideales. No se tuvo en cuenta la dispersión en la superficie y en el volumen producida por las imperfecciones del material, de igual modo las pérdidas Fresnel y la dispersión angular tampoco fueron consideradas. Por otra parte, en el caso del disco no se consideró la reflectividad espectral.

Teniendo en cuenta todas estas aproximaciones implementadas en el modelo teórico simplificado, es lógico pensar que los valores simulados del PAR sean mucho mayores que los obtenidos experimentalmente. A pesar de ello, el modelo teórico es consistente y útil para identificar las tendencias de los índices de uniformidad PAR y SUR. En este sentido, el comportamiento observado en el modelo óptico se ajusta a las tendencias obtenidas experimentalmente en el laboratorio.

- **Resistencia en serie y paralelo aparentes**

En la publicación número 2 se adoptó la nomenclatura *apparent Rs* y *apparent Rsh* para referirnos a las pendientes de las curvas I-V en circuito abierto y en cortocircuito, respectivamente. De este modo, se pretendió arrojar luz sobre el impacto de la no-uniformidad en los parámetros físicos de resistencia en serie y paralelo (*Rs* y *Rsh*). Los valores de las resistencias aparentes fueron extraídos de la aproximación de un circuito equivalente lineal de células solares. A pesar de la simplificación, estos valores permitieron diferenciar cualitativamente el comportamiento eléctrico de los sistemas refractivos y reflexivos. Como se comentó anteriormente, el enfoque de este estudio fue experimental y, por tanto, el uso de modelos físicos complejos, como puede ser un modelo de circuito distribuido, estaba fuera del alcance de los objetivos perseguidos en esta publicación.

- **Caracterización de patrones en receptores con y sin SOE**

Un matiz a destacar acerca de la caracterización de los patrones desarrollada en la publicación número 3, fue la colocación de la pantalla lambertiana en las diferentes unidades. Mientras que en las unidades con SOE, la pantalla lambertiana se colocó a la salida del SOE, en la unidad sin SOE, la pantalla receptora de la imagen permaneció fija en la posición óptima.

Por otro lado, analizando los patrones de la unidad sin SOE, se encontró un desplazamiento del pico de irradiancia en tendencia opuesta para cada una de las subcélulas a medida que se incrementaba el sombreado. Esto puede explicarse considerando la aberración cromática de la lente Fresnel de PMMA producida por la dependencia del índice de refracción con la longitud de onda. De este modo, las longitudes de onda más cortas tienden a focalizarse antes de alcanzar a la célula solar, mientras que las más largas se focalizan posteriormente. Consecuentemente, las longitudes de onda más cortas impactan la superficie de la TJSC están principalmente localizadas en el mismo lado del sombreado producido sobre el POE, en cambio las más largas impactan principalmente el lado opuesto. Por tanto, el sombreado reduce la irradiancia sobre la subcélula *top* en el lado opuesto, y en el mismo lado sobre la subcélula *middle*.

Analizando los resultados se pudo concluir que el sombreado no sólo contribuye a reducir la uniformidad espacial, sino también introduce fenómenos espectrales adicionales. Además, se comprobó experimentalmente que las unidades que incorporaban un SOE presentaban un comportamiento más estable frente al sombreado. Siendo el SILO-Pyramid la unidad en la que se hace más evidente la mejora de la uniformidad espectral obteniéndose un valor SUR de 2.6 bajo un factor de sombreado del 80%.

El otro pilar sobre el que se sostiene esa tesis está relacionado con el diseño y modelado óptico del prototipo a UHCPV para su posterior fabricación y caracterización experimental en laboratorio. A continuación, se destacan las principales discusiones a tratar al respecto:

- **Estrategia tomada en el análisis paramétrico del prototipo a UHCPV**

En la publicación número 4, el módulo a UHCPV se realizó un análisis paramétrico del diseño de un prototipo a UHCPV, el cual comprendía concentraciones geométricas desde 2001x hasta 6057x. Se ha de tener en cuenta que a cada concentración geométrica le corresponde una longitud del POE y consecuentemente una diagonal del POE constante. Por tanto, cuando se adopta la estrategia número 1: mantener constante la C_g y variar el $f-number_{POE}$, el parámetro a modificar será la distancia focal del POE. Por otro lado, cuando se adopta la estrategia número 2: Mantener el $f-number_{POE}$ fijo y modificar la C_g , en este caso la distancia focal del POE es el parámetro a mantener constante.

A parte de esto, las dimensiones de los espejos secundarios SOEs han sido optimizadas para

cada combinación de C_g y $f\text{-number}_{POE}$, obteniéndose una relación de aspecto del SOE $f\text{-number}_{I-SOE}$ constante para cada C_g con una desviación global de $\pm 4\%$. El criterio elegido fue maximizar la eficiencia óptica siempre y cuando se mantenga una aceptación angular superior a $AA \pm 0.30^\circ$.

- **Discrepancia de los resultados simulados y caracterizados experimentalmente**

Posteriormente se fabricó y caracterizó experimentalmente, cuyos resultados se compararon con las simulaciones ópticas mediante trazado de rayos, entre las cuales se dieron resultados muy dispares. La concentración efectiva obtenida mediante el modelo óptico fue 1753 soles, lo que supone una eficiencia óptica de 58.1%. Por otro lado, la concentración obtenida en el laboratorio fue de 938 soles, siendo 31.1% la eficiencia óptica del concentrador caracterizado. Se realizaron diferentes mediciones para afirmar los siguientes posibles fenómenos causantes de estas pérdidas ópticas:

- Uno de los factores más limitantes de la corriente tiene que ver con las mayores pérdidas espectrales medidas en el laboratorio. Mediante el diagrama de limitación de corriente se obtuvo un ratio I_{sc}/DNI constante con el SMR hasta valores superiores a $SMR=1.12$. Esto indica una clara limitación en la subcélula top, debido a la mayor absorción en las superficies de aluminio del POE y SOE en este rango espectral.
- También se observó una discrepancia entre AA medida y modelada, 0.31° y 0.41° , respectivamente. Esta caída en los valores de AA es debida al efecto de las imperfecciones que presentan los elementos ópticos en sus superficies. Esto produce una dispersión en los rayos haciendo menos eficiente su concentración sobre el receptor CPV.
- Otro fenómeno observado fue el deficiente acoplamiento óptico entre célula y el TOE, se produce un derramamiento de la luz dentro de la superficie del PMMA que acaba por perderse y no impactar en la célula. Se comprobó experimentalmente que el pegado y secado del elemento dieléctrico sobre la célula es fundamental para obtener un buen acoplamiento óptico y finalmente una buena eficiencia óptica.

Por los motivos anteriormente comentados también se observa una diferencia en los valores de los patrones de uniformidad simulados ($PAR_{TOP} = 4.0$ y $PAR_{MID} = 4.1$) y experimentales ($PAR_{TOP} = 2.2$ y $PAR_{MID} = 2.3$). No obstante, mantienen la misma tendencia en cuanto a similitud de valores PAR entre ambas subcélulas y la distribución de la luz, lo que hacen útil el análisis previo mediante simulación.

Capítulo 7: Conclusiones y líneas futuras de investigación

1. Conclusiones generales

Las conclusiones más relevantes en el desarrollo de esta tesis se detallan a continuación. Con relación al estudio del impacto de la no-uniformidad:

- Se diseñó un montaje experimental de medida robusto y fiable que permitió un análisis en profundidad del comportamiento de los dispositivos CPV bajo condiciones controladas y repetitivas de no-uniformidad. Este montaje experimental es muy versátil ya que permite realizar multitud de estudios pudiendo modificar por separado el espectro, la concentración, así como la uniformidad generada sobre los dispositivos fotovoltaicos. Además, permite analizar diferentes tipos de concentradores refractivos o reflexivos, evaluar el rendimiento de receptores con o sin óptica secundaria o introducir patrones de sombreado son algunas de las múltiples facetas de este valioso set-up.
- La caracterización de patrones de no uniformidad generada al modificar la distancia entre el receptor y la óptica concentradora evidenció una mayor no-uniformidad de la irradiancia presente en el sistema reflexivo, respecto al sistema refractivo. Sin embargo, la no-uniformidad espectral que caracteriza a los sistemas refractivos constituye solo un efecto residual en los sistemas reflexivos.
- Se demostró experimentalmente que la variación de la P_{mpp} en función de la distancia POE-receptor fueron inducidas principalmente por la degradación de la resistencia en paralelo aparente en el caso del sistema refractivo, mientras que en los sistemas reflexivos fue inducida mayormente por la degradación de la resistencia en serie aparente.

Con relación al estudio del impacto de la no-uniformidad sobre receptores con SOEs:

- Se puede concluir que la potencia máxima de los receptores CPV (considerando un caso sin SOE, un SOE RTP y un SOE SILO-Pyramid) disminuyen linealmente con el sombreado. Además, el sombreado produce pérdidas adicionales en la potencia debido a fenómenos de no-uniformidad.
- Los resultados indican que el sombreado no sólo contribuye a reducir la uniformidad espacial, sino también introduce fenómenos espectrales adicionales. Éstos últimos son los principales responsables de las pérdidas adicionales introducidas por el sombreado que minarán el rendimiento eléctrico del receptor CPV.
- El uso de SOEs contribuyó a reducir las pérdidas de sombreado. Los resultados mostraron que el SILO-Pyramid fue la unidad con mejor uniformidad espectral, mientras que el RTP presentó la mejor uniformidad espacial. En términos generales, el SILO-Pyramid evidenció el mejor comportamiento en relación a pérdidas de

potencia en condiciones de sombreado. De este modo, esta unidad mostró unas pérdidas promedio del 1.8 % inferiores a las obtenidas para el RTP y un 7.1 % menores a la unidad sin SOE.

Referente al estudio del prototipo a UHCPV, se destacan:

- Los diseños más compactos fueron los más eficientes independientemente de la concentración geométrica. Esto respalda la estrategia tomada en el diseño propuesto que es aumentar la compacticidad de los módulos, para reducir la cantidad de material empleado, carga apoyada sobre el seguidor solar, etc.
- El diseño final propuesto, fabricado con materiales económicos (PMMA y aluminio), consiste en un prototipo con una configuración geométrica de 3015x dado a la buena relación entre la eficiencia óptica y aceptación angular. El cual representa el módulo CPV con mayor concentración geométrica investigado experimentalmente que pudo encontrarse en la literatura.
- La caracterización del prototipo en el laboratorio evidenció una eficiencia óptica del 31%, una tolerancia angular al desalineamiento $AA \pm 0.30^\circ$ y una concentración efectiva de 938 soles.

2. Futuras líneas de investigación

Trabajos futuros en lo referente al estudio de la uniformidad se centrarán en el estudio de otras configuraciones ópticas basadas en diferentes tipos de POEs y SOEs, así como materiales y geometrías de diseño. También, se pretende investigar células compuestas por más capas, 4 o 5 uniones, ya que se espera que al aumentar el número de uniones la célula se vea más afectada por los efectos espectrales y por tanto cobre más relevancia homogeneizar la luz concentrada.

Considerando los resultados experimentales del prototipo UHCPV es valorable destacar el margen de mejora en la eficiencia óptica y consecuentemente la concentración efectiva obtenida. Con este propósito, será necesario llevar a cabo nuevos diseños que eliminen la limitación de corriente de la subcélula *top*, así como la de la baja eficiencia óptica. Por otro lado, se debe verificar la dispersión de la luz en las superficies ópticas, además de la solidez del acoplamiento óptico entre el TOE y la célula solar. De este modo, si se pretende incrementar la eficiencia óptica del prototipo serán necesarios o bien materiales con mayor calidad óptica o tratamientos superficiales adicionales, como por ejemplo mejor pulido de las superficies de aluminio, adhesión de capas anti-reflexivas a las superficies de PMMA y adhesión de capas con mayor reflectividad a las superficies de aluminio, etc. Otra línea de investigación con alto índice de impacto entre la comunidad científica consiste en verificar la posibilidad de escalar estos diseños a micro-concentradores y la viabilidad de su

fabricación.

3. Estatus de publicación de los artículos

Tabla 1. Estatus de publicación de los artículos.

Capítulo	Revista, Factor de impacto (IF)	Estatus	Posición de autoría
3. Generation, experimental characterization and simulation of non-uniformity patterns and their electrical impact on an MJSC	AIP Conference Proceedings IF: 0.42	Publicado	1
3. Generation, experimental characterization and simulation of non-uniformity patterns and their electrical impact on an MJSC	Solar Energy Materials and Solar cells IF: 6.98	Publicado	1
4. Introduction of homogenizing optics to alleviate the effects of non-uniformity on an MJSC	Energy IF: 6.08	En revisión	1
5. Design, optical modelling, manufacturing and experimental characterization of UHCPV concentrators.	Optics Express IF: 3.67	Publicado	2