



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL



**ESTUDIO, DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE
SISTEMAS HÍBRIDOS DE ALTA
CONCENTRACIÓN FOTOVOLTAICA Y
GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA**

PRESENTADA POR:

ÁLVARO VALERA ALBACETE

DIRIGIDA POR:

DR. EDUARDO FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ

DRA. FLORENCIA ALMONACID CRUZ

JAÉN, MAYO 2023

ISBN

UNIVERSIDAD DE JAÉN

CENTRO DE ESTUDIOS AVANZADOS EN CIENCIAS DE LA TIERRA, ENERGÍA Y
MEDIO AMBIENTE (CEACTEMA)

GRUPO INVESTIGACIÓN ADVANCES IN PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGY
(AdPVTech)

TESIS DOCTORAL

La memoria titulada: “ESTUDIO, DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE ALTA CONCENTRACIÓN FOTOVOLTAICA Y GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA” ha sido desarrollada en el Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra, Energía y Medio Ambiente (CEACTEMA), en el grupo de investigación Advances in Photovoltaic (AdPVTech), de la Universidad de Jaén, y es presentada por el aspirante al título de Doctor en Energías Renovables, Álvaro Valera Albacete, bajo la dirección del Dr. Eduardo Fernández Fernández y la Dra. Florencia Almonacid Cruz.

Jaén, mayo 2023

El doctorando:

Fdo. Álvaro Valera Albacete

Los directores de la Tesis:

Fdo. Dr. Eduardo Fernández Fernández

Fdo. Dra. Florencia Almonacid Cruz



Universidad de Jaén

TESIS DOCTORAL

ESTUDIO, DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE ALTA-
CONCENTRACIÓN FOTOVOLTAICA Y GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA

AUTOR

ALVARO VALERA ALBACETE

DIRECTORES

DR. EDUARDO FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ

DRA. FLORENCIA ALMONACID CRUZ

TRIBUNAL

Presidente:

Secretario:

Vocal:

Suplente:

Suplente:

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a Eduardo Fernández y a Florencia Almonacid por darme la oportunidad de trabajar con ellos y poder realizar una tesis doctoral en el campo de la energía solar fotovoltaica. Gracias por guiarme a través de este arduo camino y por transmitirme el buen hacer y la fascinación por la investigación.

Agradezco a todos/as mis compañeros/as y excompañeros/as del grupo de investigación: Juan Pablo Ferrer, José Manuel Saura, Jesús Montes, María de los Ángeles Ceballos, João Gabriel, Álvaro Fernández, Pablo Sanmartín, Elmehdi Mouhib, Celia Outes, Luis Carlos, Antonio Villar, Sara Hernández y José Manuel Fernández, por ayudarme siempre que lo necesitaba y por compartir los buenos y los malos momentos vividos todos estos años.

Agradezco al profesor doctor Pedro Rodrigo Cruz por su colaboración y por toda su ayuda prestada durante realización de la tesis, la cuál ha sido fundamental para cumplir todos los objetivos.

A mi familia.

*Si puedes conservar la cabeza cuando a tu alrededor
Todos la pierden y te echan la culpa;
Si puedes confiar en ti mismo cuando los demás dudan de ti
Pero al mismo tiempo tienes en cuenta su duda;*

*Si puedes esperar y no cansarte de la espera,
O siendo engañado por quienes te rodean, no pagar con mentiras,
O siendo odiado, no dar cabida al odio,
Y no obstante, ni ensalzas tu juicio ni ostentas tu bondad.*

*Si puedes soñar y no dejar que los sueños te dominen;
Si puedes pensar y no hacer de los pensamientos tu objetivo;
Si puedes encontrarte con el Triunfo y la Derrota
Y tratar a estos dos impostores de la misma manera;*

*Si puedes hacer una pila con todos tus triunfos
Y arriesgarlo todo de una vez en un golpe de azar,
Y perder, y volver a comenzar desde el principio
Y no dejar escapar nunca una palabra sobre tu pérdida;*

*Si puedes hablar con la multitud y perseverar en la virtud,
O caminar junto a reyes sin perder tu sentido común.
Si ni los enemigos ni los buenos amigos pueden dañarte;
Si todos los hombres cuentan contigo, pero ninguno demasiado;*

*Si puedes llenar el preciso minuto
Con sesenta segundos de un esfuerzo supremo,
Tuya es la Tierra y todo lo que hay en ella,
Y, lo que, es más, serás un Hombre, ¡hijo mío!*

Rudyard Kipling

Tabla de Contenido

Lista de Figuras	12
Lista de Tablas	14
Lista de Acrónimos y Símbolos	15
Resumen	17
Abstract	19
PARTE I: DISERTACIÓN	21
1 INTRODUCCIÓN	23
1.1 Situación Global Energética	23
1.2 Descripción de la Tecnología CPV	24
1.3 Efecto termoeléctrico y su aplicación en sistemas híbridos.....	27
2 ANTECEDENTES	31
3 JUSTIFICACIÓN.....	37
4 OBJETIVOS	39
5 PUBLICACIONES.....	41
5.1 Relación de publicaciones.....	41
5.2 Conexión de las publicaciones con los objetivos propuestos.....	42
5.2.1 Objetivo 1. Analizar el estado del arte en sistemas híbridos de concentración y generación termoeléctrica.....	42
5.2.2 Objetivo 2. Estudio de sistemas de refrigeración pasiva en ultra alta concentración	43
5.2.3 Objetivo 3. Modelado numérico 3D y optimización de sistemas híbrido UHCPV-TEG	51
5.2.4 Objetivo 4. Fabricación y/o montaje de mono-módulo UHCPV-TEG y caracterización en condiciones reales de operación	55
5.3 Otras publicaciones relacionadas con la tesis	63
5.3.1 Publicaciones de congresos.....	64
6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	65
7 REFERENCIAS.....	69
PARTE II. COPIA DE PUBLICACIONES	75

Lista de Figuras

FIGURA 1. CAPACIDAD INSTALADA TOTAL Y GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD POR FUENTE EN EL ESCENARIO NZE, 2010-2050. FUENTE: AEI 2022 [1].	24
FIGURA 2. PARTES DE UN MÓDULO HCPV (IZQUIERDA). MÓDULOS HCPV COMERCIALES MONTADOS SOBRE UN SEGUIDOR SOLAR A DOS EJES (DERECHA).	25
FIGURA 3. PORCENTAJE DE ESPECTRO SOLAR ABSORBIDO POR CÉLULAS DE SILICIO (C-SI) Y CÉLULAS MULTI-UNIÓN (MJ).	25
FIGURA 4. EFICIENCIAS DE CÉLULAS SOLARES DESARROLLADAS A NIVEL DE LABORATORIO. FUENTE: FRANHOUFER ISE 2022. DATOS MAYO 2022 [5].	26
FIGURA 5. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL EFECTO SEEBECK (IZQUIERDA), EFECTO Peltier (DERECHA) EN UNA UNIÓN DE DOS MATERIALES SEMICONDUCTORES P Y N (TERMOPAR).	28
FIGURA 6. DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA PARA LAS SIMULACIONES DE REFERENCIA (6000×): A) GEOMETRÍA DEL RECEPTOR CPV Y DEL DISIPADOR DE CALOR CONSIDERADOS, B) SECCIÓN TRANSVERSAL DEL RECEPTOR PARA LA ESTIMACIÓN DE ΔT_z . C) PARTE TRASERA DISIPADOR DE CALOR PARA LA ESTIMACIÓN DE ΔT_{xy} .	44
FIGURA 7. TEMPERATURA MÁXIMA DE CÉLULA SOLAR EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN GEOMÉTRICA OBTENIDA EN LAS SIMULACIONES PARA DIFERENTES: A) ÁREAS DE CÉLULA, B) EFICIENCIAS DE CÉLULA, C) ESPESORES DEL DISIPADOR PLANO.	45
FIGURA 8. ESTRUCTURA DEL RECEPTOR HÍBRIDO CPV-TEG PROPUESTA PARA EL MODELO MATEMÁTICO.	46
FIGURA 9. EFICIENCIA GLOBAL DEL MÓDULO CPV-TEG (IZQUIERDA) Y EFICIENCIA DE TEG (DERECHA) EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN GEOMÉTRICA PARA VARIOS VALORES DE LA FIGURA DE MÉRITO ZT Y LA TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO DE LA CÉLULA PARA LOGRAR LA MÁXIMA EFICIENCIA. DISIPADOR DE CALOR=0.5 K/W, F=0.7, $k_{TEG}=1.5 \text{ W/(MK)}$, L=B=0.5 MM.	47
FIGURA 10. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO CPV-TEG EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE COSTES EN COMPARACIÓN CON EL MÓDULO CPV, PARA VARIOS VALORES DE ZT Y TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO DE LA CÉLULA.	48
FIGURA 11. ESPECTRORADIÓMETRO SOLARSIM-D2 DE SPECTRAFY JUNTO CON SENSOR ISOTYPES (IZQUIERDA) Y ESTACIÓN METEOROLÓGICA GEÓNICA 3000C (DERECHA) SITUADA EN LA TERRAZA DEL CEACTEMA (UNIVERSIDAD DE JAÉN).	49
FIGURA 12. ENERGÍA PRODUCIDA POR UNIDAD DE ÁREA DE CONCENTRADOR ÓPTICO, PARA CADA UNO DE LOS 5 SISTEMAS ANALIZADOS, CONSIDERANDO 4 MESES DE EJEMPLO.	50
FIGURA 13. EFICIENCIAS GLOBALES PROMEDIADAS MENSUALMENTE (ARRIBA) Y EFICIENCIAS DE TEG (ABAJO) PARA LOS DISPOSITIVOS ANALIZADOS.	51
FIGURA 14. RESULTADO DE LA SIMULACIÓN CON PARÁMETROS DE CASO DE REFERENCIA DE (A) CAMPO POTENCIAL Y (B) CAMPO DE TEMPERATURA. CONDICIONES: $A_{CELL} = 1 \times 1 \text{ mm}^2$, $C_{GEO} = 2000x$, $TC = -0.05 \text{ \%/K}$, $AR(TEG/CELL) = 13$, $TE \text{ FILL-FACTOR} = 0.5$, $TE \text{ LEG HEIGHT} = 1 \text{ mm}$, $R_{TH,COOL} = 5 \text{ K/W}$, $T_{AIR} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $DNI = 900 \text{ W/m}^2$ (CSOC).	52
FIGURA 15. PORCENTAJE NORMALIZADO DEL IMPACTO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO SOBRE EL REI_{TMM} .	53
FIGURA 16. MEJORA DE LA EFICIENCIA RELATIVA NO COINCIDENTE CON LA TEMPERATURA EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE EFICIENCIA DE TEMPERATURA DE LA CÉLULA SOLAR EN DIFERENTES ÁREAS ACTIVAS DE CÉLULA, CONSIDERANDO VALORES DE $ZT \approx 2.4$ (ROJO) Y $ZT \approx 1$ (AZUL).	54
FIGURA 17. MEJORA DE LA EFICIENCIA RELATIVA NO COINCIDENTE CON LA TEMPERATURA (AZUL) Y EFICIENCIA HÍBRIDA (ROJO) EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN GEOMÉTRICA, CONSIDERANDO VALORES DE $ZT \approx 2.4$ (CÍRCULO) Y $ZT \approx 1$ (TRIÁNGULO). CONDICIONES: $A_{CELL} = 1 \times 1 \text{ mm}^2$, $AR = 13$, $TC = -0.05 \text{ \%/K}$ Y $R_{TH} = 5 \text{ K/W}$.	54

FIGURA 18. CARACTERIZACIÓN DEL ENSAMBLAJE DEL RECEPTOR HÍBRIDO CPV-TEG EN EL SIMULADOR SOLAR DE ÁREA PEQUEÑA CLASE ABB ORIEL LCS-100 (IZQUIERDA). REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA MEDICIÓN EN INTERIORES CON EL SIMULADOR SOLAR DE ÁREA PEQUEÑA CLASE ABB (DERECHA).	56
FIGURA 19. MONO-MÓDULO UHCPV-TEG CON DIFERENTES MÁSCARAS DE LENTES PARA CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA INTERIOR (IZQUIERDA). REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA MEDICIÓN EN INTERIORES CON <i>MULTI-FLASH SOLAR SIMULATOR</i> HELIOS 3198 UTILIZANDO DIFERENTES MÁSCARAS DE LENTES (DERECHA). ...	57
FIGURA 20. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL MONTAJE DE MEDIDA EXTERIOR (ARRIBA). IMAGEN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN EXTERIOR (ABAJO A LA IZQUIERDA). IMAGEN DEL MONOMÓDULO UHCPV-TEG PARA LA CARACTERIZACIÓN EXTERIOR (ABAJO-DERECHA).	58
FIGURA 21. ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA SUPERFICIAL POR ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS EN OPERACIÓN OC CON TEG MÓDULO A. CONDICIONES: $DNI = 900 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{AIR}} = 20^\circ\text{C}$, $U_{\text{WIND}} = 2 \text{ m/s}$, $C_x = 800$ SOLES.....	59
FIGURA 22. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE CORRIENTE-VOLTAJE DEL MONO-MÓDULO UHCPV-TEG CON DIFERENTES MÁSCARAS DE LENTES MEDIDAS EN EL SIMULADOR SOLAR <i>MULTI-FLASH</i>	60
FIGURA 23. VARIACIÓN EXTERIOR DIURNA DE TEMPERATURAS Y DNI (IZQUIERDA), EFICIENCIAS Y RELACIÓN DE POTENCIA TEG RESPECTO A LA POTENCIA GLOBAL (DERECHA) CONSIDERANDO TRES MÁSCARAS DE LENTES DIFERENTES: A) $C_{\text{GEO}} = 476\times$; B) $C_{\text{GEO}} = 1071\times$; C) $C_{\text{GEO}} = 2066\times$	61
FIGURA 24. RENDIMIENTO TÉRMICO Y ELÉCTRICO DEL SISTEMA CPV-TEG EN COMPARACIÓN CON EL SISTEMA CPV EN FUNCIÓN DE DNI, UTILIZANDO DOS MÁSCARAS DE LENTES: $C_{\text{GEO}} = 476\times$ (IZQUIERDA) Y $C_{\text{GEO}} = 1071\times$ (DERECHA): A) DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE LA CELDA SOLAR Y EL AMBIENTE; B) POTENCIA GLOBAL DE SALIDA; C) EFICIENCIA ELÉCTRICA GLOBAL. TAMBIÉN SE INDICA LA LÍNEA DE REGRESIÓN DE CADA CONJUNTO DE DATOS.....	62

Lista de Tablas

TABLA 1. INFORMACIÓN DE LAS PUBLICACIONES	41
TABLA 2. PUBLICACIONES RELACIONADAS CON EL OBJETIVO 2.....	43
TABLA 3. PARÁMETROS DE DISEÑO Y VALORES DE RENDIMIENTO EN CSOC DE LOS RECEPTORES DE CÉLULAS SOLARES SELECCIONADOS.	49
TABLA 4. LISTA DE PUBLICACIONES RELACIONADAS CON EL OBJETIVO 3.....	51
TABLA 5. LISTA DE PUBLICACIONES RELACIONADAS CON EL OBJETIVO 4.....	55
TABLA 6. LISTADO DE OTRAS PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA TESIS.....	63

Lista de Acrónimos y Símbolos

ABS	<i>Acrilonitrilo Butadieno Estireno</i>	
CPV	<i>Concentrator Photovoltaic</i>	
CSOC	<i>Concentrator Standard Operating Conditions</i>	
DBC	<i>Direct Bonded Copper</i>	
DNI	<i>Direct Normal Irradiance</i>	
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>	
MEF	<i>Método Elementos Finitos</i>	
LCOE	<i>Levelized Cost Of Electricity</i>	
MJ	<i>Multi Junction</i>	
NZE	<i>Net Zero Emmisions</i>	
OPC	<i>Optical Power Converter</i>	
PV	<i>Photovoltaic</i>	
SMR	<i>Spectral Matching Ratio</i>	
SOE	<i>Secondary Optical Element</i>	
SOG	<i>Silicon on Glass</i>	
STC	<i>Standard Test Condition</i>	
TC	<i>Temperature Coeficient</i>	
TCJ	<i>Thermo-Couple type J</i>	
TEG	<i>Thermo-Electric Generator</i>	
TIM	<i>Thermal Interface Material</i>	
UHCPV	<i>Ultra-High Concentrator Photovoltaic</i>	
3JSC	<i>Triple Junction Solar Cell</i>	
A_{cell}	Área efectiva de la célula solar	m ²
C_{geo}	Concentración geométrica	-
C_x	Concentración efectiva	sol
k	Conductividad térmica del material	W/mK
$P_{CPV-TEG}$	Potencia generada en el sistema híbrido	W
P_{TEG}	Potencia generada por el dispositivo termoeléctrico	W
P_{CPV}	Potencia generada por la célula de concentración	W
Q_{wasted}	Transferencia de calor excedente de la célula solar	W
S	Coefficiente de Seebeck	V/K
SF	Índice del factor espectral	-
T_{cell}	Temperatura de operación de la célula solar	K
T_{3JSC}	Temperatura máxima de célula solar de triple unión	K
TC	Coefficiente de temperatura	%/K
ZT	Figura de mérito adimensional del material termoeléctrico	-
η_{CPV}	Eficiencia del sistema de concentración fotovoltaico	%
η_{opt}	Eficiencia del conjunto de elementos ópticos	%
η_{TEG}	Eficiencia del sistema de generación termoeléctrica	%

Resumen

Hoy día la tecnología fotovoltaica (PV) tiene un papel fundamental en la sociedad debido a su capacidad para aumentar la contribución de las energías renovables a la generación de electricidad de forma sostenible y a bajo coste. Existen multitud de líneas de investigación para desarrollar y mejorar esta tecnología, una de ellas es producir energía extra mediante la combinación de la fotovoltaica de concentración (CPV) y la generación termoeléctrica (TEG). Esta Tesis Doctoral pretende ser una contribución al desarrollo de la tecnología híbrida de concentración fotovoltaica y generación termoeléctrica (CPV-TEG) aportando conocimiento sobre estos sistemas y proponiendo nuevas ideas y estrategias para aumentar su eficiencia, reducir costes de producción, y conseguir reducir finalmente los costes de generación de electricidad.

Para alcanzar este objetivo, en primer lugar, se han planteado diferentes estrategias de enfriamiento para los sistemas de ultra alta concentración ($> 2000\times$) solar fotovoltaica (UHCPV). El uso de disipadores de calor de placa plana para enfriamiento pasivo, pese a no ser la forma más efectiva, sí es la más sencilla y más barata de disipar el calor. En este trabajo, se utiliza un modelo térmico 3D de elementos finitos para investigar las posibilidades de los estos disipadores de calor trabajando a niveles de concentración no alcanzados hasta la fecha, 2000-10000 soles. Se evalúan y analizan parámetros críticos como el área y la eficiencia de la célula solar, el espesor del sustrato, el área y el material del disipador de calor. Los resultados muestran para células solares de $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ de área o menor, se pueden utilizar disipadores planos de calor convencionales de aluminio para concentraciones de hasta 10000 soles.

Paralelamente, se han analizado los límites teóricos de rendimiento y reducción de costes que se pueden lograr con un diseño propuesto de receptor híbrido con enfriamiento pasivo. Para esto, se ha desarrollado un modelo matemático eléctrico/térmico/económico que se empleó para formular y resolver varios problemas de optimización de la eficiencia y la reducción de costes del sistema híbrido. Con materiales termoeléctricos avanzados y para una temperatura de célula de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, se puede lograr una eficiencia máxima del sistema híbrido del 39.2 % para un factor de concentración de $800\times$, mediante el uso de disipadores de calor de baja resistencia térmica, y se puede lograr una reducción máxima de costes del 46.0 % para factor de concentración máximo analizado ($1900\times$) mediante el uso de disipadores de calor de resistencia térmica moderada.

Posteriormente, se utilizará el modelo numérico descrito junto con datos atmosféricos reales de Jaén, incluyendo irradiación, temperatura y datos espectrales, para analizar el comportamiento de cuatro diseños de módulos híbridos CPV-TEG: bajo ZT-baja temperatura (A), bajo ZT- alta temperatura (B), alta ZT-baja temperatura (C) y alta ZT-alta temperatura (D). Este comportamiento se compara con el de un módulo fotovoltaico de concentración típico. Los resultados muestran que, mientras que la eficiencia global en condiciones de referencia del sistema híbrido se puede mejorar hasta en un 4.75 %, la eficiencia global si se consideran el promedio anual solo se puede aumentar hasta en un 4.30 %.

Por otro lado, el uso de herramientas de simulación 3D mediante elementos finitos resulta útil a la hora de diseñar y analizar cómo se comportaría sistema híbrido, por lo que se implementó un modelo 3D detallado de un receptor híbrido CPV-TEG. Con este modelo se evaluó la influencia de una serie de parámetros de diseño como el área de la célula solar, el coeficiente de eficiencia de la temperatura, la relación del área, la altura del termoelemento, el

factor de llenado y la figura de mérito ZT o la resistencia térmica del intercambiador de calor. Con esta información se evaluó numéricamente el rendimiento de un receptor solar híbrido óptimo suponiendo el uso de micro-células de $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ con coeficiente de temperatura extremadamente baja, trabajando a 4000 soles de concentración. Los resultados demuestran que el uso de generadores termoeléctricos con un alto ZT (> 2) se podría mejorar la eficiencia de un receptor CPV convencional, usando la misma célula solar a la misma concentración, hasta un 10.8 % relativo. La temperatura máxima alcanzada en estas condiciones fue de $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Por último, mediante los medios disponibles en laboratorio, se diseñó, fabricó y probó un mono-módulo CPV-TEG a ultra alta concentración, tanto en condiciones controladas de laboratorio como en condiciones reales de funcionamiento en exterior. Para la caracterización *indoor* se utilizaron un simulador solar de luz constante para bajas concentraciones efectivas de 1.3 a 17.2 soles y un simulador *multi-flash* para concentraciones geométricas de 476x a 3600x. Los experimentos en condiciones reales de funcionamiento a sol real alcanzaron niveles de concentraciones entre 476x y 2066x. También se midió en condiciones reales de funcionamiento al aire libre un mono-módulo de CPV equivalente sin hibridar con fines comparativos. La caracterización experimental del prototipo mostró que algunos valores optimistas utilizados en las predicciones teóricas (como los coeficientes de temperatura de la célula solar, la eficiencia termoeléctrica o la eficiencia óptica de los concentradores convencionales) no se pueden cumplir con los componentes disponibles comercialmente en la actualidad. Los resultados de las mediciones al aire libre muestran un comportamiento energético similar del sistema híbrido en comparación con el sistema convencional a concentraciones 476x. Para concentraciones más altas, el rendimiento del sistema híbrido es más pobre que el del sistema convencional debido a una degradación más rápida del comportamiento óptico, térmico y eléctrico. La célula solar se dañó cuando alcanzó los $194 \text{ }^\circ\text{C}$ a una concentración de 2066x. El estudio arroja luz sobre los límites de la tecnología actual e identifica áreas de investigación de mejora: sistemas ópticos para ultra alta concentración, células solares con un rango de temperatura de operación más amplio y menores pérdidas de temperatura y resistencia en serie, generadores termoeléctricos con figura de mérito más alta e innovadores sistemas de refrigeración.

Abstract

Today, photovoltaic (PV) technology plays a fundamental role in society due to its ability to increase the contribution of renewable energies to the generation of electricity in a sustainable and low-cost manner. There are many lines of research to develop and improve this technology, one of which is to produce extra energy by combining concentrated photovoltaics (CPV) and thermoelectric generation (TEG). This Doctoral Thesis aims to be a contribution to the development of hybrid concentration photovoltaic and thermoelectric generation (CPV-TEG) technology, providing knowledge about these systems and proposing new ideas and strategies to increase their efficiency, reduce production costs, and finally reduce costs. electricity generation costs.

To achieve this purpose, first of all, different cooling strategies have been proposed for ultra-high concentration ($> 2000\times$) solar photovoltaic (UHCPV) systems. Using flat-plate heat-sinks for passive cooling, while not the most effective, is the easiest and cheapest way to dissipate heat. In this work, a 3D finite element thermal model is used to investigate the possibilities of these heat sinks working at concentration levels not reached to date, 2000-10000 suns. Critical parameters such as solar cell area and efficiency, substrate thickness, heat sink area and material are evaluated and analyzed. The results show for solar cells $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ in area or less, conventional flat aluminum heat sinks can be used for concentrations up to 10,000 suns.

In parallel, the theoretical limits of performance and cost reduction that can be achieved with a proposed hybrid receiver design with passive cooling have been analyzed. For this, an electrical/thermal/economic mathematical model has been developed that was used to formulate and solve various efficiency optimization and cost reduction problems of the hybrid system. With advanced thermoelectric materials and for a cell temperature of $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, a maximum hybrid system efficiency of 39.2% can be achieved at a concentration factor of $800\times$, through the use of low thermal resistance heat sinks, and You can achieve a maximum cost reduction of 46.0% for maximum tested concentration factor ($1900\times$) by using heat sinks of moderate thermal resistance.

Subsequently, the numerical model described together with real atmospheric data from Jaén, including irradiation, temperature and spectral data, will be used to analyze the behaviour of four hybrid CPV-TEG module designs: under ZT-low temperature (A), under ZT- high temperature (B), high ZT-low temperature (C) and high ZT-high temperature (D). This behaviour is compared to that of a typical concentrating PV module. The results show that, while the global efficiency in reference conditions of the hybrid system can be improved by up to 4.75%, the global efficiency if the annual average is considered can only be increased by up to 4.30%.

On the other hand, the use of 3D simulation tools using finite elements is useful when designing and analyzing how a hybrid system would behave, so a detailed 3D model of a hybrid CPV-TEG receiver was implemented. With this model, the influence of a series of design parameters such as the area of the solar cell, the temperature coefficient of efficiency, the area ratio, the height of the thermocouple, the fill factor and the figure of merit ZT was evaluated. or the thermal resistance of the heat exchanger. With this information, the performance of an optimal hybrid solar receiver was numerically evaluated assuming the use of micro-cells of $0.5 \times 0.5\text{ mm}^2$ with an extremely low temperature coefficient, working at 4000 soles of

concentration. The results show that the use of thermoelectric generators with a high ZT (> 2) could improve the efficiency of a conventional CPV receiver, using the same solar cell at the same concentration, up to 10.8 % relative. The maximum temperature reached under these conditions was 150 °C.

Finally, using the material resources available in the laboratory, a CPV-TEG mono-module was designed, manufactured and tested under ultra-high concentration, both indoors and outdoors in the laboratory. The indoor experiments used a constant light solar simulator for low effective concentrations of 1.3 to 17.2 suns, while the multi-flash simulator was employed to characterized the mono-module at geometric concentrations of 476× to 3600×. Outdoor experiments covered concentrations between 476× and 2066×. An equivalent CPV mono-module was also tested outdoors for comparison purposes. The experimental characterization of the prototype showed that some optimistic values used in the theoretical predictions (such as the temperature coefficients of the solar cell, the thermoelectric efficiency or the optical efficiency of the conventional concentrators) cannot comply with the currently commercially available components. The results of the outdoor measurements show a similar energy behaviour of the hybrid system compared to the conventional system at 476×. For higher concentrations, the performance of the hybrid system is poorer than that of the conventional system due to faster degradation of optical, thermal and electrical performance. The solar cell was damaged when it reached 194°C at 2066× outdoors. The study sheds light on the limits of current technology and identifies research areas for improvement: optical systems for ultra-high concentration, solar cells with a wider operating temperature range and lower temperature and resistance losses in series, thermoelectric generators with highest figure of merit and innovative refrigeration systems.

PARTE I: DISERTACIÓN

Esta primera parte se ha dividido en distintas secciones. En la primera de ellas se presenta el estado actual de la fotovoltaica dentro del contexto mundial energético y se realiza una breve introducción de las tecnologías que constituyen los sistemas híbridos que son objeto de estudio en la presente tesis: la concentración fotovoltaica (CPV) y la generación termoeléctrica (TEG). A continuación, se realiza una profunda revisión de las investigaciones previas que se han realizado en el campo de los sistemas híbridos de concentración fotovoltaica y termoeléctricos (CPV-TEG), tanto en materia de modelado, diseño y caracterización de estos sistemas. Esta revisión ha permitido identificar las barreras tecnológicas que presenta esta tecnología, y exponer, en consecuencia, las motivaciones que justifican la realización de la presente Tesis Doctoral y el planteamiento de los objetivos que se han pretendido alcanzar con la realización de la misma, en las secciones tercera y cuarta. En la sección 5 se presentan las publicaciones más relevantes donde se han publicado los resultados alcanzados, y la metodología empleada para alcanzar los objetivos que se plantearon. Finalmente, las conclusiones que se han alcanzado, así como las líneas futuras de trabajo que se plantean son expuestas y detalladas.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Situación Global Energética

En los últimos años, importantes eventos como la pandemia mundial de COVID-19 o la guerra en Ucrania, junto con la fuerte dependencia de nuestro sistema energético de combustibles fósiles, han afectado de forma significativa al sistema energético global, alterando los patrones de oferta y demanda del mercado energético, así como las relaciones comerciales entre países. En 2019, el consumo global de energía primaria registrada fue de 174284 TWh, siendo el 78.1 % de esta energía producida por tecnologías basadas en combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas); el 17.8 % generado por tecnologías de generación renovables (hidráulica, eólica, solar, biomasa y otros); y el 4.1 % restante producido por energía nuclear [1]. El uso excesivo de combustibles fósiles implica una futura escasez de recursos energéticos a medio y largo plazo, así como un aumento de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Dichas emisiones han aumentado el conocido efecto invernadero hasta el punto de provocar un cambio climático mundial por causas antropogénicas cuyos efectos se están manifestando en la actualidad: grandes periodos de sequías, aumentos récord de temperatura, desaparición de especies, escasez de alimentos, aumento de riesgos para la salud, entre otros [2]. Otro problema asociado a la escasez de combustibles fósiles y a los mercados internacionales es la pobreza energética, por la que muchos hogares no pueden satisfacer sus necesidades básicas de confort y bienestar. La seguridad energética y los objetivos climáticos son, por tanto, una cuestión crítica tanto para los responsables políticos como para la sociedad en general.

A pesar de este escenario de escasez de recursos de carácter fósil, se prevé que la demanda de energía global siga aumentando en más del 1.4 % anual hasta 2030, representando China e India la mitad de ese crecimiento [1], [3]. Ante esta creciente demanda de energía y la dependencia manifiesta de los combustibles fósiles con las consecuencias negativas que conllevan para el medio ambiente y para la sociedad, los países de la OCDE están apostando por una electrificación acelerada del sistema energético que facilite el terreno para la transición hacia un sistema basado en el uso de fuentes limpias de energía renovable. La generación de electricidad en 2021 a nivel mundial fue un 61.8 % producida por combustibles fósiles, un 9.85 % de origen nuclear y un 28.35 % mediante tecnologías de producción renovables.

La Agencia Internacional de la Energía (AIE) propone una serie de medidas energéticas, dirigidas a los organismos gubernamentales, para un escenario futuro *Net Zero Emissions* (NZE) donde se establece como objetivo limitar el aumento de la temperatura global media de 1.5 °C para 2050 [1], [3], [4]. La previsión de la AIE (ver Figura 1) muestra como la energía eólica y solar fotovoltaica representan casi el 90 % del aumento en la generación de electricidad para el 2050. La capacidad instalada de energía solar fotovoltaica superará los 5200 GW para 2030, mientras que las instalaciones eólicas superarán los 3300 GW para 2030. Se espera que la generación total de carbón caiga drásticamente del 37 % en 2019 al 11 % en 2030, antes de eliminarse por completo para 2050. El gas natural proporcionará el 16% de las necesidades totales de electricidad en 2030, en comparación con el 24 % en 2019. La capacidad de generación de combustible nuclear se mantendrá estable en alrededor del 10 % de la capacidad instalada total [1]. Asia continuará dominando el mercado, con expansiones concentradas en India y China. La región representará aproximadamente el 50 % de la capacidad fotovoltaica solar instalada en el mundo en 2030. Se prevé que Europa y Norte América representen el 19 % y el 14 % de la capacidad instalada a nivel mundial para 2030 respectivamente. Para lograr esto, América del

Norte requerirá instalaciones anuales de 90 GW y Europa necesitará instalar 55 GW cada año para 2030 [6]. Se prevé pues que la energía solar fotovoltaica y la eólica marcarán el camino hacia el escenario NZE [1], [3], [4].

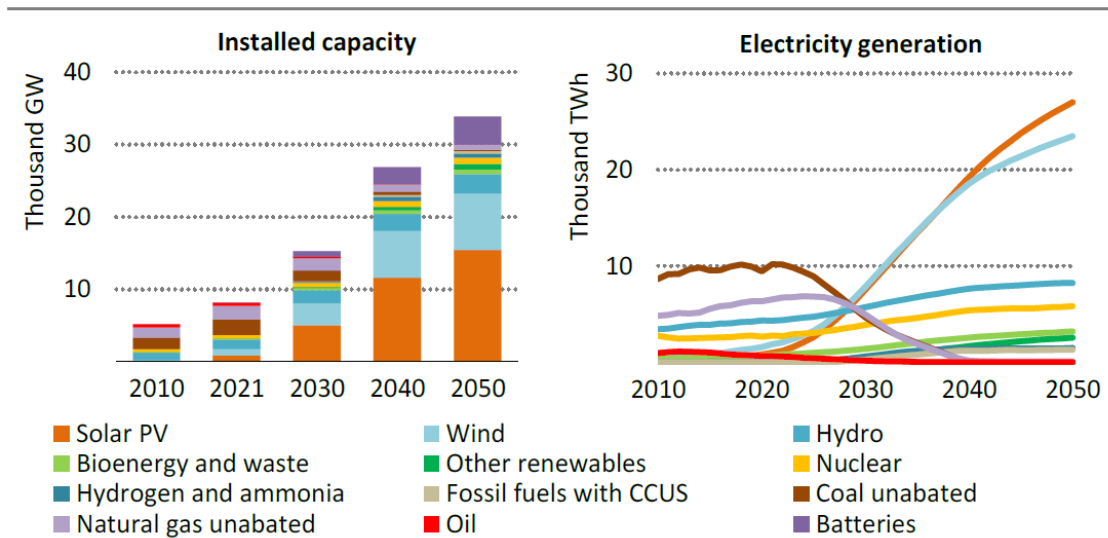


Figura 1. Capacidad instalada total y generación de electricidad por fuente en el escenario NZE, 2010-2050. Fuente: AEI 2022 [1].

1.2 Descripción de la Tecnología CPV

Dentro de las energías renovables, la energía solar fotovoltaica ha sido la tecnología que más rápido ha aumentado su capacidad instalada en los últimos años. La tecnología basada en células de silicio cristalino (c-Si) representó más del 95 % de la producción total en 2021, en particular la tecnología de silicio mono-cristalino (m-Si) que representó aproximadamente el 84 %. Sin embargo, de entre todas las tecnologías solar fotovoltaicas, la energía solar de concentración (CPV) es la que ha logrado las mayores eficiencias de conversión eléctrica (30% - 35% a nivel de módulo) [5]. Esta tecnología se basa en uso de elementos ópticos para concentrar la luz solar en una pequeña área donde se sitúa una célula solar, reduciendo de esta forma la cantidad de material semiconductor necesario. En la Figura 2 podemos ver las principales partes de las que se compone un módulo CPV: (1) elemento óptico primario (POE) los cuales pueden ser de espejos parabólicos (reflectivos) o lentes Fresnel (refractivos); (2) elemento óptico secundario (SOE) para mejorar la aceptación angular y la uniformidad de la luz en la superficie de la célula; (3) célula solar multi-unión (MJ); (4) mecanismo de refrigeración para eliminar el calor excedente y mantener la temperatura de operación de la célula solar en niveles aceptables; (5) sistema de seguimiento solar a dos ejes para mantener la superficie óptica primaria perpendicular a la radiación solar en todo momento [6]. Cuando se habla de concentración, normalmente se hace referencia a la concentración geométrica, que es la relación entre el área de apertura de la luz del POE y el área activa de la célula solar. Mientras que la concentración efectiva es la cantidad de radiación final que recibe la célula solar una vez descontadas las pérdidas ópticas y se mide en soles. Dependiendo del nivel de concentración, los sistemas de CPV se pueden clasificar en concentración baja (< 10 soles), media (10 – 100 soles), alta (100 – 2000 soles) y ultra alta (> 2000 soles) [6].

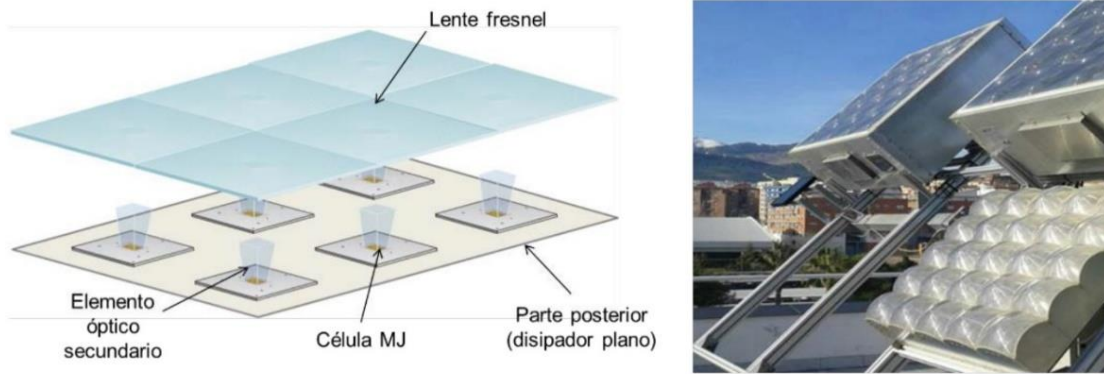


Figura 2. Partes de un módulo HCPV (izquierda). Módulos HCPV comerciales montados sobre un seguidor solar a dos ejes (derecha).

Tanto el POE como el SOE son responsables de la relación de concentración, el ángulo de aceptación, la uniformidad de la irradiación y, en última instancia, de la eficiencia del módulo CPV:

$$P_{CPV} = \eta_{Opt} \cdot C_{geo} \cdot DNI \cdot \eta_{Cell} \cdot A_{Cell} \quad (1)$$

Donde η_{Opt} y C_{geo} es la eficiencia óptica y la concentración geométrica del concentrador óptico; DNI es la irradiación normal directa; η_{Cell} es la eficiencia de la célula; y es el área efectiva de la célula. Las eficiencias de los elementos ópticos incorporados en los módulos CPV suelen rondar estar entre el 80-90 % [7], [8]. La tecnología CPV, y especialmente la de alta concentración (HCPV), ha demostrado una notable capacidad para conseguir un alto rendimiento energético y un bajo coste de la electricidad [9], sobretodo en lugares con altos niveles (más de 2000 kWh/m²año) de irradiación normal directa (DNI) [10].

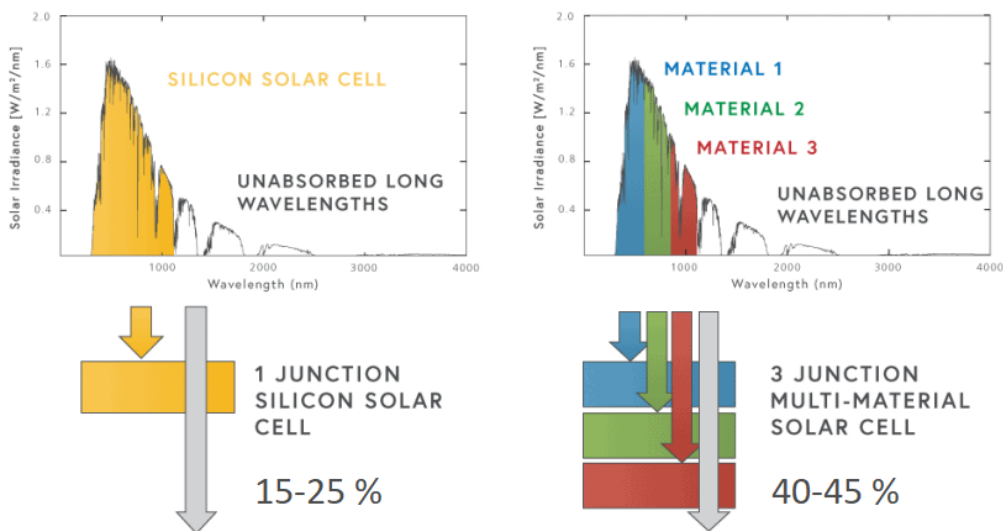


Figura 3. Porcentaje de espectro solar absorbido por células de silicio (c-Si) y células multi-uni3n (MJ).

Uno de los beneficios de la HCPV respecto a la fotovoltaica convencional es la reducci3n de material semiconductor necesario para la fabricaci3n de los m3dulos, que se sustituye por los dispositivos 3pticos, m3s baratos. Por otro lado, la principal ventaja de la HCPV frente a la PV convencional radica en la tecnolog3a de las células solares utilizadas en concentraci3n. En el caso

de la tecnología de alta concentración fotovoltaica, la reducción del material semiconductor va permitir el uso de las células III-V multi-unión (MJ) que aprovechan de forma más eficiente la distribución espectral de la radiación solar incidente. El espectro solar incidente se encuentra aproximadamente entre 280 nm y 4000 nm. Para una célula basada en tecnología de Si cuya respuesta espectral se encuentra entre 300 nm y 1200 nm en el mejor de los casos, los fotones para longitudes de onda mayores de 1200 nm, se disipan como calor residual cuando pasan a través del área activa (ver Figura 3). Mientras que fotones para longitudes de onda menores de 300 nm que son los más energéticos solo se pueden utilizar parcialmente [11]. En este sentido, la célula solar c-Si tiene un límite superior de conversión teórico que se estima que no supera el 30 %. En cambio, las células solares MJ usadas en sistemas CPV están formadas 2 o más sub-células de materiales semiconductores III-V apiladas en tándem, interconectadas en serie mediante diodos túnel. Estas sub-células permiten absorber un mayor rango del espectro. Las células solares MJ han alcanzado las eficiencias de conversión más altas de entre todas las aplicaciones fotovoltaicas terrestres (ver Figura 4). Se han registrado eficiencias del 44.4 % para una célula solar 3J y del 46 % para células solare 4J. El récord actual se encuentra en 47.1 % de eficiencia alcanzada mediante una célula 6J [12], [13]. A escala de módulo, se han alcanzado eficiencias récord que superan el 40 % a nivel de prototipo y el 30 % para diseños comerciales. A nivel de grandes sistemas o de plantas fotovoltaicas, las eficiencias se sitúan entre el 25-30 % [6], [14], [15].

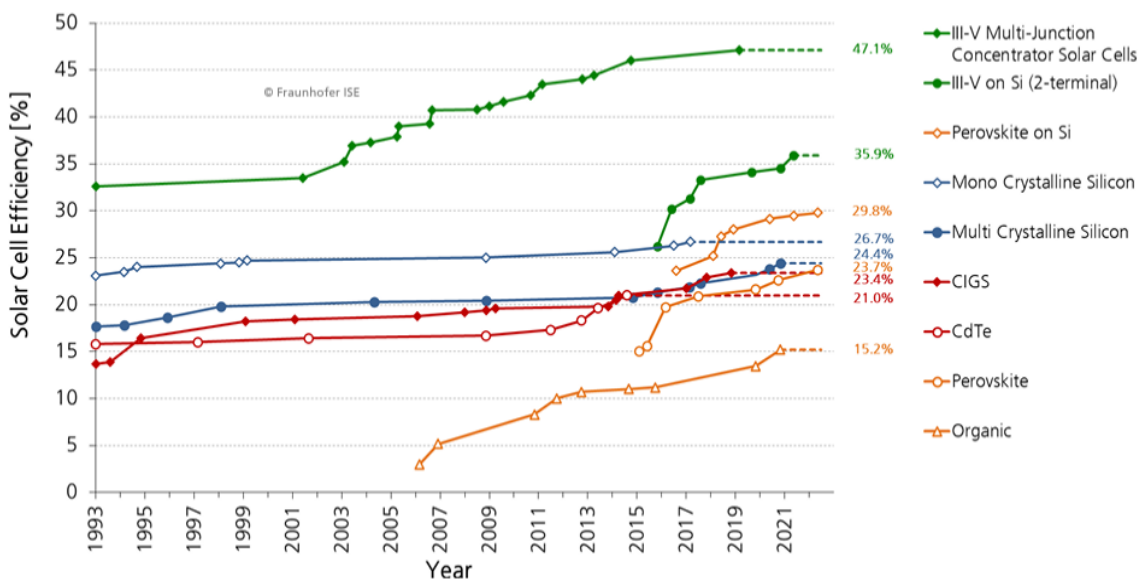


Figura 4. Eficiencias de células solares desarrolladas a nivel de laboratorio. Fuente: Franhoufer ISE 2022. Datos Mayo 2022 [5].

Otra propiedad intrínseca de las células MJ que las hacen técnicamente viables en CPV y HCPV, son los bajos coeficientes de temperatura (TC) que poseen. Este coeficiente indica cómo se degrada la eficiencia de la célula solar por cada grado de temperatura que aumente la temperatura de trabajo de la célula por encima de una temperatura de referencia. A partir de los valores en condiciones estándar (STC) para una determinada concentración efectiva (C_x), podemos conocer la eficiencia real de una célula solar dada una temperatura de operación determinada [6]:

$$\eta_{cell} = \eta_{STC}(C_x) \cdot SF \cdot [1 - TC \cdot (T_{cell} - T_{STC}^{25^{\circ}C})] \quad (2)$$

donde $\eta_{STC}(C_x)$ es la eficiencia medida a 25 °C tomada como referencia en función de la concentración efectiva; SF es el factor espectral cuyo índice cuantifica el impacto diferentes respuestas espectrales de las sub-células de las células solares MJ; TC es el coeficiente de temperatura; T_{cell} es la temperatura de operación de la célula. Según podemos observar de diferentes fabricantes, un rango típico de TC para los módulos CPV está entre -0.15 y -0.34 %/K, mientras que la mayoría de los módulos de Silicio poseen TCs de alrededor de -0.3 a -0.5 %/K [6], [14].

Pese a las grandes eficiencias de conversión alcanzadas y los bajos TCs de las células MJ, cerca del 60 % de la radiación incidente es transformada en calor. Resulta crucial evacuar este calor excedente al ambiente, ya que la temperatura de trabajo de una célula solar puede llegar hasta los 100 °C, degradando la eficiencia de conversión de la misma, sobretodo en sistemas HCPV de alta concentración. La forma más común de evacuar este calor y reducir la temperatura de operación de la célula es mediante el uso de disipadores de calor de aletas de aluminio. Actualmente esta es la solución más empleada para los módulos comerciales [6].

1.3 Efecto termoeléctrico y su aplicación en sistemas híbridos

La termoelectricidad es una rama de la termodinámica donde se estudian los fenómenos de interacción entre calor y electricidad. Además del conocido efecto Joule, existen otros fenómenos físicos asociados a los dispositivos termoeléctricos como son el efecto Seebeck, el efecto Peltier y el efecto Thomson. Considerando la unión de dos materiales conductores diferentes (termopar), se conoce como efecto Seebeck a la generación de una fuerza electromotriz entre los extremos de los dos materiales cuando se aplica un gradiente de temperatura en la unión de ambos. Por el contrario, el efecto Peltier aparece cuando se aplica una diferencia de voltaje en los extremos de los dos materiales, generando en este caso una diferencia de temperatura entre la unión de ambos, y sus extremos (ver Figura 5). El efecto Thomson es una manifestación de la dirección del flujo de los portadores eléctricos con respecto a un gradiente de temperatura dentro de un material conductor. Estos portadores absorben energía térmica (calor) mientras fluyen en dirección opuesta a un gradiente de temperatura, aumentando así su energía potencial, mientras que cuando fluyen en la misma dirección que un gradiente térmico, liberan energía térmica, disminuyendo su energía potencial [16], [17]. Basándonos en estos principios, se pueden crear dispositivos termoeléctricos (TE) que generen calor a partir de electricidad o viceversa, permitiendo su uso en aplicaciones como medición de temperatura, recuperación de calor residual, aire acondicionado y/o refrigeración [18].

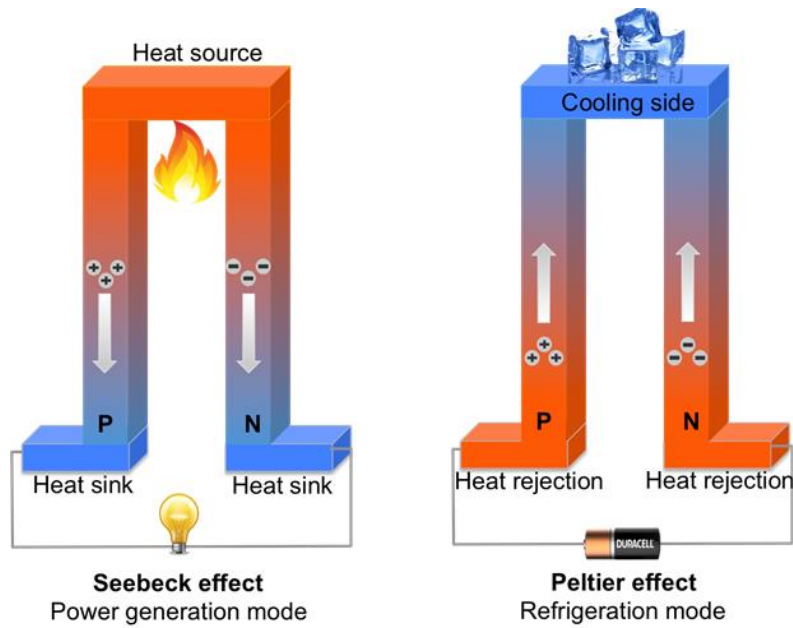


Figura 5. Representación esquemática del efecto Seebeck (Izquierda), efecto Peltier (derecha) en una unión de dos materiales semiconductores P y N (termopar).

Existe en la actualidad un gran interés por parte de la comunidad científica en la termoelectricidad debido a sus muchas ventajas, como alta escalabilidad, larga vida útil, operación de estado sólido sin partes móviles y sin reacciones químicas, cero emisiones o desechos sólidos, y prácticamente cero mantenimiento [19]. Por todo esto, los dispositivos TE resultan excepcionalmente útiles en el campo de la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de flujos o fuentes de calor residuales (cogeneración) [20]. A grandes rasgos, la potencia de un generador de energía termoeléctrico (TEG) va a depender pues de la tasa de calor transferido desde el lado caliente al lado frío del dispositivo TEG. De forma ideal, se puede escribir como:

$$P_{TEG} = Q_{hot} - Q_{cold} = \eta_{TEG} \cdot Q_{hot} \quad (3)$$

La eficiencia máxima del TEG está determinada principalmente por la eficiencia de Carnot y la figura de mérito adimensional (ZT):

$$\eta_{TEG,max} = \frac{T_{hot} - T_{cold}}{T_{hot}} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_{cold}}{T_{hot}}} \quad (4)$$

este valor ZT relaciona las 3 propiedades físicas del material termoeléctrico: conductividad eléctrica (σ), el coeficiente de Seebeck (S) y la conductividad térmica (k), de forma que ZT aumenta cuando existe una baja conductividad térmica, una alta conductividad eléctrica y alto coeficiente de Seebeck:

$$ZT = \frac{\sigma \cdot S^2}{k} \cdot T_{avg} \quad (5)$$

Los materiales más empleados actualmente en los dispositivos TE tienen un ZT de alrededor de 1 o menos, lo que supone eficiencias en torno al 4-6 % para aplicaciones de baja

temperatura (<200 °C). En las últimas décadas, el Teluro de Bismuto (Bi_2Te_3) ha sido el principal material utilizado en módulos termoeléctricos industriales. Para estos dispositivos, el valor promedio de ZT está entre 0.5 y 0.8 [20], [21]. La perspectiva para los investigadores es desarrollar materiales con un $\text{ZT}>2$ y obtener eficiencias superiores al 10 %. La forma tradicional de mejorar ZT es modificar la estructura cristalina del material [22]. Se puede disminuir la conductividad térmica mediante la aleación y/o inserción de distintos materiales que permitan mejorar las propiedades eléctricas. Otra forma es diseñar nuevos materiales con valores de conductividad térmica inherentemente bajos. A nivel de laboratorios se han desarrollado nuevos materiales termoeléctricos modificados tanto molecular como estructuralmente, a nivel micro y nano escalas, alcanzado valores record de ZT hasta 2.6 a temperaturas ambiente (300 K) [23], [24].

2 ANTECEDENTES

En esta sección se presenta una revisión del estado del arte de los sistemas híbridos fotovoltaicos y generación termoeléctrica (PV-TEG) encontrados hasta la fecha de finalización de esta Tesis. En primer lugar, se comentará algunos de los trabajos teóricos más relevantes llevados a cabo en materia de diseño y optimización de sistemas híbridos. Posteriormente, se analizarán los pocos estudios experimentales encontrados en la literatura.

En 2006 Vorobiev et al. presentaron su estudio sobre un sistema híbrido de concentración fotovoltaica y generación termoeléctrica (CPV-TEG) [25]. En dicho trabajo, se analizó de forma teórica el límite eficiencia de un sistema híbrido para dos configuraciones diferentes: (A) la célula fotovoltaica está acoplada al generador termoeléctrico; (B) la célula fotovoltaica está separada del generador termoeléctrico y la energía térmica del espectro solar es dividida para que parte del espectro sea absorbida por el material semiconductor de la célula fotovoltaica y otra parte sea absorbida por el generador termoeléctrico. Para la primera configuración el factor de concentración llegó hasta 50 soles, mientras que con la segunda configuración se alcanzaron niveles de hasta 1500 soles. Como conclusión del estudio, se expuso que ambas configuraciones del sistema híbrido eran viables para aumentar la eficiencia global, estimando una eficiencia total de entre el 25 % - 30 % para el sistema (A) y entre el 30 % - 40 % para el sistema (B).

En 2011, Van Sark et al. publicaron un estudio donde mostraron los beneficios de la hibridación PV-TEG [26]. Considerando tecnologías de células fotovoltaicas de silicio de primera generación era posible obtener un incremento en producción eléctrica anual de del módulo fotovoltaico entre el 11-14.7 % a 25 °C.

Años más tarde, en 2014, Zhang et al. estudiaron el comportamiento distintas células fotovoltaicas trabajando a bajos niveles de concentración: célula fotovoltaica de silicio cristalino (c-Si), célula fotovoltaica de película fina de silicio (p-Si), célula solar de polímero y célula fotovoltaica de seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS), [27]. Los autores implementaron un modelo matemático adimensional basado en las ecuaciones de semiconductores y las leyes de transferencia de calor para la estimación de la temperatura de trabajo de la célula solar. A través de este modelo, se optimizaron el coeficiente de transferencia de calor por convección y la relación de concentración. Los resultados mostraron que los niveles más altos de eficiencia, del 24 %, se obtuvieron con la célula CIGS a 30 soles de concentración, y para un coeficiente de transferencia de calor de 1400 W/(m²K). En ese mismo año, Liao et al. plantearon un modelo teórico de un sistema híbrido de baja concentración basado en el circuito equivalente de un diodo [28]. Con este modelo, analizaron la influencia en la potencia de salida del dispositivo híbrido de varios factores clave como la conductividad térmica entre la célula CPV y el TEG, la corriente de célula solar, la irradiación solar, la relación de concentración y la figura de mérito del TEG. Para la estimación de la temperatura de célula se consideró un balance de energía en la superficie de absorción de la célula. Como conclusión de su trabajo, se determinaron los criterios óptimos de algunos parámetros clave. Descubrieron que el sistema generador híbrido CPV-TEG puede proporcionar no solo más energía eléctrica sino también una mayor eficiencia que un CPV aislado. La máxima eficiencia alcanzada fue del 15%, sin embargo, esta condición no se correspondía con la máxima potencia de salida del sistema híbrido.

En 2015 y 2016 se publicaron dos estudios muy interesantes donde se evaluaban los efectos de la ubicación geográfica de un sistema híbrido PV-TEG en distintas localidades europeas [29], [30]. Los resultados obtenidos mostraron que la célula fotovoltaica es la principal fuente de energía del sistema, incluso si la contribución del TEG es significativa, en las ciudades del sur de Europa. Concluyeron que el mayor rendimiento se obtiene para las ubicaciones con alta irradiación y baja temperatura ambiente. El sistema híbrido tenía un mejor rendimiento en el norte de Europa durante la primavera, al obtenerse una mayor diferencia de temperatura, y durante el verano en el sur de Europa debido en este caso a los altos niveles de irradiación. Los autores remarcaron la importancia de diseñar y optimizar el sistema híbrido teniendo en cuenta la ubicación final.

Algunos autores centraron sus trabajos en la hibridación de sistemas fotovoltaicos sin concentración [31], [32]. En 2015, Bjørk et al. estudiaron de forma analítica la integración dispositivos TEG con cuatro tipos diferentes de tecnologías de células PV: silicio cristalino (c-Si), silicio amorfo (a-Si), cobre-indio-galio-seleniuro (CIGS) y telurio de cadmio (CdTe) [31]. Los resultados mostraron que los sistemas híbridos producían menor potencia que las células aisladas, exceptuando la tecnología a-Si, cuya potencia global era ligeramente superior a la célula sin hibridar. La razón principal radica en los pequeños coeficientes de temperatura de las tecnologías fotovoltaicas convencionales y el bajo gradiente de temperatura que se puede lograr en la fotovoltaica sin concentración. Un módulo TEG acoplado térmicamente con una célula solar aumenta la resistencia térmica de la estructura, aumentando como consecuencia la temperatura de operación de la célula con respecto al sistema fotovoltaico sin TEG. Para los coeficientes de baja temperatura dados en los materiales fotovoltaicos convencionales, la degradación del rendimiento de la célula solar con la temperatura domina sobre las ganancias proporcionadas por el TEG. En 2018, los mismos autores estudiaron dos configuraciones de sistema híbrido PV-TEG sin concentración: (A) dispositivo TEG montado directamente en la parte posterior del fotovoltaico, (B) sistema en tándem en el que la luz solar entrante se divide y la radiación de longitud de onda corta se envía al fotovoltaico y la longitud de onda larga es absorbida por el TEG [32]. Para ello implementaron un modelo analítico basado en el límite de eficiencia de Shockley-Queisser para PV y TEG, en función del coeficiente de temperatura (TC) de la célula y de la figura de mérito (ZT). Concluyeron que la ganancia en eficiencia al agregar un TEG a un PV es solo de unos pocos puntos porcentuales, incluso para el caso ideal de $TC = 0$ y un módulo TEG extremadamente eficiente con un valor ZT muy alto.

En 2018, G Li et al. analizaron los efectos de la resistencia de carga en un dispositivo híbrido PV-TEG sin concentración [33]. Los resultados demostraron que el sistema híbrido tenía la capacidad de generar más energía que el sistema fotovoltaico sin hibridar. El trabajo también sugirió que había una corriente de operación óptima para el sistema y, por lo tanto, una resistencia de carga óptima para un sistema híbrido que era diferente al sistema fotovoltaico sin hibridar. El punto de máxima potencia (MPP) del sistema híbrido viene dado principalmente por la célula fotovoltaica del sistema, de forma que, si se optimiza la resistencia de carga de TEG, la corriente óptima del sistema híbrido será diferente de la del módulo fotovoltaico en el MPP. Además, se realizó un análisis energético basado en las ecuaciones de transferencia de calor. Se estudiaron dos tipos de células solares para el sistema CPV-TEG (GaAs y c-Si). El sistema híbrido basado en celda de GaAs presentó una eficiencia global máxima de 22.94 % mientras que el basado en c-Si presentó una eficiencia global máxima de 11.07 %. Los resultados mostraron que la resistencia de carga del TEG para la potencia máxima de salida en el sistema híbrido PV-TEG era diferente a la resistencia de carga del TEG operando de forma aislada bajo el MPP.

Otro aspecto fundamental en el diseño de los sistemas híbridos CPV-TEG es el mecanismo de refrigeración debido a los altos gradientes de temperatura que se alcanza con la alta concentración. Diferentes estrategias de refrigeración han sido investigadas en la literatura desde un punto analítico [34], [35], [36], [37], [38]. Según estos autores, los mecanismos de enfriamiento activo son determinantes para que el sistema híbrido sea factible en altos niveles de alta concentración.

En el estudio llevado a cabo por Cui et al. se propuso un novedoso sistema CPV-TEG integrado con materiales de cambio de fase (CPV-PCM-TEG) [34]. Implementaron un modelo teórico basado en la red 1D de transferencia de energía para analizar cuatro tipos de células fotovoltaicas, c-Si, CIGS, GaAs de unión única y GaInP/InGaAs/Ge. Se propuso una optimización del sistema CPV-PCM-TEG para su máxima eficiencia bajo diferentes valores de concentración, hasta 1000 soles. La eficiencia máxima, del 38.9 %, se alcanzó para el sistema híbrido con células GaInP/InGaAs/Ge, conde a 300 K y una concentración de 500 soles.

Rezania y Rosendahl desarrollaron otro modelo de red térmica equivalente para un sistema CPV-TEG con el fin de estudiar los efectos de la refrigeración en la generación de energía y la mejora de la eficiencia en comparación con un sistema solo-CPV [35]. Consideraron una amplia gama de coeficientes de transferencia de calor por convección de 100 a 200000 W/(m²K), para un rango de concentraciones de 100 a 1100 soles. Los resultados obtenidos mostraron que para un material TE actual con $ZT \approx 1$, la eficiencia del sistema CPV-TEG aumentaba a medida que aumentaba la concentración, mientras que la eficiencia del sistema solo-CPV disminuía. La eficiencia alcanzada en CPV-TEG fue hasta un 4 % superior a la del sistema solo-CPV. Además, en este trabajo se llevó a cabo un breve análisis de costes, obteniéndose que el precio de la energía generada por el sistema CPV-TEG fue menor que el del sistema solo-CPV.

Yin et al. propusieron un novedoso método de diseño para el sistema CPV-TEG a una r de concentración óptica de 500x [36]. Este modelo calcula la mínima figura de mérito del generador termoeléctrico que permite que la eficiencia del sistema híbrido termoeléctrico-fotovoltaico de concentración sea mayor que la del sistema fotovoltaico de concentración, para cada uno de los escenarios de refrigeración estudiados. Los valores del coeficiente de transferencia de calor del dispositivo de refrigeración propuesto en el modelo fueron 5000, 10000 y 20000 W/(m²K) [36].

Mahmoudinezhad et al. evaluaron la respuesta transitoria de un sistema híbrido CPV-TEG bajo condiciones variables de radiación solar con hasta 400 soles de concentración. Se supuso que la condición de enfriamiento en el lado frío del TEG era convección libre, con agua como fluido de trabajo, con un coeficiente de transferencia de calor para el disipador de calor de 2000 W/(m²K). Los resultados mostraron que las eficiencias separadas del TEG y CPV tienen tendencias opuestas en respuesta a las variaciones de la radiación solar, sin embargo, notaron que la integración del TEG en el sistema híbrido ayuda a tener una potencia de salida más estable frente a variaciones temporales [37].

La mayoría de los estudios publicados anteriormente se basan en análisis de transferencia de calor unidimensional, modelando la generación eléctrica fotovoltaica mediante los coeficientes de temperatura de la célula solar y la irradiación absorbida por la superficie activa e la misma. Actualmente, existen muy pocos estudios que empleen herramientas de modelado 3D como el Método de Elementos Finitos (FEM) o Método de Volumen Finitos (FVM) para diseñar y optimizar sistemas híbridos CPV-TEG [38], [39], [40], [41].

En el estudio llevado a cabo por Shittu et al. se realizó estudio comparativo de un sistema CPV-TEG con y sin *heat-pipe* (HP), con relaciones de concentración de hasta 6x [38]. Los

resultados mostraron que la eficiencia global del sistema CPV-TEG-HP fue un 1.47 % y un 61.01 % superior a la de los sistemas CPV-TEG y CPV, respectivamente. Los mismos autores publicaron recientemente una investigación numérica sobre el efecto de las resistencias de contacto en el rendimiento de CPV-TEG. Poco después, Shittu et al. llevó a cabo una investigación numérica 3D sobre el efecto de las resistencias de contacto en el rendimiento de CPV-TEG [39]. Concluyeron en que la resistencia de contacto térmico entre la interfaz fotovoltaica-termoeléctrica tenía un gran impacto en la eficiencia del sistema híbrido y que ésta debía de reducirse lo máximo posible para que estos sistemas híbridos sean técnicamente viables.

Zhang et al. estudiaron la eficiencia de conversión eléctrica de un CPV-TEG híbrido con célula solar de perovskita, mediante un modelo numérico 3D [40]. Se encontró que la incorporación del TEG agregó 0.8 % en valor absoluto a la eficiencia de generación global. Además, los autores demostraron que la concentración de la luz solar conduce a una disminución dramática en la eficiencia de conversión general del sistema híbrido atribuida principalmente al aumento de la temperatura fotovoltaica y la alta resistencia en serie de la celda solar de perovskita. Sin embargo, establecieron que la disminución de la eficiencia de conversión causada por la concentración puede ignorarse eligiendo los parámetros geométricos adecuados.

En [41] se desarrollan modelos numéricos tridimensionales menos complejos para un módulo fotovoltaico y un dispositivo TEG. El modelo numérico propuesto ignora las complejidades estructurales internas y considera el dispositivo como un medio homogéneo. Se realizaron simulaciones para diferentes números de módulos TEG y bajas relaciones de concentración óptica (4-9 soles). Todos los autores coinciden en que los modelos numéricos 3D proporcionan una herramienta útil para investigar y diseñar sistemas híbridos debido a las implicaciones de los factores geométricos en el rendimiento del sistema. En la literatura revisada no existen estudios que consideren el sistema híbrido a ultra alta relación de concentración (> 2000×).

Otros muchos estudios teóricos con diferentes estrategias de optimización de sistemas CPV-TEG han sido revisados en [42], [43]. Sin embargo, a pesar de las abundantes predicciones teóricas sobre la producción eléctrica y el rendimiento eléctrico de los sistemas híbridos, pocos estudios experimentales confirman estos resultados [44], [45], [46], [47].

En 2017 Teffah y Zhang presentaron una investigación experimental en interiores de laboratorio de un sistema híbrido CPV-refrigerador-generator termoeléctrico CPV-TEC-TEG bajo diferentes concentraciones que van desde 300 a 1000 soles, empleando una célula de 1.7×1.7 mm² [44]. Con el refrigerador termoeléctrico se consiguió enfriar la célula solar de 368.2 K a 322.6 K para 300 soles, y de 529 K a 403 K para 1000 soles. Su sistema mostró una potencia de salida a 300 soles de 26.09 W para la célula solar CPV y 0.069 W para el TEG. La potencia de salida a 1000 soles fue de 73.58 W y 0.348 W para los sistemas CPV y TEG respectivamente. En el mismo año, Tamaki et al. llevaron a cabo otro experimento en interior de laboratorio donde se analiza un sistema CPV-TEG bajo 400× de concentración geométrica, empleando 3 tamaños diferentes de módulos TE [45]. La parte inferior de los dispositivos TE se mantuvo a 25 °C con una placa refrigerada por agua. Registraron un incremento máximo en la eficiencia relativo al sistema solo-CPV del 4% con el TEG de mayor tamaño. Posteriormente, en 2019, Yin et al. llevaron a cabo interesantes experimentos al aire libre para estudiar el rendimiento de CPV-TEG y CPV-material de cambio de fase (PCM)-TEG bajo una concentración efectiva de 450 soles, con diferentes PCMs [46]. Sus resultados mostraron que la potencia de salida promedio del sistema híbrido CPV-PCM-TEG aumenta en un 1.32 % en comparación con el sistema CPV. Más

recientemente, en 2022, Farouk Badr et al. realizaron experimentos al aire libre para comparar tres sistemas: solo CPV, CPV-TEG y CPV-TEG-*microchannel heat pipe* (CPV-TEG-MCHP) [47]. Todos los sistemas se integraron con un intercambiador de calor de aletas y concentración óptica de 50 soles. Obtuvieron una eficiencia eléctrica global del 26 % para el sistema solo CPV, una eficiencia del 22.84% para el sistema híbrido CPV-TEG, y una eficiencia de conversión del 28.45% para el sistema CPV-MCHP-TEG. Las temperaturas máximas de las celdas solares alcanzadas fueron 43.3 °C, 81.86 °C y 51.7 °C respectivamente. Los resultados muestran una mejora significativa en la potencia de CPV-TEG-MCHP-HS en comparación con los sistemas alternativos, principalmente debido a una reducción significativa de la temperatura célula solar.

De la revisión de la literatura, se puede destacar que la mayoría de los estudios publicados son teóricos y se basan en diferentes supuestos y aproximaciones. Todavía se requiere investigación experimental para confirmar las predicciones teóricas, comprender mejor el comportamiento del sistema y contribuir al futuro desarrollo y comercialización de dispositivos CPV-TEG. Cabe destacar que las conclusiones de los estudios teóricos coinciden en que aumentando el factor de concentración se favorece la hibridación con TEGs, sin embargo, los pocos estudios experimentales existentes contradicen dicha afirmación y se limitan a concentraciones bajas/moderadas.

3 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de nuevas tecnologías en energías renovables es un objetivo fundamental a nivel regional, nacional y europeo. El desarrollo de una energía fotovoltaica rentable y de alta eficiencia, cómo la propuesta en esta Tesis mediante la hibridación de CPV-TEG, contribuirá a el objetivo de los "Planes nacionales de energía y clima (PNIEC)" de la UE de generar 30 GW de energía solar fotovoltaica para 2030 y, por lo tanto, contribuirá a suministrar energía limpia, asequible y segura, tal y cómo se recoge en el Acuerdo Verde de la UE (European Green Deal) y el Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (UN SDG), relacionados con la energía sostenible y la consiguiente reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), contribuyendo a la mitigación del cambio climático. .

Como se ha visto en los epígrafes anteriores, según muchos autores la tecnología de concentración fotovoltaica (CPV) resulta mucho más adecuada para la mejora de la eficiencia mediante la hibridación con TEGs debido al uso de pequeñas células solares multi-unión (MJ) con coeficientes de temperatura bajos [48], [49], [34], [35]. La viabilidad técnica de integrar dispositivos TEG con células fotovoltaicas sin concentración ha sido ampliamente cuestionada en la comunidad científica [27], [28], [31], [32]. La razón principal son los pequeños coeficientes de temperatura de las tecnologías fotovoltaicas convencionales y el bajo gradiente de temperatura que se puede lograr en la fotovoltaica sin concentración. Además, el aumento de la relación concentración es clave para reducir *Levelized Cost of Energy* (LCOE) y que estos sistemas sean competitivos respecto a los sistemas PV convencionales [9], [10].

Entre las distintas posibilidades a desarrollar, está la de aprovechar gran parte del calor residual que se genera en los sistemas de concentración fotovoltaica CPV, especialmente en alta concentración fotovoltaica (HCPV) y ultra alta concentración (UHCPV). Actualmente existen 2 estrategias principales: la hibridación térmica (PV-T) y la hibridación de sistemas fotovoltaicos y dispositivos termoeléctricos (PV-TEG). Los sistemas híbridos PV-T utilizan el calor generado para calentar un fluido: normalmente agua para uso doméstico (ACS), aire para calefacción de estancias, o aplicaciones industriales de baja temperatura [50], [51], [52]. Esta tecnología híbrida está ampliamente estudiada y actualmente existen algunos modelos comerciales [53]. Los sistemas híbridos PV-TEG aprovechan el calor residual para producir energía eléctrica adicional gracias al efecto termoeléctrico (TE). El desarrollo de nuevos materiales TE con mayores eficiencias de conversión (mayor ZT), han hecho que en los últimos años la hibridación de sistemas fotovoltaicos y dispositivos termoeléctricos adquiera cada vez más interés dentro de la comunidad científica. Esta estrategia híbrida está menos desarrollada, pero ofrece la oportunidad de aumentar la eficiencia global de conversión eléctrica de sistemas CPV en torno a un 2-8 % [26], [34], [35], [36], [45], [54], [55].

Con respecto al aumento de los niveles de concentración como mecanismo para reducir el LCOE, una estrategia es superar la barrera de los 1000 soles de concentración de las típicas lentes Fresnel, alcanzando concentraciones ultra altas (UHCPV-TEG). En el desarrollo de este tipo de sistema híbrido UHCPV-TEG, un primer paso es estudiar la viabilidad técnica de alcanzar tales niveles de concentración dado los elevados niveles de temperatura que puede llegar a alcanzar a célula solar. Para ello, resulta fundamental realizar simulaciones numéricas que nos ayuden a tomar decisiones y proponer técnicas de enfriamiento que permitan el funcionamiento de un sistema híbrido en condiciones reales de funcionamiento a sol real. Asimismo, resulta primordial estudiar cómo se comporta el sistema integrado célula-termoeléctrico en su conjunto

para poder optimizar la generación eléctrica total. El uso de herramientas computacionales de simulación por el método elementos finitos (MEF) supone una gran ventaja a la hora de diseñar y optimizar cualquier tipo de sistema que involucre la resolución de fenómenos físicos acoplados, especialmente en dispositivos termoeléctricos [41], [56], [57]. Sin embargo, aunque hay muchos estudios teóricos sobre cómo llevar a cabo la optimización de los sistemas híbridos, la mayoría se basa en modelos térmicos sencillos y son pocos los modelos detallados en 3D que contemple las particularidades geométricas y los fenómenos físicos acoplados de estos sistemas híbridos UHCPV-TEG [42], [43].

Durante de una extensa revisión bibliográfica, se ha detectado una clara falta de estudios experimentales que validen los resultados de los numerosos estudios teóricos revisados y que evidencien la viabilidad técnica de los sistemas híbridos. La mayoría de los estudios experimentales existentes se realizaron en condiciones controladas de laboratorio, lo cual es un enfoque valioso para comprender el diseño y el principio operativo de los dispositivos, pero no se puede utilizar para evaluar el rendimiento del sistema en condiciones operativas exteriores reales y variables. Además, de los muchos estudios previos encontrados casi ninguno de ellos se centra en sistemas híbridos de capaces de alcanzar relaciones de concentración ultra altas (>1000 soles). Las concentraciones máximas alcanzadas experimentalmente fueron 1000 soles en condiciones controladas de laboratorio [44] y 450 soles en condiciones reales de funcionamiento a sol real [46]. Por lo tanto, aún no se ha probado un prototipo experimental de CPV-TEG en condiciones exteriores reales para niveles de concentración ultra altos (UH). Es por ello que resulta fundamental implementar previamente un modelo numérico 3D que nos permita estudiar y optimizar los sistemas UHCPV-TEG y fabricar posteriormente un prototipo de sistema híbrido que supere los 1000 soles de concentración solar y poder medir en condiciones reales de operación.

La realización de esta Tesis supondrá un impacto a nivel regional contribuyendo al fortalecimiento de líneas de trabajo de I+D en la Universidad de Jaén, en concreto, en la línea de caracterización y modelado de sistemas CPV y CPV-TEG. Además de servir como ejemplo para futuras investigaciones en la Universidad de Jaén, dado el potencial de esta tecnología en regiones con altos valores anuales de irradiación solar directa. A nivel internacional, el impacto que lleva consigo esta Tesis dependerá en gran medida de si los resultados de eficiencia y generación de energía eléctrica son positivos. De obtener finalmente un prototipo de sistema UHCPV-TEG que mejore la eficiencia de los actuales diseños, se estaría incentivando a toda la comunidad científica y empresas a seguir apostando por este tipo de tecnología de generación renovable, en detrimento de otras opciones basadas en fuentes de generación convencionales altamente contaminantes.

4 OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis doctoral es la de contribuir al desarrollo de la tecnología híbrida de concentración fotovoltaica y generación termoeléctrica (CPV-TEG) aportando conocimiento sobre estos sistemas y proponiendo nuevas ideas y estrategias para aumentar su eficiencia, reducir costes de producción, y conseguir reducir finalmente los costes de generación de electricidad. Para alcanzar este objetivo se pretende diseñar y montar una nueva configuración de mono-módulo híbrido de ultra alta concentración (UHCPV-TEG), y comprobar la viabilidad técnica del mismo en condiciones reales de operación. Para poder llevar esto a cabo, se han planteado diferentes de objetivos específicos que servirán de guía procedimental para la elaboración de esta Tesis:

Objetivo 1. Analizar el estado del arte en sistemas híbridos de concentración y generación termoeléctrica.

Existe un gran número de publicaciones relacionadas con la hibridación fotovoltaica y termoeléctrica. Cuando analizamos los sistemas híbridos CPV-TEG encontramos que se hay que abordar diferentes campos de la ciencia: electrónica, óptica, transferencia de calor, termoelectricidad, etc. Por ello, resulta fundamental recopilar información de los artículos más recientes y avances en cada una de estas materias, comenzando por la CPV a ultra alta concentración, continuando con los avances más recientes en dispositivos termoeléctricos para generación, y terminando con los sistemas híbridos estudiados hasta la fecha. Dado que existe un gran interés por desarrollar esta tecnología y otras derivadas de la fotovoltaica, existe un gran número de publicaciones sobre sistemas híbridos que no ha parado de crecer en los últimos años. Por ello, esta tarea comenzó al inicio de la tesis y se realizó de forma continuada hasta la finalización de todos los demás objetivos.

Objetivo 2. Estudio sistemas de refrigeración pasiva en ultra alta concentración.

Al comenzar estudiando los sistemas de ultra alta concentración, el primero reto que nos encontramos son los elevados niveles de temperatura que se alcanzan dada los niveles de concentración. Por lo que los sistemas de refrigeración se vuelven determinantes en los sistemas UHCPV y UHCPV-TEG. El estudio y diseño de la refrigeración y la transferencia de calor en sistemas complejos como los sistemas híbridos podría constituir en sí mismo una tesis doctoral de varios años. Por ello se ha decidido centrarse en un campo concreto de la refrigeración y estudiar únicamente los sistemas de refrigeración pasiva. Dentro de este objetivo, se pretende analizar de forma analítica el potencial y la viabilidad de los sistemas UHCPV y UHCPV-TEG usando sistemas de refrigeración pasivos.

Objetivo 3. Modelado numérico 3D y optimización de sistemas híbrido UHCPV-TEG.

Una vez analizado la viabilidad de la refrigeración pasiva en sistemas UHCPV y UHCPV-TEG, se pretende estudiar de forma cuantitativa cómo afectan a la conversión eléctrica los principales parámetros de operación y diseño. Para una mejor aproximación de un sistema real, se establece como objetivo desarrollar un modelo numérico 3D para estudiar potencial de generación eléctrica de los UHCPV-TEG frente a los sistemas convencionales de concentración. Este modelo se empleará para identificar los parámetros funcionamiento más importantes, y buscar un diseño óptimo para unas condiciones de operación determinadas.

Objetivo 4. Fabricación y/o montaje de mono-módulo UHCPV-TEG y caracterización en condiciones reales de operación.

Una vez comprendido cómo se comporta un sistema híbrido, el siguiente paso en el desarrollo de una tecnología es la creación de un prototipo de sistema para medir en condiciones reales de operación.

Por ello, en esta etapa se pretende fabricar y/o montar un prototipo de mono-módulo UHCPV-TEG mediante los medios y materiales disponibles en los laboratorios de la Universidad, y con el aprendizaje de los pasos anteriores. Una vez montado el sistema, se llevará a cabo una caracterización eléctrica, óptica y térmica del mono-modulo en condiciones controladas de laboratorio (*indoor*). Posteriormente, se medirá bajo condiciones reales de operación a sol real (*outdoor*), usando diferentes concentraciones geométricas. La realización de este objetivo confluye con el objetivo final de la tesis: observar la aportación del dispositivo TEG a la producción eléctrica en comparación con un sistema convencional CPV trabajando en condiciones similares de trabajo y comprobar si este sistema mejora o no, los sistemas convencionales.

5 PUBLICACIONES

La presente tesis doctoral es un compendio de cinco artículos publicados en revistas de calidad, indexadas en el ISI JCR. Estas publicaciones han sido el resultado de la metodología empleada, los experimentos realizados y el análisis de los datos obtenidos para alcanzar los objetivos específicos planteados. En concordancia a lo que exige el reglamento de doctorado de la Universidad de Jaén, estos artículos deben incluirse obligatoriamente en la memoria y están, por tanto, adjuntados en la segunda parte de este documento. A continuación, se detalla cada una de las publicaciones, así como su implicación en el cumplimiento de los objetivos planteados. Se aportan además cuatro contribuciones relevantes efectuadas en congresos especializados en la tecnología de concentración fotovoltaica y surgidos durante la realización de la presente tesis doctoral.

5.1 Relación de publicaciones

Tabla 1. Información de las publicaciones

Publicación n°1	<i>"Feasibility of flat-plate heat-sinks using microscale solar cells up to 10,000 suns concentrations"</i>
Autores	Álvaro Valera , Eduardo F. Fernández, Pedro M. Rodrigo, Florencia Almonacid
Revista	<i>Solar Energy</i>
Volumen, etc.	181, pp.361-371
Fecha publicación	Marzo 2019
Clasificación JCR	ENERGY & FUELS: 35/112 (Q2)
Índice de impacto	4.608 (2019)
DOI	10.1016/j.solener.2019.02.013
Publicación n°2	<i>"Performance and economic limits of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules"</i>
Autores	Pedro M. Rodrigo, Álvaro Valera , Eduardo F. Fernández, Florencia Almonacid,
Revista	<i>Applied Energy</i>
Volumen, etc.	238, pp.1150-1162
Fecha publicación	Marzo 2019
Clasificación JCR	ENERGY & FUELS: 9/112 (Q1)
Índice de impacto	8.848 (2019)
DOI	10.1016/j.apenergy.2019.01.132
Publicación n°3	<i>"Annual energy harvesting of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules"</i>
Autores	Pedro M. Rodrigo, Álvaro Valera , Eduardo F. Fernández, Florencia Almonacid,
Revista	<i>IEEE Journal of Photovoltaics</i>
Volumen	9(6), pp.1652-1660
Fecha publicación	Noviembre 2019
Clasificación JCR	ENERGY & FUELS: 59/112 (Q3)
Índice de impacto	4.401 (2021)
DOI	10.1109/JPHOTOV.2019.2939878
Publicación n°4	<i>"Efficiency improvement of passively cooled micro-scale hybrid CPV-TEG systems at ultra-high concentration levels"</i>
Autores	Álvaro Valera , Pedro M. Rodrigo, Florencia Almonacid, Eduardo F. Fernández
Revista	<i>Energy Conversion and Management</i>
Volumen, etc.	244-114521
Fecha publicación	Septiembre 2021
Clasificación JCR	ENERGY & FUELS: 14/119 (Q1)
Índice de impacto	11.533 (2021)
DOI	10.1016/j.enconman.2021.114521

Publicación n°5	<i>“Design, manufacturing and indoor/outdoor testing of a hybrid thermoelectric-concentrator photovoltaic mono-module at unprecedented ultra-high concentration levels”</i>
Autores	Álvaro Valera , Pedro M. Rodrigo, María A. Ceballos, Florencia Almonacid, Eduardo F. Fernández
Revista	<i>Solar Energy Materials and Solar Cells</i>
Volumen, etc.	(En revisión)
Clasificación JCR	ENERGY & FUELS: 35/119 (Q2)
Índice de impacto	7.305 (2022)
DOI	https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112269

5.2 Conexión de las publicaciones con los objetivos propuestos

5.2.1 Objetivo 1. Analizar el estado del arte en sistemas híbridos de concentración y generación termoeléctrica

El cumplimiento del objetivo primero *“Analizar el estado del arte en sistemas híbridos de concentración y generación termoeléctrica”* ha sido fundamental para el desarrollo adecuado del resto de objetivos específicos planteados y el objetivo general de la Tesis de contribuir al desarrollo de la tecnología híbrida de concentración fotovoltaica y generación termoeléctrica (CPV-TEG). Aunque cómo tal este objetivo no ha dado lugar a ningún artículo en particular, el estado y revisión actual de la tecnología se ha realizado en cada uno de los artículos presentados anteriormente como punto de partida para definir y establecer los objetivos que se pretendía alcanzar. Los principales resultados del análisis llevado a cabo se han plasmado en los capítulos 1 y 2 de esta memoria. En el capítulo 1 se describen los fundamentos de las tecnologías de concentración y generación termoeléctrica, así como de su repercusión en el contexto global energético. En el capítulo 2 se resumen los avances realizados en materia de modelado, diseño y caracterización de los sistemas híbridos de concentración y generación termoeléctrica. Esta revisión del estado del arte ha servido como punto de partida para entender las distintas disciplinas de la ciencia que existe detrás de estos sistemas y se ha llevado a cabo de forma continuada durante el desarrollo de la tesis debido al gran interés de comunidad científica en la tecnología de hibridación PV-TEG, cómo se refleja en el aumento del número de publicaciones relacionadas con esta temática en los últimos años. De este proceso de revisión bibliográfica se extrajeron varias conclusiones:

- Faltan modelos detallados en 3D que implementen en uno todas las físicas que constituyen estos sistemas (radiación solar, electricidad, transferencia de calor, óptica...).
- Falta un estándar para establecer la viabilidad técnica de la hibridación termoeléctrica (eficiencia conversión, potencia, *yield*...).
- No existen estudios experimentales que ponga de manifiesto la viabilidad técnica de los sistemas híbridos.
- No existen estudios, tanto teóricos como experimentales, centrados en alcanzar ultra altas concentraciones.

5.2.2 Objetivo 2. Estudio de sistemas de refrigeración pasiva en ultra alta concentración

Tabla 2. Publicaciones relacionadas con el Objetivo 2.

Publicación n°1	<i>“Feasibility of flat-plate heat-sinks using microscale solar cells up to 10000 suns concentrations”</i>
Publicación n°2	<i>“Performance and economic limits of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules”</i>
Publicación n°3	<i>“Annual energy harvesting of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules”</i>

El objetivo número 2, *“Estudio de sistemas de refrigeración pasiva en ultra alta concentración”* se engloba en los artículos número 1 (*“Feasibility of flat-plate heat-sinks using microscale solar cells up to 10,000 suns concentrations”*); el artículo número 2 (*“Performance and economic limits of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules”*); y el artículo número 3 (*“Annual energy harvesting of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules”*).

Dentro del mundo de fotovoltaica y la electrónica en general, la refrigeración de los dispositivos ha tenido un papel crucial debido a la naturaleza físico-química de los materiales semiconductores. Un reto importante a la hora de diseñar muchos de estos dispositivos es facilitar la disipación del calor al ambiente de forma que su temperatura de operación se vea reducida. Este aspecto de diseño resulta esencial en sistemas de concentración fotovoltaica, especialmente en el rango de la ultra alta concentración (>2000 soles), donde las células solares soportan flujos de calor de hasta 200 W/cm².

En el artículo número 1 *“Feasibility of flat-plate heat-sinks using microscale solar cells up to 10000 suns concentrations”* se realizó el estudio térmico mediante análisis de elementos finitos (FEA) de un receptor de un módulo CPV trabajando a ultra altos niveles de concentración. El objetivo de este artículo fue investigar un mecanismo de refrigeración pasivo, sólido y competitivo para facilitar el desarrollo de sistemas ultra alta CPV de nueva generación. En este artículo se analizó la capacidad de refrigeración de un disipador básico basado en una placa plana de aluminio y/o cobre, para niveles de concentración geométrica de hasta 10000×. La ventaja de usar este tipo de disipadores, además de ser una opción sencilla y económica, es que dicho disipador se puede emplear también como parte estructural de un módulo HCPV. El área del disipador se consideró igual al área de una lente cuadrada para las concentraciones estudiadas (desde 2000× hasta 10000×). Para llevar a cabo el estudio, se consideraron diferentes áreas de célula: 3 × 3, 1 × 1, 0.5 × 0.5 y 0.25 × 0.25 mm²; diferentes espesores del disipador: 2, 5, 8, 10 mm; y diferentes eficiencias de célula, desde el 60 % hasta el 0 %. Para comparar la capacidad de refrigeración de las distintas configuraciones, se analizaron, por un lado: la temperatura máxima de célula, y los gradientes de temperatura del disipador en dirección transversal (z) y longitudinal (xy) (ver Figura 6). Las condiciones iniciales de operación y de contorno se definieron según el estándar IEC 62670-3 (*Concentrator Standard Operating Conditions* (CSOC)) que son: temperatura de aire 20°C, DNI igual a 900 W/m² y velocidad del viento de 2 m/s. Para los laterales del disipador se establecieron condiciones de simetría (superficie adiabática) para simular el caso de un módulo de varias células adyacentes. Para las superficies en contacto con el aire (exterior e interior del módulo), se consideró intercambio de calor por radiación y por convección. Ambos mecanismos se modelaron mediante el coeficiente de emisividad propio de cada material y el coeficiente promedio de convección natural y forzada

para las superficies interior y exterior respectivamente. Este coeficiente de convección fue calculado durante las simulaciones a partir de correlaciones empíricas preestablecidas para una geometría dada y una velocidad flujo exterior promedio de 2 m/s. Como fuente de calor, se tomó la tasa de calor residual generado en una célula solar de Germanio iluminada uniformemente. No se contemplaron efectos espectrales. El sistema de concentración óptico (POE y SOE) fue modelado a través la eficiencia óptica, con un valor típico del 80 % [7].

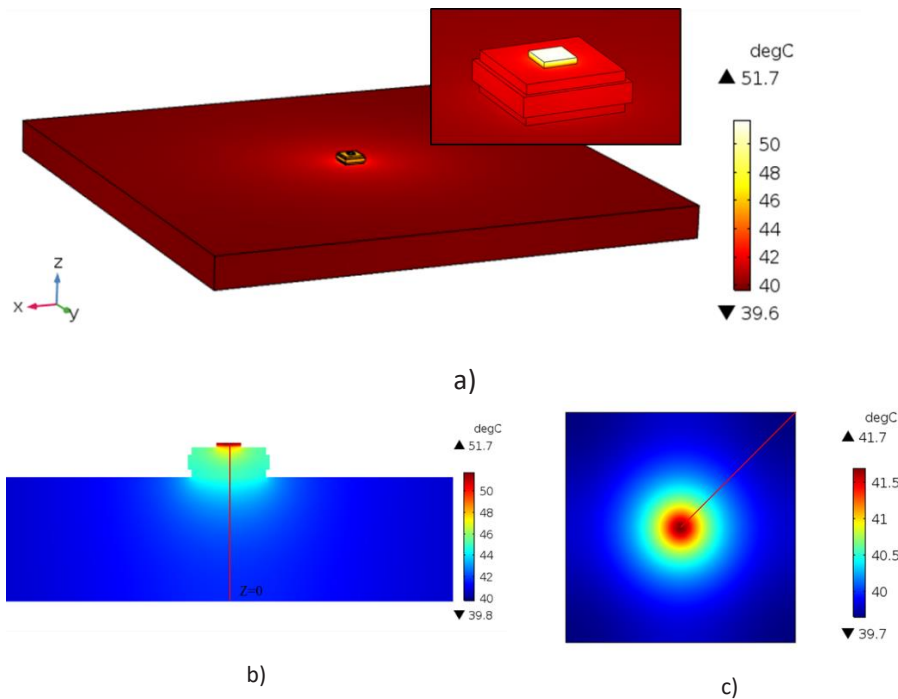


Figura 6. Distribución de temperatura para las simulaciones de referencia (6000×): a) geometría del receptor CPV y del disipador de calor considerados, b) sección transversal del receptor para la estimación de ΔT_z . c) parte trasera disipador de calor para la estimación de ΔT_{xy} .

Los **resultados** muestran que la temperatura de célula crece de forma lineal con la concentración para todos los casos analizados. Se observó como la pendiente que describe esta tendencia es mayor cuanto mayor es el área de la célula. Para áreas de célula menores de $1 \times 1 \text{ mm}^2$ las pendientes con las que la temperatura aumenta son mucho menores y similares entre ellas que para el área de célula de $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Esto se debe a que la tasa de calor residual generado en la célula (W) es menor cuanto menor es el área activa de la célula, para un mismo nivel de irradiación con el mismo nivel de concentración óptica (W/m^2). Cabe resaltar que para áreas de células de $1 \times 1 \text{ mm}^2$ o inferiores, la temperatura promedio de la célula se mantiene por debajo de los $80 \text{ }^\circ\text{C}$ para niveles de concentración de 10000×. Es importante señalar también que la diferencia de temperatura en la superficie trasera del disipador (ΔT_{xy}) para la célula de $3 \times 3 \text{ mm}^2$ es muy grande con un valor máximo de $42.8 \text{ }^\circ\text{C}$ a 10000×. Por el contrario, para el resto de áreas apenas alcanza los $4 \text{ }^\circ\text{C}$ de diferencia para el caso de los 10000×.

En este estudio también se observó cómo la eficiencia de célula tiene un impacto significativo en la temperatura de la misma. Como en el caso de la variación del área, la temperatura de célula aumenta linealmente con la concentración siendo mayor la pendiente para las eficiencias menores. El peor escenario corresponde a la célula con una eficiencia del 0 % (fallo del inversor DC/AC), donde la temperatura media oscila entre $53.1 \text{ }^\circ\text{C}$ (2000×) y $80.4 \text{ }^\circ\text{C}$

(10000×), para una célula de 1 x 1 mm². La temperatura promedio de célula que se alcanzada para una eficiencia típica del 40 % varía entre 41.83 °C (2000×) y el 57.85 °C (10000×).

Otro análisis que se realizó fue el estudio del impacto del espesor del disipador plano sobre en el comportamiento térmico del receptor CPV. Se consideraron en ente caso, espesores de 2, 5, 8 y 10 mm. Los resultados de las simulaciones a 10000× mostraron una temperatura media de célula de 62.76 °C para un espesor de 2 mm, mientras que para el resto de espesores la temperatura obtenida se mantuvo en torno a los 56-57 °C. Un mayor espesor de placa implica un mayor volumen de material conductor, aumentando la inercia térmica del disipador. Sin embargo, se observó que a partir del umbral de los 5 mm no se obtenía mejora significativa en la capacidad de refrigeración al aumentar dicho espesor. Al estudiar los requerimientos térmicos mínimos para el caso de los disipadores de aluminio y cobre se encontró que se podía reducir los costes entre el 70 % (a 2000×) y el 60 % (10000×) si se emplea Cobre como material para el disipador en sustitución al Aluminio. Esto pone de manifiesto la importancia que el correcto diseño del disipador de calor va a tener para mejorar la competitividad de los sistemas UHCPV.

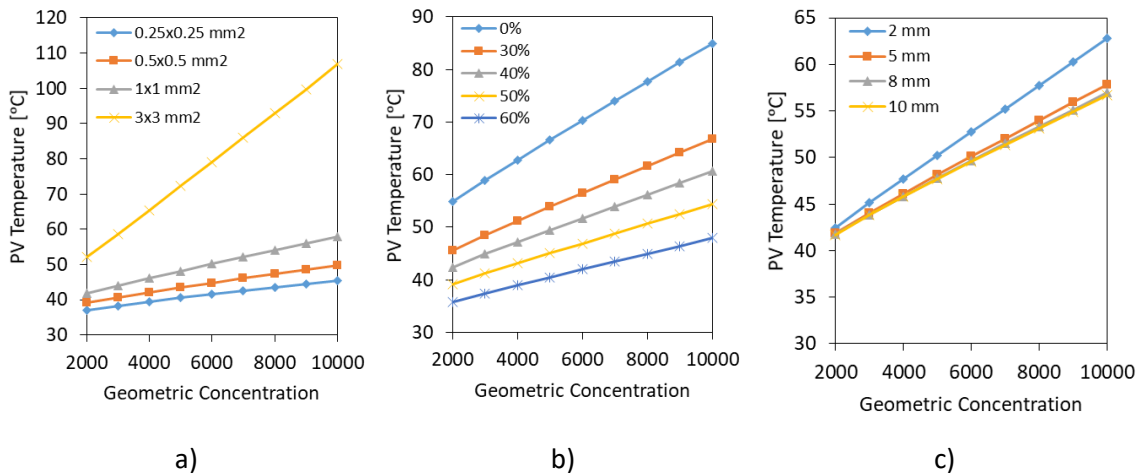


Figura 7. Temperatura máxima de célula solar en función de la concentración geométrica obtenida en las simulaciones para diferentes: a) áreas de célula, b) eficiencias de célula, c) espesores del disipador plano.

Las **principales conclusiones** que se extrajeron de este estudio fueron que la miniaturización de los receptores de células supone una buena estrategia para mitigar o reducir los requerimientos térmicos propios de los sistemas UHCPV. Para áreas de células iguales o menores a 1 x 1 mm² se obtuvieron temperaturas de célula muy por debajo de 80 °C a 10000×. Por tanto, el uso de disipadores planos de aluminio, empleados al mismo tiempo como parte estructural del módulo de concentración, pueden servir como solución a la disipación de calor de las células solares de pequeño tamaño. Se comprobó además que es posible reducir la cantidad de material de disipador, sin afectar a la capacidad de disipación térmica, reduciendo el coste de material considerablemente. La opción de sustituir el aluminio por el cobre resulta interesante para la aplicación del generador termoeléctrico híbrido en CPV, debido a su mayor conductividad.

En el **artículo número 2 "Performance and economic limits of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules"** se analizó la viabilidad técnica y económica de un receptor híbrido CPV-TEG frente a un receptor de CPV, ambos con sistema de refrigeración pasiva.

El objetivo fue realizar un primer estudio analítico sobre la generación eléctrica y eficiencia de conversión de un sistema híbrido CPV-TEG respecto a un sistema CPV típico. Para ello se

empleó un modelo matemático unidimensional implementado en Matlab, que resuelve las ecuaciones de transferencia de calor en estado estacionario. Se propuso una metodología basada algoritmos de optimización con la finalidad de determinar el diseño óptimo del receptor solar en términos de eficiencia y coste, para cada condición particular de operación. La estructura del receptor solar híbrido CPV-TEG considerado en este estudio consistía en una célula solar de triple unión acoplada térmicamente con un TEG de diferente área, y un intercambiador de calor con aletas como disipador de calor (ver Figura 8).

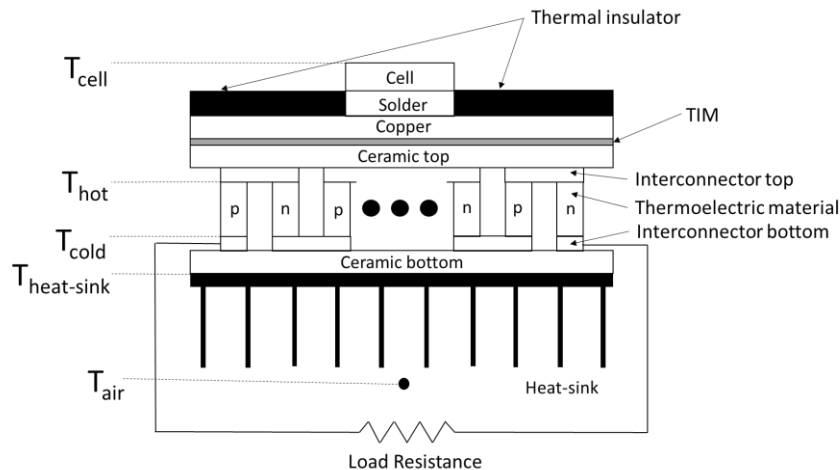


Figura 8. Estructura del receptor híbrido CPV-TEG propuesta para el modelo matemático.

La célula solar III-V se modeló en base a las características eléctricas de la célula comercial 3C44 de AZURSPACE® (GaInP/GaInAs/Ge) de $3 \times 3 \text{ mm}^2$. El generador termoeléctrico fue modelado mediante la expresión de su eficiencia máxima. Esta eficiencia es evaluada a partir de las temperaturas del lado frío y caliente del dispositivo, y de la figura de mérito ZT característica del material termoeléctrico. Se despreció la pérdida de calor por convección y radiación de la superficie superior de la célula solar por ser de varios órdenes de magnitud menor que las pérdidas en el disipador. Al considerar un modelo unidimensional, las superficies laterales se supusieron adiabáticas, sólo se consideró la transferencia de calor entre las capas de material de la estructura del receptor, considerando temperatura uniforme en cada capa de la estructura. Se definieron las resistencias térmicas de las diferentes capas de material calculadas a partir de las conductividades térmicas ($\text{W}/(\text{mK})$) y su espesor (m). También se despreciaron las resistencias térmicas de contacto entre las capas de material (contacto ideal). Las propiedades físicas de los materiales se tomaron constantes con la temperatura. Los elementos térmicos tipo N y tipo P en el TEG se consideraron idénticos en dimensiones y conductividad térmica. Para llevar a cabo la optimización, se parametrizaron algunas de las variables más características del sistema. La concentración geométrica fue estudiada en un rango de $900\times$ a $1800\times$. El límite inferior para el área de TEG se consideró de $3 \times 3 \text{ mm}^2$, igual al área de célula. Se establecieron valores de ZT entre 1.0 y 2.6; el límite inferior corresponde a los valores típicos de los materiales BiTe comunes, mientras que el límite superior corresponde a la película delgada *super-lattice* Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ [58]. Se analizó la resistencia térmica absoluta del disipador para valores superiores o iguales a 0.5 K/W. Este valor se puede considerar un límite práctico para el enfriamiento CPV pasivo [59]. La conductividad térmica del material TE fue analizada en el rango 0.5 - 4 W/(mK). El resto de variables de diseño del módulo TEG, tales como el *fill-factor* y la altura y ancho de los elementos del TE, fueron analizados dentro de un rango específico. Por un lado, su buscó la resistencia térmica mínima del sistema de refrigeración de un receptor CPV, que maximizaba la eficiencia, para una temperatura de célula máxima establecida de 100 °C. La DNI

y T_{air} se fijaron según las condiciones estándar de operación en concentración CSOC. Por último, se utilizó el modelo económico propuesto por Rezania y Rosendahl en [35] para analizar la viabilidad económica del diseño propuesto. El coste por vatio-pico (Wp) del receptor solar se desglosó en tres: célula solar, TEG y disipador de calor. Para el receptor de solo CPV, se consideró el coste de TEG de cero.

A continuación, se presentan los **resultados** que se obtuvieron en el proceso de optimización del sistema híbrido. La Figura 9 muestra cómo es posible alcanzar una eficiencia global máxima de 39.2 % con refrigeración pasiva a un factor de concentración de 800x mediante el uso de materiales TE avanzados ($ZT \approx 2.6$) y una temperatura de célula alta (100 °C). Esta eficiencia global máxima coincide con la máxima eficiencia del TEG del 7 %. Véase como el aumento de la concentración geométrica implica una caída en la eficiencia. Esto se debe a dos razones: 1) la eficiencia de la célula disminuye a concentraciones más altas; 2) el área de TEG debe aumentarse a concentraciones más altas para no exceder la temperatura máxima de la célula y, como consecuencia, la densidad de flujo de calor a través del TEG disminuye, la diferencia de temperatura entre los lados caliente y frío disminuye y la eficiencia de TEG disminuye. Es importante señalar que se ha realizado una optimización del área de TEG para cada nivel de concentración. Cuando el factor de concentración aumenta, la diferencia de temperatura entre los lados caliente y frío del TEG aumenta (la temperatura de la célula también aumenta), y la eficiencia del TEG aumenta, compensando la pérdida en eficiencia de la célula con la temperatura por las altas concentraciones. Esto es cierto para un diseño de receptor CPV-TEG específico, pero oculta el problema de que, a diferentes concentraciones, el diseño óptimo del receptor debería ser diferente.

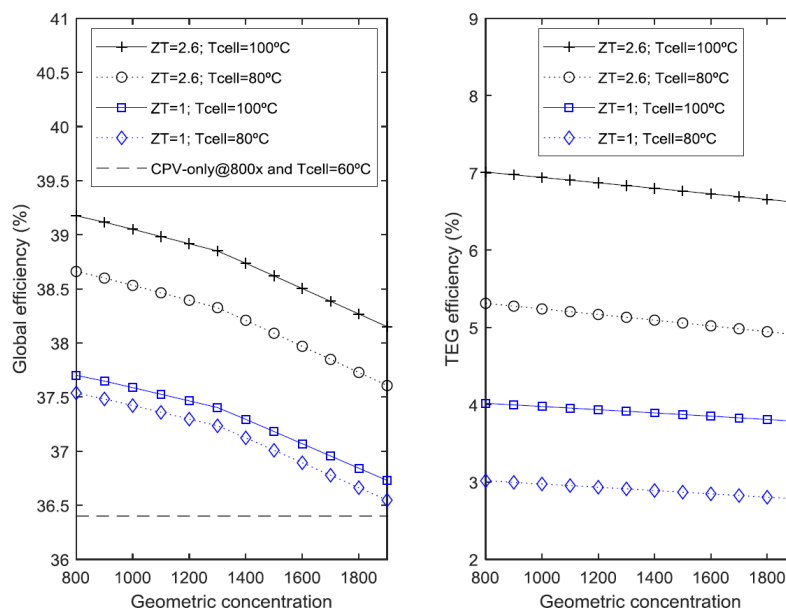


Figura 9. Eficiencia global del módulo CPV-TEG (izquierda) y eficiencia de TEG (derecha) en función de la concentración geométrica para varios valores de la figura de mérito ZT y la temperatura de funcionamiento de la célula para lograr la máxima eficiencia. Disipador de calor=0.5 K/W, $f=0.7$, $k_{TEG}=1.5 \text{ W}/(\text{mK})$, $l=b=0.5 \text{ mm}$.

Los resultados también mostraron cómo el área de TEG se puede ajustar para lograr un valor específico de temperatura de funcionamiento de la célula, lo cual podría resultar útil la hora de diseñar receptores híbridos. Los resultados del análisis con diferentes áreas de TEG mostraron que, a mayor relación de concentración, mayor área de TEG requerida, pero menor

diferencia de temperatura en el TEG y, por tanto, menor aportación extra al sistema híbrido. Los beneficios de optimizar el diseño para minimizar el coste del receptor híbrido mostraron que se puede lograr una reducción máxima de costes de hasta el 46 % a una concentración de $1900\times$ usando $ZT \approx 2.6$ y una temperatura de célula de $100\text{ }^\circ\text{C}$. Si bien la eficiencia global en estas condiciones de operación es menor que la del dispositivo CPV (35.9 % frente a 36.4 %), el dispositivo híbrido resultante es competitivo en términos de coste. También se analizó la relación entre el incremento de eficiencia y la reducción de costes, optimizando el sistema híbrido a un coste específico y una temperatura de operación dada para encontrar el factor de concentración óptimo, la resistencia térmica del disipador de calor y el área de TEG. Los resultados de esta optimización, véase la Figura 10, proporcionan información muy útil para el diseño de prototipos CPV-TEG. Por ejemplo, para el mismo coste que el módulo CPV, un diseño CPV-TEG con $ZT = 1$ y una temperatura de célula de $80\text{ }^\circ\text{C}$, trabajando a concentraciones de alrededor de $1100\times$ proporcionaría una eficiencia del 36.9 %, mayor que la eficiencia del módulo CPV que sería del 36.4 %.

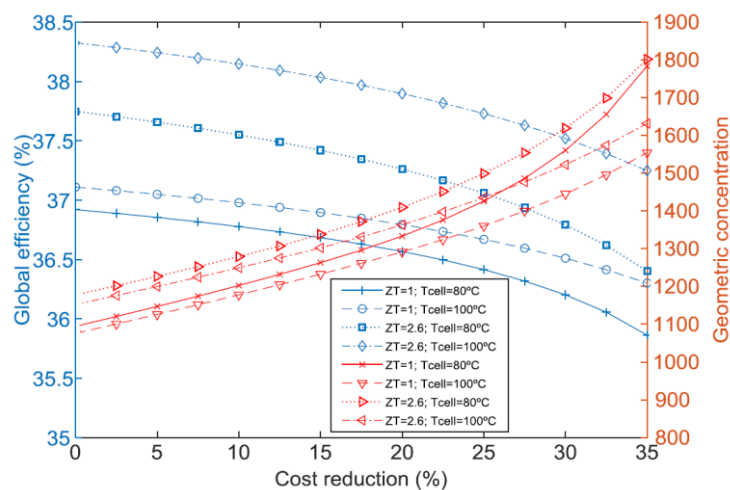


Figura 10. Optimización del diseño CPV-TEG en función del porcentaje de reducción de costes en comparación con el módulo CPV, para varios valores de ZT y temperatura de funcionamiento de la célula.

A partir de los resultados obtenidos se **concluye** que el enfriamiento pasivo es técnicamente factible para CPV-TEG sin exceder los límites de temperatura de funcionamiento de la célula para concentraciones geométricas extremas de hasta $1900\times$ y células solares de $3 \times 3\text{ mm}^2$. Mientras que la figura de mérito de ZT y área del dispositivo son parámetros clave en el diseño, los parámetros estructurales del TEG (factor de llenado, largo y ancho del termoelemento) apenas van a influir en la eficiencia del sistema híbrido y el coste. Para una resistencia térmica dada del disipador de calor, es posible ajustar el área de TEG para que no exceda el límite en la temperatura de funcionamiento de la célula. Del proceso de optimización de mínimos costes del sistema híbrido CPV-TEG se ha observado que existe una relación entre mejorar la eficiencia y reducir el coste. La optimización del diseño para obtener la máxima eficiencia incrementa el coste, mientras que optimizar el coste conduce a pequeñas eficiencias de TEG. Por lo tanto, es necesario encontrar un compromiso, entre el incremento de la eficiencia mediante la hibridación de TEG y, al mismo tiempo, obtener una reducción de coste específica en comparación con el módulo CPV. Herramientas de optimización como las propuestas en este trabajo pueden ayudar a los diseñadores a encontrar el diseño óptimo para cada caso.

En el artículo número 3 *“Annual energy harvesting of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules”* se analizó el comportamiento

bajo condiciones reales de funcionamiento de cuatro diseños diferentes de sistemas híbridos CPV-TEG. Para ello se emplearon valores reales atmosféricos de Jaén registrados en el Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra Energía y Medioambiente (CEACTEMA) durante 1 año. La campaña de recogida de datos atmosféricos se llevó a cabo desde marzo de 2016 hasta febrero de 2017 donde se registraron valores de espectro directo en intervalos de 10 min mediante el espectroradiómetro SolarSIM-D2 de Spectrafy [60] instalado en un seguidor solar 2-ejes de alta precisión (error < 0.1°). Además, se registró la temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, así como todas las componentes de la radiación (global, difusa, directa, etc.) mediante una estación meteorológica GEÓNICA 3000C situada en la misma terraza que el seguidor solar (ver Figura 11).



Figura 11. Espectroradiómetro SolarSIM-D2 de Spectrafy junto con sensor Isotypes (izquierda) y estación meteorológica GEÓNICA 3000C (derecha) situada en la terraza del CEAETEMA (Universidad de Jaén).

Estos datos se utilizaron como valores de entrada del modelo desarrollado en trabajos previos [61] para la predicción energética anual. Este modelo fue modificado en este estudio para incluir el impacto espectral en la eficiencia célula solar MJ. El objetivo era realizar una estimación de la energía generada durante un periodo de tiempo y comprobar el beneficio del sistema híbrido respecto a un sistema típico CPV de referencia. Se realizó un análisis previo de los coeficientes de temperatura umbral para las cuatro configuraciones A, B, C y D analizadas, considerando las condiciones de referencia CSOC. La estructura del receptor híbrido analizado fue la misma que la utilizada en el estudio anterior, Figura 8. La tabla 3 muestra las características de los cuatro sistemas analizados.

Tabla 3. Parámetros de diseño y valores de rendimiento en CSOC de los receptores de células solares seleccionados.

	CPV-only	A	B	C	D
ZT	-	1.0	1.0	2.6	2.6
T _{cell} (at CSOC) [°C]	60	80	100	80	100
C _g [-]	800	1205	1180	1282	1252
R _{heat exch} [K/W]	9.81	4.77	4.75	3.98	3.92
A _{TEG} [mm ²]	-	66.4	40.7	64.5	40.0
η _{hyb} (at CSOC) [%]	36.41	36.77	36.97	37.54	38.14
η _{TEG} (at CSOC) [%]	-	1.85	2.91	3.52	5.53

Según los **resultados** del estudio, se obtuvieron valores de coeficientes de temperatura mínimos de -0.08 %/K (configuración A), -0.08 %/K (B), -0.22 %/K (C) y -0.17 %/K (D), para que la hibridación fuese viable. Como la célula solar seleccionada tiene un coeficiente de -0.046 %/K, todas las configuraciones híbridas mostraron un balance energético positivo bajo CSOC. Se

analizó el comportamiento diario de los receptores solares seleccionados en un día claro de verano (07/06/2018), como ejemplo de un día con un amplio rango de radiaciones DNI. Se realizó el análisis de la temperatura de célula a lo largo del día y se observó que el comportamiento de la temperatura fue el mismo para los receptores A y C (diseñados para operar a 80 °C en CSOC), y para los receptores B y D (diseñados para operar a 100 °C en CSOC). Durante este día, la máxima temperatura calculada fue de 79.2 °C para el receptor CPV, de 98.7 °C para los receptores híbridos A y C, y de 118.6 °C para los receptores híbridos B y D. Por lo tanto, los receptores B y D alcanzaron temperaturas superiores a la temperatura máxima permitida según la hoja de características del fabricante de la célula solar (110 °C) durante las horas más calurosas. Es importante señalar que las temperaturas de célula alcanzadas fueron cerca de 20 °C más altas que las temperaturas de diseño en CSOC. Esto se debe a las altas temperaturas ambientales registradas en el día analizado, con una máxima de 39.8 °C, cerca de 20 °C superior a la temperatura de referencia en el CSOC.

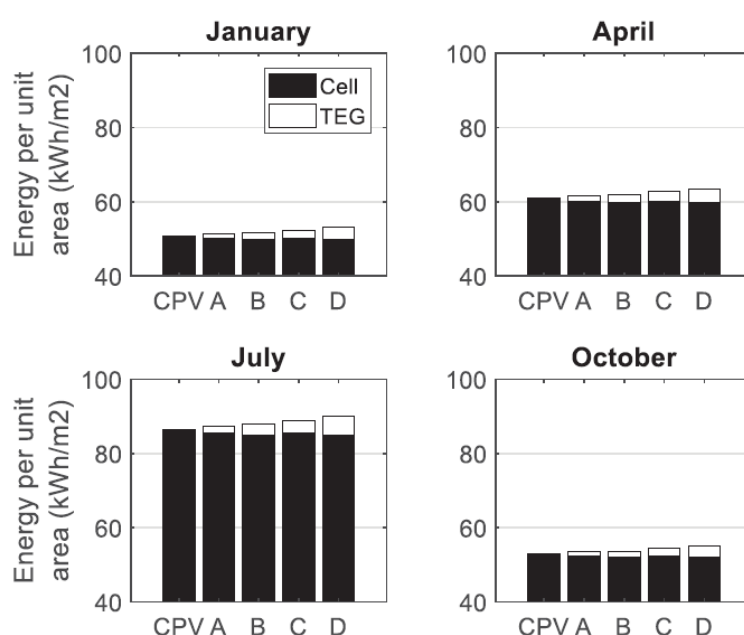


Figura 12. Energía producida por unidad de área de concentrador óptico, para cada uno de los 5 sistemas analizados, considerando 4 meses de ejemplo.

De la energía mensual producida mensual por unidad de área del concentrador, se observó como la contribución del TEG compensaba la ligera disminución de la producción eléctrica de la célula solar cuando se incorpora el TEG en el receptor (ver Figura 12). La generación eléctrica fue especialmente alta en julio, mes con los valores más altos de DNI. Estas condiciones de alta irradiación favorecen el gradiente de temperatura en extremos del TEG, aumentando generación eléctrica del TEG, y del sistema global como consecuencia. En cuanto a la eficiencia, Figura 13, se observó como la eficiencia global disminuía en los meses de enero, febrero y marzo, que son los meses con menores niveles de DNI. También hay un descenso en julio debido a las altísimas temperaturas ambiente registradas en la región de Jaén, que afectan negativamente a la eficiencia de las células solares. La eficiencia del TEG muestra un comportamiento bastante estable a lo largo del año, con solo un descenso apreciable en febrero, mes especialmente nublado en el que el gradiente de temperatura en el interior del TEG se mantuvo en valores bajos. Se estimaron también los incrementos porcentuales relativos en comparación con el dispositivo CPV de referencia. La eficiencia global anual en CSOC puede aumentar hasta un 4.75 % con la hibridación, mientras que la eficiencia global promedio anual de sistema híbrido se

incrementó un 4.30 % con, respecto al sistema CPV. Esto significa que las condiciones CSOC son más favorables para el rendimiento del dispositivo CPV-TEG que las condiciones promedio anuales. También se obtuvo que la energía anual generada por kWp de capacidad fotovoltaica instalada puede aumentar hasta un 7.00 % con la hibridación.

Las principales **conclusiones** de este estudio fueron que el rendimiento de CPV-TEG es claramente superior al del dispositivo CPV de referencia bajo condiciones reales de funcionamiento en la localidad analizada, especialmente para elevadas DNI. La eficiencia global en CSOC se puede mejorar hasta en un 4.75 % relativo con la hibridación, mientras que la eficiencia global promedio anual aumentaría en torno al 4.30 %, considerando porcentajes relativos. Además, con los módulos híbridos CPV-TEG pueden lograr ganancias energéticas anuales interesantes, por kWp de capacidad fotovoltaica instalada, de hasta 7.00 %.

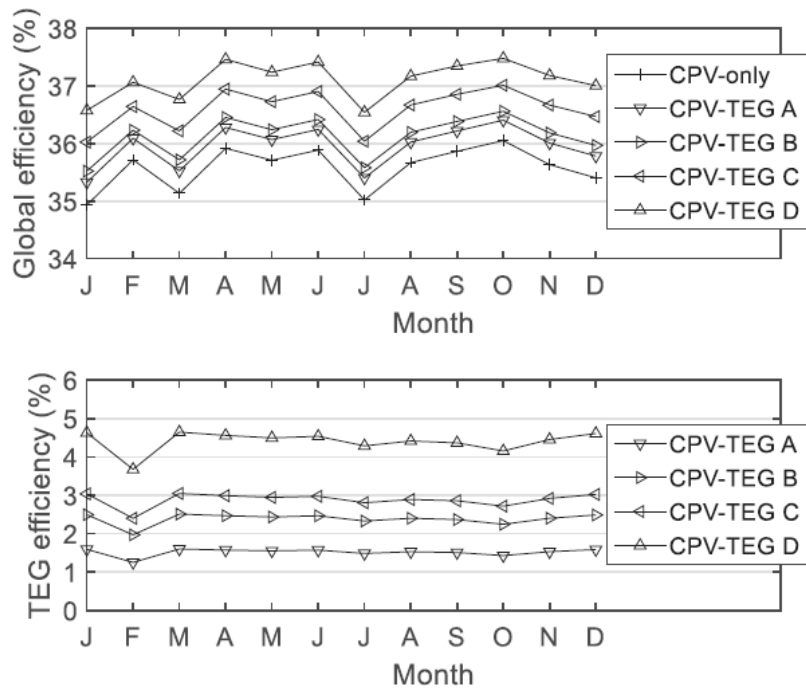


Figura 13. Eficiencias globales promediadas mensualmente (arriba) y eficiencias de TEG (abajo) para los dispositivos analizados.

5.2.3 Objetivo 3. Modelado numérico 3D y optimización de sistemas híbrido UHCPV-TEG

Tabla 4. Lista de publicaciones relacionadas con el Objetivo 3

Publicación n°4	"Efficiency improvement of passively cooled micro-scale hybrid CPV-TEG systems at ultra-high concentration levels"
-----------------	--

El objetivo número 3, "Modelado numérico 3D y optimización de sistemas híbrido UHCPV-TEG" se engloba dentro del artículo 4 ("Efficiency improvement of passively cooled micro-scale hybrid CPV-TEG systems at ultra-high concentration levels").

Con el estudio llevado a cabo en el artículo número 4 "Efficiency improvement of passively cooled micro-scale hybrid CPV-TEG systems at ultra-high concentration levels" se dio un paso más en el modelado sistemas CPV-TEG al implementarse un modelo 3D de un receptor híbrido

utilizando para ello el software COMSOL Multiphysics®. Este programa resuelve mediante el método de elementos finitos (EFM), las ecuaciones fundamentales de transferencia de calor y conservación de corriente a través del receptor híbrido (ver Figura 14). Esta herramienta de simulación ha sido ampliamente validada en otros muchos estudios relacionados con la fotovoltaica y la termoelectricidad [62], [63], [64], [65], [66]. El objetivo de este artículo fue analizar los principales parámetros de diseño y de funcionamiento de un sistema híbrido empleando un modelo físico 3D; cuantificar el impacto de cada uno de estos parámetros en la eficiencia eléctrica del sistema híbrido y comparar los resultados con los proporcionados por un sistema CPV sin hibridar trabajando bajo las mismas condiciones de operación.

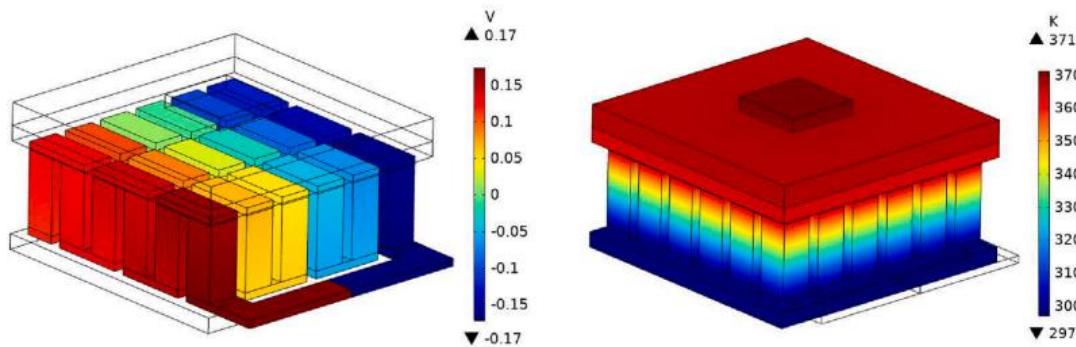


Figura 14. Resultado de la simulación con parámetros de caso de referencia de (a) campo potencial y (b) campo de temperatura. Condiciones: $A_{\text{cell}} = 1 \times 1 \text{ mm}^2$, $C_{\text{geo}} = 2000x$, $TC = -0.05 \text{ \%}/K$, $AR(\text{TEG}/\text{cell}) = 13$, $TE \text{ fill-factor} = 0.5$, $TE \text{ leg height} = 1 \text{ mm}$, $R_{\text{th,cool}} = 5 \text{ K/W}$, $T_{\text{air}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{DNI} = 900 \text{ W/m}^2$ (CSOC).

Para llevar a cabo este estudio, se seleccionó un receptor CPV-TEG enfriado pasivamente inspirado en el diseño propuesto en trabajos previos (ver Figura 8). La geometría 3D se compone de una célula de triple unión estándar GaInP/GaInAs/Ge montada en una lámina de cobre. Esta lámina de cobre se sitúa a su vez en la superficie caliente del termoelectrico. Tanto la célula como la lámina disipadora de calor están fijadas mediante soldadura SnAgCu. La lámina de cobre se emplea al mismo tiempo como circuito eléctrico y como disipador de calor. La célula solar se modeló como un bloque de Germanio, dada su mayor proporción respecto a las demás sub-células [66]. Para calcular la eficiencia de conversión eléctrica de la célula se emplearon los valores de eficiencia de referencia y coeficientes de temperatura típicos de una célula solar de triple unión comercial de AZURSPACE® [67]. Asimismo, esta célula se definió como fuente de calor volumétrica de magnitud igual a la parte de radiación concentrada que incide sobre la célula y que no se convierte en electricidad. La superficie del intercambiador de calor se modeló a partir de los valores de resistencia térmica absoluta, que engloba los efectos de las resistencias térmicas de contacto, conducción, convección y de radiación, que existen desde el lado frío del módulo TE hasta la temperatura ambiente. El generador termoelectrico se modeló partiendo del modelo comercial GM200-49-45-25 [68]. Se definieron las propiedades físicas fundamentales de los materiales Bi₂Te₃ tipo p y tipo n: conductividad térmica, conductividad eléctrica y coeficiente de Seebeck, como funciones dependientes de la temperatura del material. Estas funciones polinómicas de segundo grado se tomaron de las medidas del mismo fabricante exceptuando el caso de estudio $ZT \approx 2.4$. Para este caso, se corrigieron los coeficientes del polinomio de la función de Seebeck, hasta que los valores de ZT modelados se ajustaron a los valores de ZT de la literatura [58]. Los principales parámetros de diseño analizados fueron: área de célula, concentración geométrica, relación de área, resistencia térmica, figura-de-merito, altura de termoelemento y *fill-factor* del módulo TEG. Para analizar y cuantificar el

aumento o disminución de conversión eléctrica del sistema híbrido CPV-TEG respecto a un sistema convencional CPV, trabajando bajo mismas condiciones de radiación y diferentes temperaturas de célula, se definió el factor “*Temperature-Mismatched Relative Efficiency Improvement*” (REI_{TMM}). Este factor representa la relación que existe entre la eficiencia del sistema CPV-TEG respecto del sistema CPV. Para valores de $REI_{TMM} > 0\%$ el sistema híbrido presenta mayor eficiencia que el convencional. Esto significa que la contribución del módulo TEG a la generación eléctrica es mayor que las pérdidas producidas en la célula solar causadas por la integración del módulo TEG. Una vez definida una configuración de referencia, se realizaron distintas simulaciones variando los parámetros de diseño y se analizó como el factor REI_{TMM} variaba en función de estos parámetros, respecto al caso de referencia. Para todos los casos de simulación se establecieron como condiciones iniciales del entorno las condiciones de funcionamiento estándar de concentración CSOC según el IEC 62670-3.

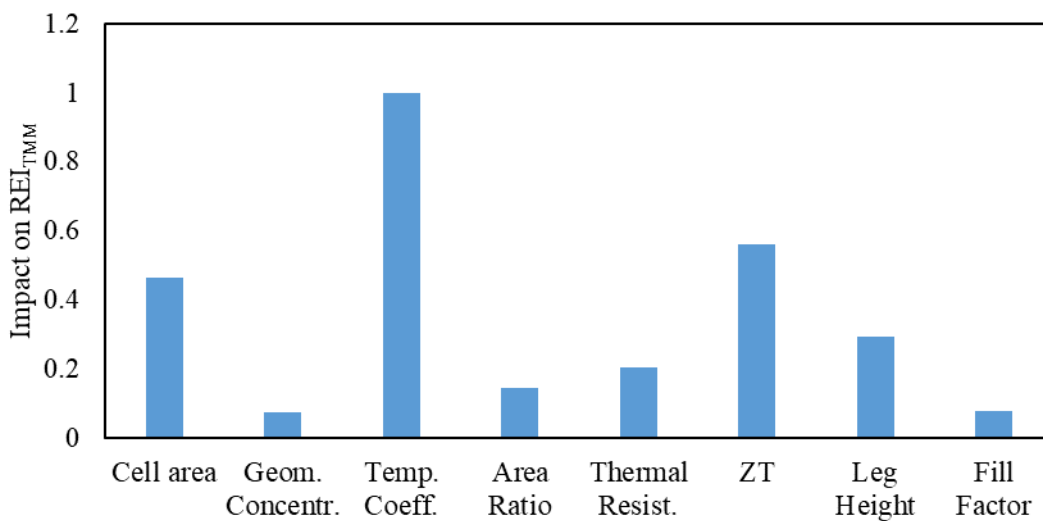


Figura 15. Porcentaje normalizado del impacto de los parámetros de diseño sobre el REI_{TMM} .

la Figura 14 muestra los **resultados** de la simulación para el caso de referencia. Se obtuvo un voltaje máximo en terminales del TEG de 0.34 V y una corriente de 74.0 mA en condiciones MPP. Las distribuciones de temperatura muestran una temperatura máxima de célula de 371 K (98 °C). Los resultados del estudio paramétrico se muestran en la Figura 15. Los parámetros que más impacto tienen en la mejora de la eficiencia del sistema híbrido respecto el sistema CPV fueron: 1) el coeficiente de temperatura de célula, 2) el ZT del material TE, 3) el área activa de célula. Los coeficientes de temperatura de célula considerados se variaron entre -0.020 %/K a -0.10 %/K. Para el área de célula se tomaron valores desde $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ hasta $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Por último, para la figura de mérito se tomó un valor típico de un módulo comercial ($ZT \approx 1$) y un valor alto representativo ($ZT \approx 2.4$). La Figura 16 muestra la evolución del REI_{TMM} frente al coeficiente de temperatura, para varios tamaños de célula y valores de ZT. Para coeficientes de temperatura inferiores a -0.08 %/K, los materiales TE estándar ($ZT \approx 1$) pueden integrarse con micro-células para lograr mejoras en la eficiencia. Se podría lograr un REI_{TMM} de alrededor del 5.5 % a 2000× (caso de referencia) utilizando TE con un $ZT = 2.4$ y micro-células de $1 \times 1 \text{ mm}^2$ o menos. La Figura 17 muestra la eficiencia híbrida junto al REI_{TMM} en función de la concentración geométrica. Se observa como la eficiencia aumenta a medida que aumenta la ratio de concentración para valores de $ZT \approx 2.4$, y lo mismo ocurre con REI_{TMM} . Por el contrario, con una ZT baja, el rendimiento del sistema híbrido comienza a disminuir para concentraciones geométricas superiores a 2000×.

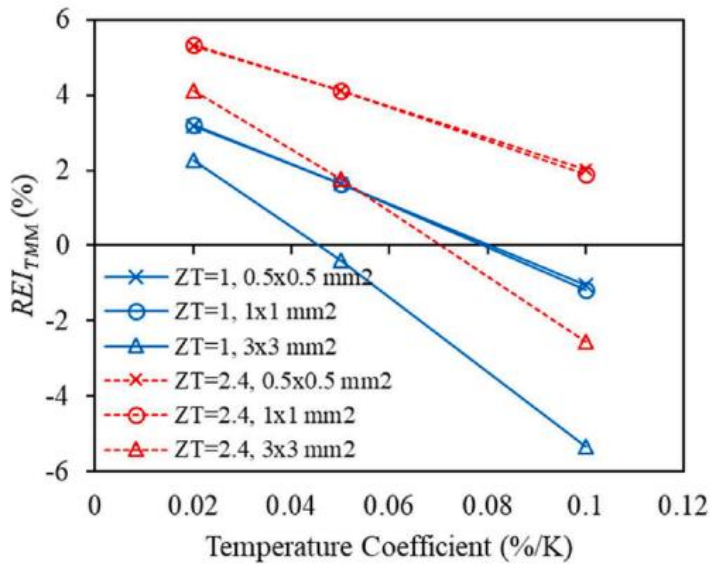


Figura 16. Mejora de la eficiencia relativa no coincidente con la temperatura en función del coeficiente de eficiencia de temperatura de la célula solar en diferentes áreas activas de célula, considerando valores de $ZT \approx 2.4$ (rojo) y $ZT \approx 1$ (azul).

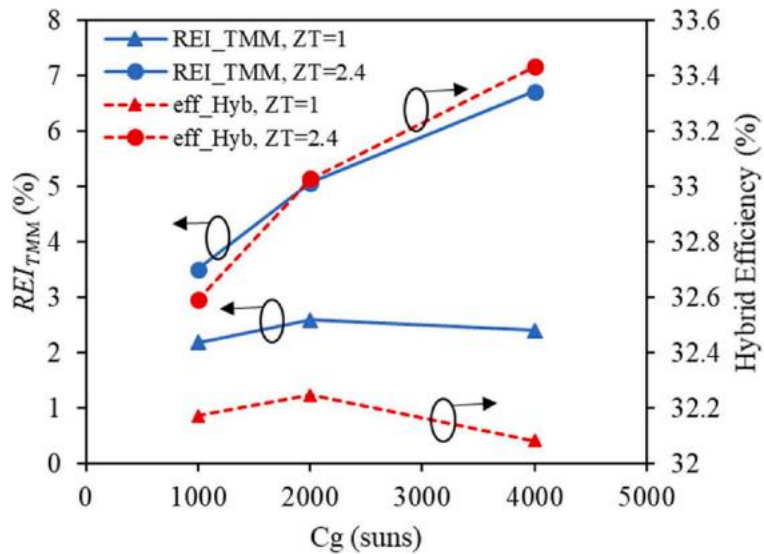


Figura 17. Mejora de la eficiencia relativa no coincidente con la temperatura (azul) y eficiencia híbrida (rojo) en función de la concentración geométrica, considerando valores de $ZT \approx 2.4$ (círculo) y $ZT \approx 1$ (triángulo). Condiciones: $A_{\text{cell}} = 1 \times 1 \text{ mm}^2$, $AR = 13$, $TC = -0.05 \text{ \%}/\text{K}$ y $R_{\text{th}} = 5 \text{ K}/\text{W}$.

A partir de los resultados obtenidos del análisis paramétrico, se definió un receptor híbrido optimizado para una concentración geométrica de 4000x. Para la simulación se empleó una micro-célula solar de $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ con un coeficiente de temperatura $-0.02 \text{ \%}/\text{K}$. Se estableció el valor máximo de ZT estudiado, ($ZT \approx 2.4$) y una resistencia baja resistencia térmica para el sistema de refrigeración ($1 \text{ K}/\text{W}$). El diseño del módulo TE se ajustó (relación de área, factor de llenado y altura de la pierna) para que no exceda la temperatura de celda de $150 \text{ }^\circ\text{C}$ operando bajo CSOC. Los resultados mostraron que con esta configuración es posible mejorar un 10.8 \% la eficiencia de un sistema híbrido respecto a un sistema CPV equivalente.

Las principales **conclusiones** que se obtuvieron de este estudio fueron que el coeficiente de temperatura de la célula solar, junto con la figura de mérito ZT y el área de célula solar respectivamente, son los principales parámetros a tener en cuenta a la hora de llevar a cabo el diseño de un sistema híbrido. Sin embargo, debido al compromiso entre degradación de la eficiencia de la célula y la ganancia en eficiencia del termoelectrico al aumentar los gradientes de temperatura entre lado caliente y frío, es necesario investigar y optimizar cada receptor para unas condiciones de concentración y temperatura de célula establecidas. Para estudiar el potencial de estos sistemas en altas concentraciones se optimizó un receptor híbrido a 4000x de concentración geométrica sin exceder los 150 °C de temperatura en la célula solar. Se consideró para ello células de 0.5 × 0.5 mm² con un coeficiente de temperatura de -0.02 %/K, un termoelectrico con un ZT de 2.4, y una resistencia térmica de 1 K/W. Los resultados mostraron que este receptor lograba un REI_{TMM} máximo de 10.8 % en comparación con un receptor CPV sin hibridar que utiliza la misma célula solar trabajando a la misma concentración. Los resultados de este estudio muestran el gran potencial de mejora de la hibridación trabajando a ultra altos niveles de concentración. Sin embargo, para que estos prometedores resultados se hagan realidad, se requiere una amplia investigación para que permitan el desarrollo de nuevos sistemas ópticos capaces de alcanzar niveles de concentración ultra altos con buena eficiencia óptica y ángulo de aceptación, arquitecturas innovadoras de micro-células solares de alta eficiencia y bajos TCs, mecanismos de enfriamiento potentes para receptores solares, y nuevos materiales termoelectricos que mejoren su eficiencia.

5.2.4 Objetivo 4. Fabricación y/o montaje de mono-módulo UHCPV-TEG y caracterización en condiciones reales de operación

Tabla 5. Lista de publicaciones relacionadas con el Objetivo 4.

Publicación n°5	“Design, manufacturing and indoor/outdoor testing of a hybrid thermoelectric-concentrator photovoltaic mono-module at unprecedented ultra-high concentration levels”
-----------------	--

El objetivo número 4, “Fabricación y/o montaje de mono-módulo UHCPV-TEG y caracterización en condiciones reales de operación” se engloba dentro del artículo 5.

En el artículo número 5 “**Design, manufacturing and indoor/outdoor testing of a hybrid thermoelectric-concentrator photovoltaic mono-module at unprecedented ultra-high concentration levels**” se procedió al diseño, montaje y caracterización de un mono-modulo híbrido UHCPV-TEG, tanto en condiciones controladas de laboratorio (*indoor*) como condiciones reales de funcionamiento a sol real (*outdoor*). El objetivo de este estudio fue fabricar un prototipo de modulo híbrido capaz de trabajar a niveles de concentración ultra altos y medirlo en condiciones reales de operación para comprobar así su viabilidad técnica. También se midió en el exterior un sistema equivalente CPV no híbrido con fines comparativos. El prototipo de sistema CPV-TEG de ultra alta concentración estaba compuesto por una lente Fresnel de *Silicon on Glass* (SoG) de 330 × 330 mm² como elemento óptico primario (POE); un homogeneizador reflexivo en forma de pirámide truncada como elemento óptico secundario (SOE); una célula solar de triple unión (3JSC) de GaInP/GaInAs/Ge ensamblada en una pequeña placa de circuito impreso (PCB) de cobre; un módulo TEG; y un intercambiador de calor con aletas de aluminio extruido. La célula solar analizada es del tipo 3C44 de 5.5 × 5.5 mm² de la empresa AZURSPACE®. Esta célula solar ha sido optimizada por el fabricante para alta concentración (1000 soles) y tiene

el menor coeficiente de temperatura (TC) visto en la literatura ($-0.106 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$). Se empleó un intercambiador de calor de aletas de aluminio con una resistencia térmica de $2.83 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Para la elección del módulo TEG, se estudiaron previamente tres tipos de receptores híbridos CPV-TEG con diferentes TEG (A, B y C), de diferentes áreas y espesores, y un receptor CPV sin hibridar. Para unir la superficie entre la 3JSC y el TEG, se empleó una grasa térmica de silicona con una conductividad térmica de $2.9 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ de RS Pro® (No ref: 217–3835). Los cuatro sistemas (los tres híbridos más el sistema CPV sin hibridar) incorporaban un SOE refractivo de concentración geométrica $3\times$, diseñado previamente mediante software comercial TracePro®. Los marcos del SOE se diseñaron con el software Solidworks® y se imprimieron con una impresora 3D *Fused Deposition Modeling* (FDM) (Creality CR-10 v3) de 0.1 mm de resolución y filamento de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) de 1.75 mm de diámetro. Se fijó un reflector de película fina especular de 0.5 mm de espesor y una reflectividad espectral del 95% de ALANOD® en la pared interior del marco impreso. Se montaron los 4 receptores, junto con el intercambiador de calor de aletas, y se caracterizaron a bajos niveles de concentración utilizando un simulador solar de luz continua marca ORIEL® modelo LCS-100 de clase ABB. La eficiencia óptica y el ángulo de aceptación obtenidos en la simulación para SOE seleccionado fueron de 76.6 \% y $\pm 0.42^{\circ}$ respectivamente. Para los receptores CPV-TEG, se utilizaron cuatro termopares tipo J (TCJ) para medir la temperatura superficial de: (1) superficie de contacto de la 3JSC (*spreader*), (2) el lado caliente del TEG, (3) el lado frío del TEG y (4) temperatura del intercambiador de calor. Para el receptor CPV sin hibridar, solo se utilizaron dos termopares tipo J para medir la superficie de contacto de la 3JSC y las temperaturas del intercambiador de calor. La temperatura máxima del 3JSC no se pudo medir directamente con un TCJ porque esto implicaría sombrear la célula solar. Por ello, en este estudio, la temperatura máxima del 3JSC fue calculada mediante simulaciones térmicas 3D implementadas en COMSOL® (ver Figura 21). En la Figura 18 se ilustra un esquema de la primera etapa de la caracterización experimental *indoor* del receptor híbrido. La temperatura ambiente se mantuvo a $20 \pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. El nivel de irradiación se controló variando la distancia receptor-lámpara (distancia de trabajo), donde se obtuvo un rango entre 1.3 y 17.2 soles de concentración. El nivel de irradiación efectiva se midió usando una célula solar GaInP/GaInAs/Ge calibrada.

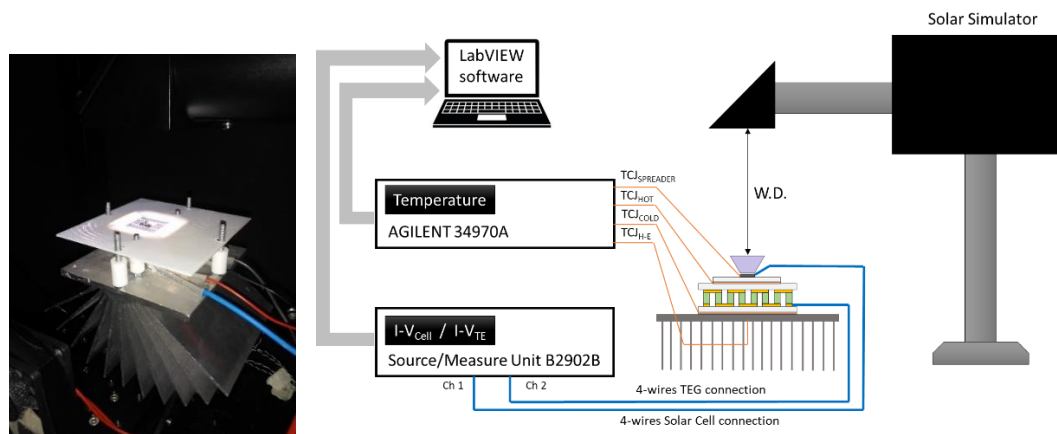


Figura 18. Caracterización del ensamblaje del receptor híbrido CPV-TEG en el simulador solar de área pequeña Clase ABB ORIEL LCS-100 (izquierda). Representación gráfica de la medición en interiores con el Simulador solar de área pequeña Clase ABB (derecha).

La segunda etapa en la caracterización en interior corresponde a la medida de curvas I-V con el simulador solar *multi-flash* HELIOS 3198 (ver Figura 19). En este montaje se analizó el rendimiento eléctrico y óptico del receptor híbrido con el sistema óptico completo (POE + SOE)

para alcanzar niveles ultra alta concentración. En esta caracterización experimental, el mono-módulo híbrido funciona como un dispositivo CPV debido a las características del simulador solar *multi-flash* que emite los destellos cortos con una duración inferior a 10 ms. Se fijaron diferentes máscaras opacas en la lente primaria Fresnel para obtener diferentes concentraciones geométricas: 476×, 1072×, 2066×, 3600× (ver Figura 19 izquierda), manteniendo la misma distancia focal. El nivel de radiación se mantuvo en $930 \pm 5 \text{ W/m}^2$ y la temperatura ambiente en $25 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ para todas las medidas. El índice *spectral matching ratio* (SMR) entre las sub-células *top* y *middle* se controló a través de las medidas de las corrientes de las *isotypes* con una estructura equivalente a la célula solar MJ empleada en el prototipo. El SMR se tiene en cuenta debido a la alta sensibilidad espectral de los módulos CPV causada por el uso de células solares compuestas por varias sub-células con diferentes bandas. El valor de SMR (top/mid) se mantuvo constante en 1 ± 0.03 para todas las mediciones.

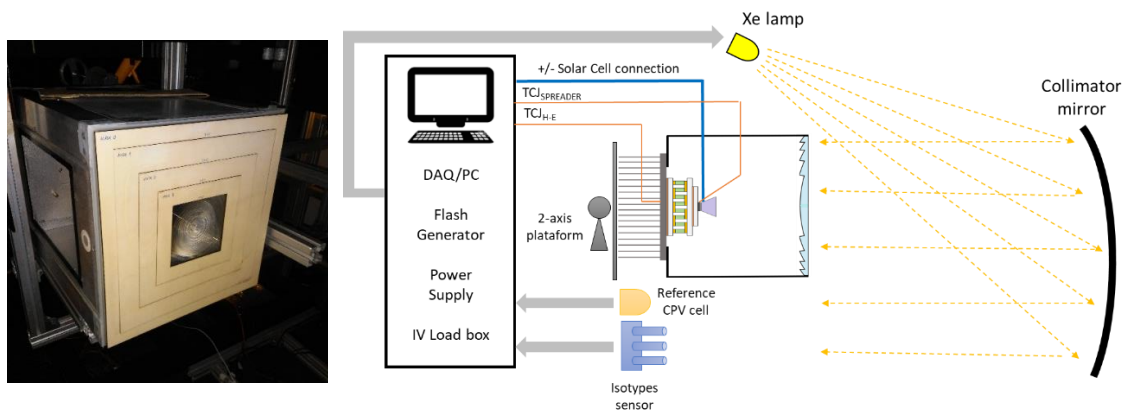


Figura 19. Mono-módulo UHCPV-TEG con diferentes máscaras de lentes para caracterización eléctrica interior (izquierda). Representación gráfica de la medición en interiores con *Multi-Flash Solar Simulator* HELIOS 3198 utilizando diferentes máscaras de lentes (derecha).

La caracterización experimental con condiciones reales de funcionamiento (*outdoor*) se realizó en las instalaciones disponibles en la terraza del Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra, Energía y Medio Ambiente (CEACTEMA) de la Universidad de Jaén (37.8°N , -3.8°E). El prototipo se probó en condiciones reales de funcionamiento para las concentraciones geométricas de 476×, 1071× y 2066×. No se realizó la caracterización para la concentración geométrica más alta (3600×) debido a las temperaturas extremadamente altas que se alcanzarían en la célula solar según las simulaciones realizadas. Las curvas características I-V tanto de la célula solar como del TEG se midieron a intervalos de 10 minutos, desde las 10:00 h hasta las 14:00 h (UTC+2). Se utilizó una estación meteorológica GEONICA 3000C (ver Figura 11) para monitorizar las siguientes variables atmosféricas: velocidad del viento, temperatura del aire y radiación normal directa. Se eligieron tres días diferentes para medir el sistema híbrido con diferentes máscaras de lentes, comenzando con la máscara con la concentración geométrica más baja (476×) y terminando con la máscara con la concentración geométrica más alta (2066×). El sistema sin hibridar también se midió durante dos días para dos concentraciones geométricas: 476× y 1071×. Es importante señalar que, en todas las medidas realizadas, la célula solar y el módulo TEG estuvieron operando en condiciones de circuito abierto (excepto por el pequeño intervalo de tiempo requerido por el trazador de curvas para medir cada curva I-V). Para que los dispositivos generen energía deben estar conectados a un inversor con al menos dos seguidores del punto de máxima potencia (MPPT), uno para la célula solar y otro para el TEG. Sin embargo, el modo de funcionamiento continuo en el punto de máxima potencia está fuera del alcance de este estudio. Esta decisión tiene varias implicaciones: primero, las temperaturas alcanzadas en

los experimentos realizados van a ser superiores a las temperaturas que se alcanzarían si los dispositivos generando energía, ya que en este último caso no toda la radiación que llega se transformaría en calor. En segundo lugar, las eficiencias eléctricas calculadas a partir de datos I-V de los experimentos realizados en circuito abierto van a ser diferentes de las obtenidas con los dispositivos que generando energía. Las eficiencias de las células solares serían ligeramente superiores en condiciones reales debido a las temperaturas más bajas alcanzadas, mientras que las eficiencias de los TEG serían ligeramente inferiores debido a las menores diferencias de temperatura entre los lados frío y caliente.

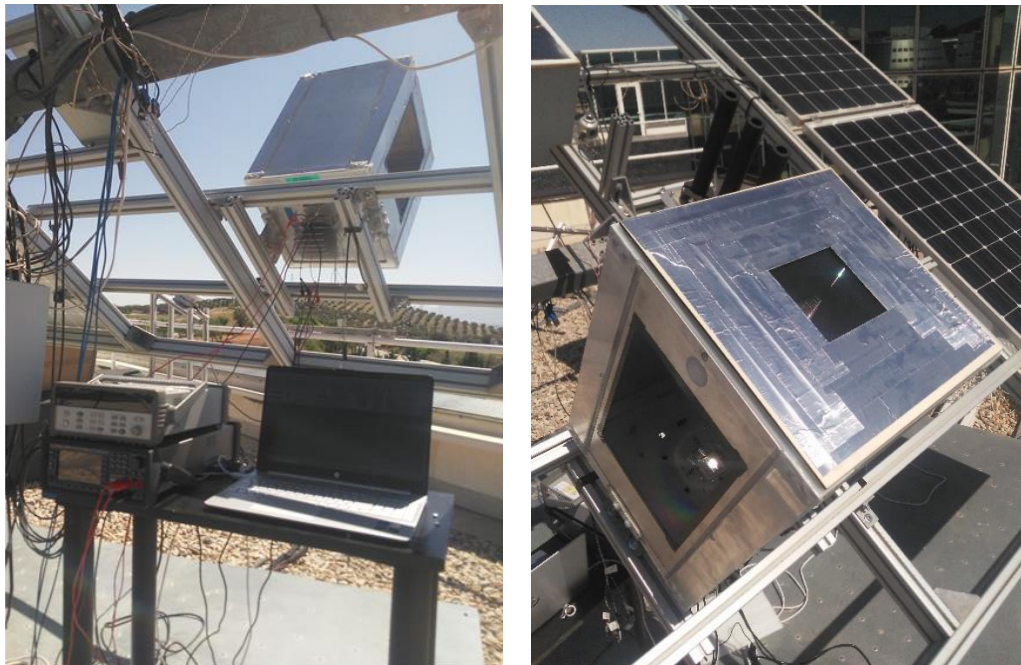
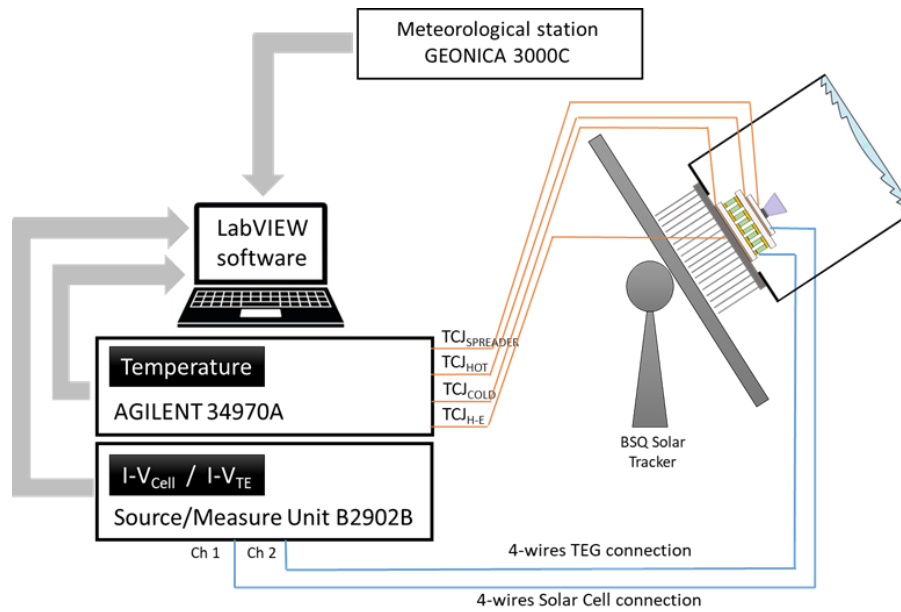


Figura 20. Representación gráfica del montaje de medida exterior (arriba). Imagen del sistema de medición exterior (abajo a la izquierda). Imagen del monomódulo UHCPV-TEG para la caracterización exterior (abajo-derecha).

Los primeros **resultados** de las medidas en el simulador continuo mostraron que el TEG B presentó un mayor aumento de la eficiencia con respecto al receptor no híbrido, con el 0.42 %,

operando a 17.2 soles. Esto se puede explicar por el mayor espesor del TEG B, lo que permite alcanzar mayores gradientes de temperatura entre el lado frío y el caliente, sin embargo, la temperatura máxima de célula solar aumenta mucho en el caso del TEG B. Por esta razón se eligió el receptor A para diseño final del prototipo en lugar del B, ya que la temperatura de célula alcanzada con el receptor A era mucho menor, y la diferencia de potencia extra generada entre los receptores A y B fue casi insignificante. La Figura 21 se muestra una simulación térmica del receptor híbrido operando a 800 soles de concentración efectiva, en condiciones de circuito abierto. Para el caso del TEG A, las simulaciones mostraron temperaturas de operación de célula que van desde 46.1 °C, a 300 soles, hasta 282.8 °C a 2700 soles.

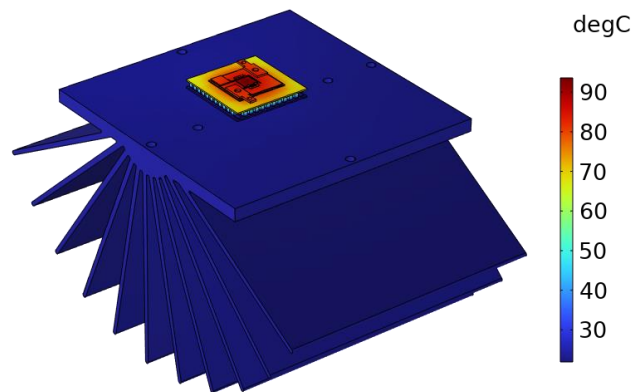


Figura 21. Estimación de temperatura superficial por Análisis de Elementos Finitos en operación OC con TEG módulo A. Condiciones: DNI = 900 W/m², T_{air} = 20°C, U_{wind} = 2 m/s, C_x = 800 soles.

Las medidas realizadas en simulador solar *multi-flash* se utilizaron para caracterizar la óptica y el rendimiento eléctrico global del mono-módulo trabajando a ultra altos niveles de concentración, para lo que se utilizaron diferentes máscaras de lente. Las curvas características I-V se presentan en la Figura 22 para las diferentes máscaras de lente utilizadas bajo una DNI de 930 ± 5 W/m². Como era de esperar, la corriente de cortocircuito aumenta considerablemente con la concentración, mientras que el voltaje de circuito abierto se ve poco afectado. Además, el *fill-factor* de la célula solar empeoró a medida que se aumentaba la concentración, principalmente debido a un aumento de la resistencia en serie de la célula. Se consiguió alcanzar una concentración efectiva máxima de 1719 soles para una lente de 3600×, lo que significa menos de un 50 % de eficiencia óptica alcanzada. La eficiencia óptica disminuye linealmente del 74.2 % al 48.0 % a medida que aumenta la concentración. Una limitación de corriente excesiva en la parte superior de la sub-célula debido a la aberración cromática puede ser la causa de la caída de la eficiencia óptica, además de otros posibles problemas como la dispersión de la luz en las superficies (*scattering*). La eficiencia de la célula solar cayó del 38.9 % (353 soles) al 35.8 % (1719 soles). Este descenso en la eficiencia puede justificarse también por el aumento de las pérdidas debido a la resistencia en serie a altas concentraciones. También se midieron los coeficientes de temperatura de los parámetros eléctricos de la 3JSC. Para ello, se controló la temperatura con el módulo TEG del receptor híbrido conectándolo a una fuente de alimentación. El TC_{PMPP} promedio fue de -0.189 %/K. Este valor está dentro del rango típico para módulos HCPV vistos en la literatura (entre -0.15 y -0.34 %/K) [14].

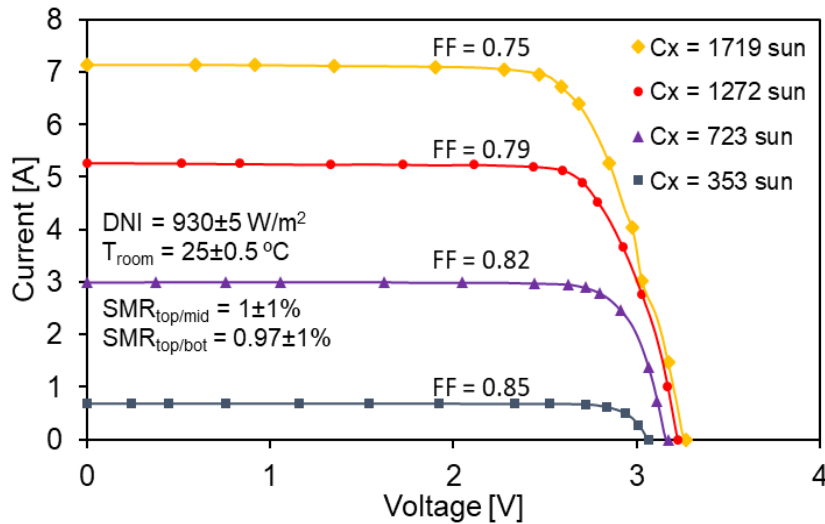


Figura 22. Curvas características de corriente-voltaje del mono-módulo UHCPV-TEG con diferentes máscaras de lentes medidas en el simulador solar *multi-flash*.

Los resultados de la caracterización del prototipo desarrollado en condiciones *outdoor* se muestra en la Figura 23 donde se recoge el comportamiento térmico y eléctrico del mono-módulo CPV-TEG para los tres días medidos. Cada día se empleó una máscara de lente específica: a) $C_{\text{geo}} = 476\times$, b) $C_{\text{geo}} = 1071\times$, y c) $C_{\text{geo}} = 2066\times$.

El primer día (18/05/2022) fue el más caluroso, con temperaturas del aire que oscilaron entre los 28 y los 36 °C. La DNI en este día fue relativamente baja con respecto a los días siguientes, con un máximo de 842 W/m² a las 14:00h (UTC+2). A las 13:00 h se registró una temperatura máxima alcanzada en el receptor fue de 66.3 °C, lo que corresponde a una temperatura máxima de célula de 71 °C según la estimación numérica. En cuanto a la eficiencia eléctrica, no se observó variación significativa en las eficiencias durante el día. La eficiencia eléctrica de la célula fue de alrededor del 35 %, mientras que la eficiencia del TEG estuvo en el rango de 0.8 a 0.9 %. La eficiencia global del módulo híbrido (afectado por la eficiencia óptica) fue la más alta obtenida, con un valor medio del 25.9 %. El TEG mostró una contribución promedio del 2.26 % de la potencia total de salida. El segundo día (07/06/2022) la DNI aumentó de 841 a 943 W/m² y la temperatura del aire osciló entre 27 y 34 °C. La temperatura alcanzada en el receptor fue de 113.5 °C, lo que corresponde a una temperatura máxima de célula estimada de 124.8 °C. La eficiencia eléctrica de la célula se vió reducida en este caso hasta aproximadamente un 32 % en promedio, debido al aumento de temperatura. La eficiencia media global del sistema híbrido fue del 20.2 %. La eficiencia del TEG apenas superó a la obtenida en el primer día de experimento, llegando hasta un 1.0 %. La contribución del TEG sobre la energía eléctrica total aumentó hasta el 3.84% en este caso. El tercer día (09/06/2022) fue el de mayor concentración geométrica (2066×). La DNI varió entre 760 W/m² hasta un máximo de 926 W/m². La temperatura del aire pasó de 30 a 34 °C durante el tiempo de medida. La temperatura registrada por el TCJ en el receptor de célula alcanzó un máximo de 172 °C, alrededor de las 12:28h. Bajo esta condición, la temperatura máxima de célula se estimó en 194 °C. A partir de ese momento se observó una caída drástica en el valor de V_{oc} e I_{sc} de la célula hasta valores próximos a 0. Esto fue un claro signo de fallo que pudo deberse varias circunstancias observadas: por un lado, la lámina reflectora del SOE mostró claros signos de quemadura y de deformación por estrés térmico; por otro lado, en la superficie de la célula solar aparecieron también signos de quemadura, así como deformaciones y roturas de varios *fingers*, causados probablemente

por la fusión del material metálico de contacto. Los valores de eficiencia de la célula cayeron del 32.4 % al 29.2 % en el momento de la falla. En el caso del módulo TEG, la eficiencia eléctrica se mantuvo prácticamente constante en un nivel cercano al 1.5 %. La eficiencia global del sistema híbrido alcanzó su máximo diario (21.1 %) en el momento inicial de las medidas (10:00 h) y bajó hasta el 17.3 % en el momento del fallo. El valor promedio de la eficiencia global fue del 18.6 %. El aporte máximo registrado del módulo TEG fue de 4.87% sobre la potencia eléctrica total.

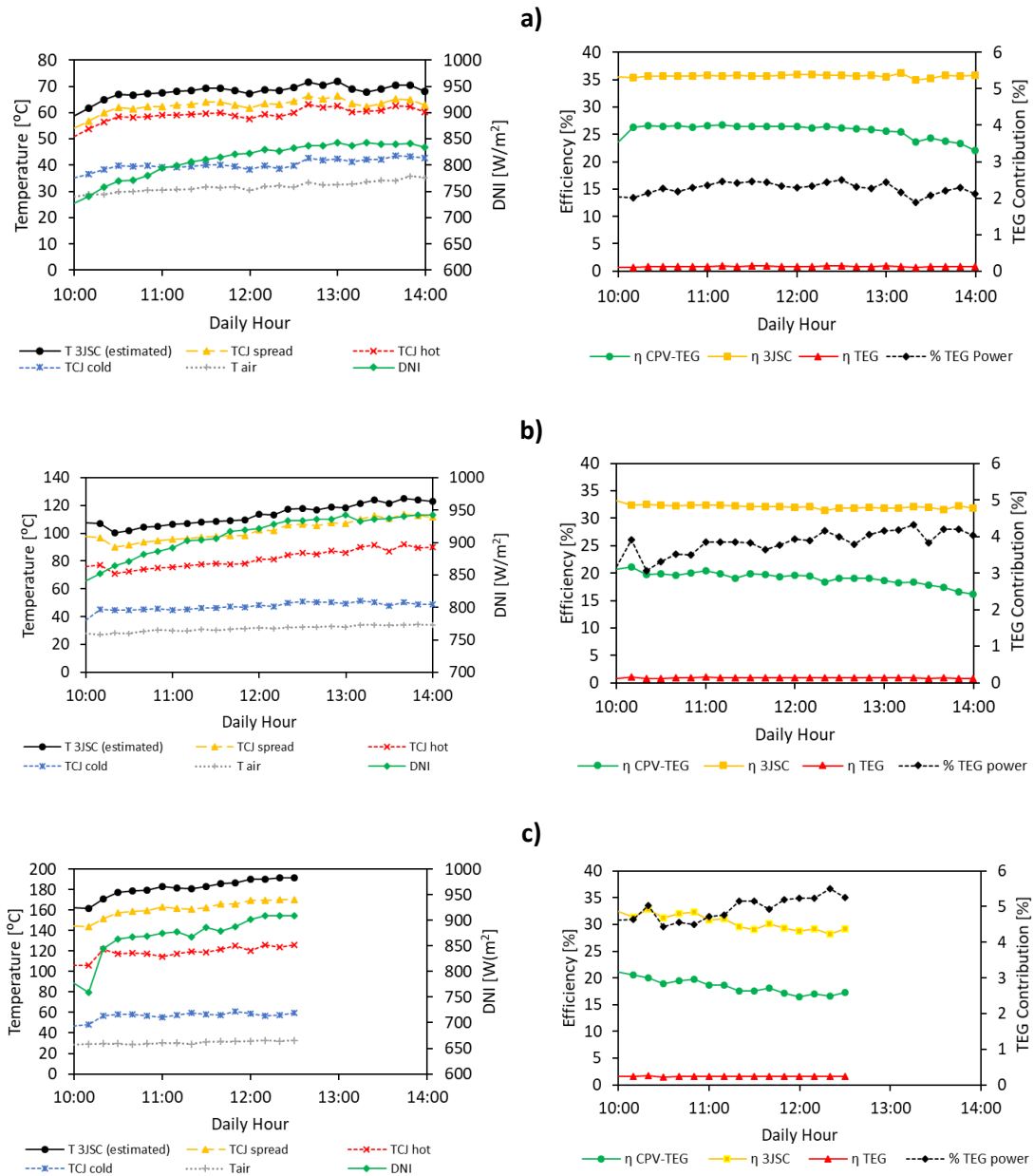


Figura 23. Variación exterior diaria de temperaturas y DNI (izquierda), eficiencias y relación de potencia TEG respecto a la potencia global (derecha) considerando tres máscaras de lentes diferentes: a) $C_{geo} = 476\times$; b) $C_{geo} = 1071\times$; c) $C_{geo} = 2066\times$.

Cómo se comentó, se midió un también un sistema CPV con la misma óptica y célula solar que se empleó en el sistema híbrido CPV-TEG. En distintos días y bajo condiciones atmosféricas similares, se utilizaron dos máscaras de lentes: $C_{geo} = 476\times$ y $C_{geo} = 1071\times$. No se tomaron medidas con la máscara de 2066 \times debido a la falla de la célula solar mencionada anteriormente. Para comparar el funcionamiento de los sistemas CPV-TEG y CPV, medidos en días diferentes,

los resultados fueron representados en función de la DNI instantánea, que es la principal variable atmosférica que influye en el comportamiento de ambos sistemas (ver Figura 23). La diferencia de temperatura entre la célula solar y ambiente también fue registrada para ver el impacto de la integración del TEG en la temperatura de célula (Figura 23.a).

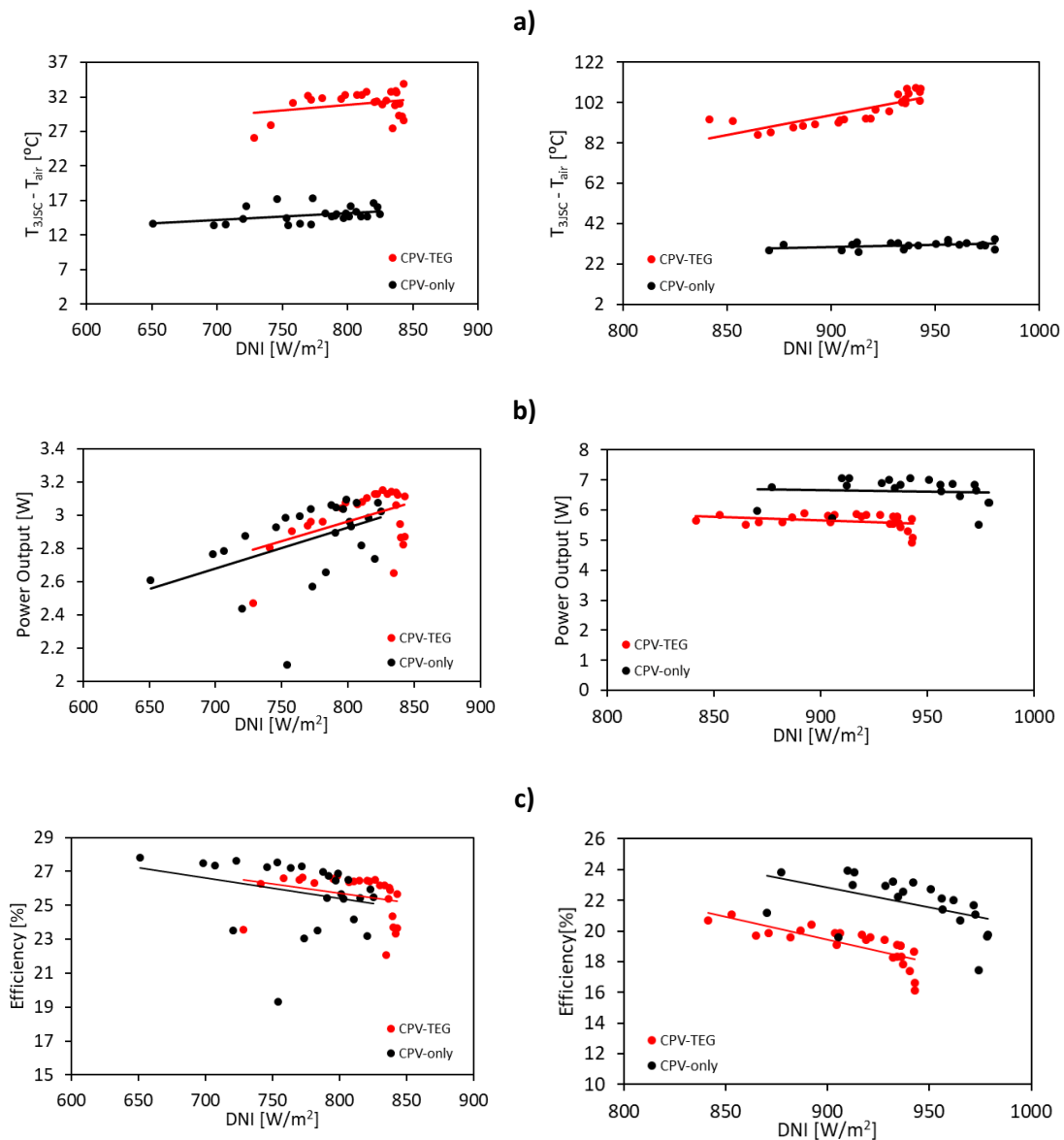


Figura 24. Rendimiento térmico y eléctrico del sistema CPV-TEG en comparación con el sistema CPV en función de DNI, utilizando dos máscaras de lentes: $C_{geo} = 476x$ (izquierda) y $C_{geo} = 1071x$ (derecha): a) Diferencia de temperatura entre la celda solar y el ambiente; b) Potencia global de salida; c) Eficiencia eléctrica global. También se indica la línea de regresión de cada conjunto de datos.

En la Figura 23.a se puede observar cómo esta diferencia aumentó casi linealmente con la DNI en todos los casos estudiados. Sin embargo, la pendiente de la línea de regresión es mayor para el caso del sistema CPV-TEG que para el sistema CPV sin hibridar. Además, las diferencias de temperatura fueron sensiblemente mayores para el sistema híbrido, especialmente a muy alta concentración. A $476x$, la diferencia de temperatura estuvo entre 27 y 34 °C para el sistema CPV-TEG, mientras que para el sistema CPV estuvo entre 13 y 17 °C. Por otro lado, a $1071x$, la diferencia de temperatura máxima fue de 110 °C para CPV-TEG frente a 34 °C en el sistema CPV. En la Figura 24.b se representa la producción total de energía eléctrica según los subsistemas

CPV y TEG. Se puede apreciar que la potencia de salida aumenta con DNI para ambos sistemas bajo una relación de concentración de 476x. Sin embargo, a 1071x la potencia de salida comienza a disminuir con la DNI debido a la caída en la eficiencia por temperatura en la célula y las pérdidas de resistencia en serie. A 476x, las líneas de regresión de CPV-TEG y CPV son casi coincidentes, lo que implica que ambos sistemas generan niveles similares de energía eléctrica. Sin embargo, a 1071x, la potencia de salida es claramente mayor para el caso del sistema CPV. Es decir, la degradación de la célula solar con la temperatura fue excesiva en el sistema CPV-TEG bajo esas condiciones. En vista de los resultados que se muestran en la Figura 24.c, la eficiencia global claramente disminuye con la DNI en todos los casos. Es notable que los niveles de eficiencia por debajo de 1071x son bastante más bajos que los de 476x para ambos sistemas. Esta caída se explica por la degradación del rendimiento óptico de los elementos concentradores. Por debajo de 476x, la eficiencia máxima de los sistemas CPV-TEG y CPV ronda el 26.8 % y el 27.6 % respectivamente. Sin embargo, la eficiencia promedio del sistema CPV-TEG es apenas un 0,7% mayor que el sistema CPV en magnitud absoluta ver (Figura 24.c (izquierda)). Bajo 1071x, el sistema solo CPV muestra una eficiencia máxima del 23.8 % y el CPV-TEG, un máximo del 20.7 % (ver Figura 24.c (derecha)). En este caso, la eficiencia promedio del sistema CPV fue de 2.8 % puntos porcentuales mayor que CPV-TEG en magnitud absoluta.

A la vista de estos resultados podemos extraer las siguientes **conclusiones**. La eficiencia óptica del mono-módulo disminuye hasta el 50 % conforme aumenta la concentración geométrica. La contribución termoeléctrica aumentó con la concentración, del 2.26 % de la potencia total a 476x al 4.87 % a 2066x debido a la mayor diferencia de temperatura entre los lados frío y caliente del termoeléctrico. Los sistemas CPV-TEG y CPV mostraron una potencia y un rendimiento similar bajo una concentración de 476x. La hibridación no parece ser energéticamente factible para concentraciones muy altas o ultra altas utilizando células solares y TEG convencionales de última generación. La mayoría de los estudios teóricos que anticipan los beneficios de aumentar la concentración no consideran la caída en la eficiencia óptica que ocurre en los elementos ópticos convencionales. La caída en la eficiencia óptica y la eficiencia de la célula solar (debido al aumento de temperatura y pérdidas de resistencia en serie) provocó que el comportamiento energético del sistema híbrido bajo concentraciones elevadas (1071x en exteriores) fuera peor que el sistema CPV. Esto significa que los componentes de última generación (óptica, célula solar y generador termoeléctrico) aún no están maduros para aprovechar la hibridación bajo concentraciones ultra altas. La célula solar sufrió daños irreversibles durante el experimento exterior a 2066x cuando la alcanzó una temperatura máxima de 194 °C.

5.3 Otras publicaciones relacionadas con la tesis

Tabla 6. Listado de otras publicaciones relacionadas con la tesis

Publicación nº6	<i>“Ray tracing comparison between triple-junction and four-junction solar cells in PMMA fresnel-based high-CPV Units”</i>
Autores	J.P. Ferrer-Rodríguez, Álvaro Valera , Eduardo F. Fernández, Florencia Almonacid, Pedro Perez Higuera
Revista	<i>Energies</i>
Volumen, etc.	11(9), 2455
Fecha publicación	Septiembre 2018
Clasificación JCR	ENERGY & FUELS: 56/103 (Q3)
Índice de impacto	2.707 (2018)
DOI	10.3390/en11092455

5.3.1 Publicaciones de congresos

- 1) **Álvaro Valera**, Eduardo F. Fernández, Florencia Almonacid, Pedro M. Rodrigo, “*Feasibility of Flat-Plate Heat-Sinks for Ultra-High Concentrations (> 2000 Suns) Using Microscale Solar Cells*”, Proceedings of the 2018 12th Spanish Conference on Electron Devices, CDE 2018, 2018, 8596790, DOI: 10.1109/CDE.2018.8596790.
- 2) **Álvaro Valera**, Eduardo F. Fernández, Pedro M. Rodrigo, J.P. Ferrer-Rodriguez, Pedro Perez Higuera, Florencia Almonacid, “*Finite element analysis of cooling mechanism by flat heat- sinks in ultra-high CPV systems*”, AIP Conference Proceedings, 2019, 2149, 020006-1, 020006-1, 15th, International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, CPV 2019. DOI: 10.1063/1.5124176
- 3) **Álvaro Valera**, María A. Ceballos, Pedro M. Rodrigo, Florencia Almonacid, Eduardo F. Fernández, “*Modelling and potential of hybrid micro-scaling multi-junction solar cell and thermoelectric generator*”, Proceedings of the 2021 13th Spanish Conference on Electron Devices, CDE 2021, 2021, pp. 70–73, 9455735. DOI: 10.1109/CDE52135.2021.9455735.
- 4) **Álvaro Valera**, María A. Ceballos, Pedro M. Rodrigo, Florencia Almonacid, Eduardo F. Fernández, “*Simulation of three-dimensional 4000x thermoelectric-concentrator photovoltaic receivers at different atmospheric conditions*”, AIP Conference Proceedings, 2022, 2550, 060007, 17th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, CPV 2021, DOI: 10.1063/5.0100306

6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Con el desarrollo de esta tesis doctoral se pretendía realizar aportaciones relevantes en el conocimiento y desarrollo de sistemas híbridos que aprovecharan el calor residual de los sistemas de alta concentración solar fotovoltaica (CPV). Con las ventajas que ofrece la tecnología termoeléctrica, se podría aumentar la eficiencia global del sistema y la producción eléctrica por unidad de superficie, con respecto a los actuales sistemas de concentración sin hibridar. En el desarrollo de esta tesis, se han estudiado previamente la capacidad de refrigeración de sistemas pasivos para niveles altos de concentración; posteriormente se han empleado diferentes modelos en 1D y en 3D, para simular, optimizar y comparar el rendimiento en la producción de energía eléctrica de sistemas híbridos respecto a los no híbridos; finalmente, se fabricó un prototipo de mono-módulo híbrido con los medios disponibles en el laboratorio y se caracterizó tanto en condiciones controladas de laboratorio (*indoor*) como bajo condiciones reales de operación (*outdoor*).

A continuación, se exponen las principales conclusiones alcanzadas:

- De los modelos térmicos 3D para optimizar la refrigeración de células solares trabajando bajo ultra altos niveles de concentración ($>2000\times$) se concluye que la miniaturización de las células solares es un aspecto clave a tener en cuenta para una adecuada gestión del calor. El uso de disipadores planos de aluminio y/o cobre pueden servir como solución a la disipación del calor producido en las células solares con menores de $1\times 1\text{ mm}^2$ para ultra altas concentraciones, al mismo tiempo que pueden utilizarse como parte estructural del módulo de concentración.
- Los primeros resultados del modelo numérico termo-electro-económico para un receptor híbrido pasivo CPV-TEG muestran que es técnicamente factible desarrollar sistemas CPV-TEG trabajando a concentraciones extremas de hasta $1900\times$ y áreas de células solares de $3\times 3\text{ mm}^2$ sin que se llegue a exceder los límites de temperatura de funcionamiento de la célula para tales concentraciones.
- Del proceso de optimización del coste de un sistema CPV-TEG se ha observado que existe un compromiso entre mejorar la eficiencia y reducir el coste: la optimización del sistema para maximizar la eficiencia aumenta de forma notable el coste del mismo, mientras que optimizar el coste conduce a pequeñas eficiencias del TEG. También se ha observado que la figura de mérito ZT del TEG y área del dispositivo son parámetros claves en el diseño, mientras que los parámetros estructurales del TEG, tales como: el *fill-factor*, la conductividad térmica del material TE, o largo y ancho del termoelemento, apenas van a influir en la eficiencia y el coste del sistema híbrido. Herramientas de optimización como las propuestas en este trabajo pueden ayudar a los diseñadores a encontrar el diseño óptimo para cada caso.

Según el modelo 1D empleado para predicción de generación eléctrica a partir de los datos atmosféricos recogidos durante un año en la localidad de Jaén, se obtiene que el rendimiento del sistema híbrido CPV-TEG es claramente superior al del dispositivo CPV sin hibridar para todas las condiciones de funcionamiento analizadas, especialmente para condiciones de elevada radiación directa. Así, por ejemplo, mientras que la eficiencia global de un sistema híbrido puede mejorar hasta en un 4.75 % en CSOC, ésta

mejora sólo sería del 4.30% si se utilizan las condiciones promedio anuales de sitio en lugar de las CSOC.

- El uso de modelos 3D para simulaciones mediante elementos finitos resulta fundamental para diseñar y optimizar los sistemas híbridos CPV-TEG, debido a su complejidad y su carácter dimensional. Del análisis paramétrico realizado se comprobó que el coeficiente de temperatura de la célula solar junto con la figura de mérito ZT del TEG y el área de la célula solar son, respectivamente, los parámetros que más influencia van a tener en la eficiencia global del sistema CPV-TEG.
- Debido a compromiso entre degradación de la eficiencia solar y la mejora en eficiencia al aumentar los gradientes de temperatura entre lado caliente y frío del termoelectrico, es necesario investigar y optimizar cada receptor híbrido CPV-TEG para unas condiciones de concentración y de temperatura de operación de célula establecidas previamente.
- La optimización del sistema desarrollado en esta Tesis muestra que, en este caso particular, la hibridación tiene un gran potencial de mejora de la eficiencia para ultra-altos niveles de concentración (4000x) si se utilizan materiales termoelectricos súper eficientes ($ZT > 2$), mostrando un aumento relativo en la eficiencia global del sistema del 10.8 %.
- De la caracterización experimental del prototipo de un mono-módulo híbrido CPV-TEG se observó que la eficiencia óptica del mono-módulo disminuye hasta el 50 % conforme aumenta la concentración geométrica. A pesar de ello, la contribución termoelectrica aumentó con la concentración, del 2.26 % de la potencia total a una concentración de 476x, hasta un 4.87 % a una concentración de 2066x, debido a la mayor diferencia de temperatura entre los lados frío y caliente del termoelectrico. Los sistemas CPV-TEG y CPV mostraron una potencia y un rendimiento similar bajo una concentración de 476x.

Como conclusión final podríamos decir que la hibridación no parece ser energéticamente factible para niveles de concentración muy altos o ultra altos con las células solares y TEG disponibles a día de hoy. La mayoría de los estudios teóricos que anticipan los beneficios de aumentar la concentración mediante la hibridación no consideran la caída en la eficiencia óptica que ocurre en los elementos ópticos convencionales. Para que estos prometedores resultados se hagan realidad, se requiere una amplia investigación para cubrir nuevos sistemas ópticos capaces de alcanzar niveles de ultra alta concentración con eficiencia óptica y ángulo de aceptación adecuados, arquitecturas innovadoras de micro-células solares de alta eficiencia y con buen comportamiento térmico, mecanismos de enfriamiento potentes para receptores solares, y nuevos materiales termoelectricos que mejoren su eficiencia.

Como de líneas de investigación futuras se proponen:

- Mejorar el modelo 3D de los sistemas híbridos considerando aspectos como la no uniformidad de la luz sobre la célula solar, las respuestas transitorias del sistema, e implementación de sistemas alternativos de refrigeración novedosos.
- Explorar nuevos diseños constructivos de módulos TEG que favorezcan su integración con la tecnología CPV.

- Desarrollar sistemas ópticos para ultra alta concentración más eficientes y con mayor aceptación angular, capaces de operar con micro-células.
- Estudiar nuevas configuraciones de sistemas de refrigeración pasivos que mejoren la evacuación de los receptores híbridos de ultra alta concentración.

Por último cabe destacar que, a partir de este trabajo, se han abierto nuevas líneas de investigación como es la aplicación de dispositivos TEG en la hibridación de convertidores de ópticos de potencia fotovoltaicos (OPC). Estos dispositivos OPC que han surgido como consecuencia del desarrollo de la tecnología CPV, se están empezando a utilizar como sistema de conversión de energía mediante fuentes de luz monocromáticas [69]. Las posibles aplicaciones para la transmisión inalámbrica de potencia se encuentran normalmente en medios naturales donde las temperaturas de operación son bajas o muy bajas [70]. Esto, junto con el bajo impacto de la temperatura en los OPC basados en dispositivos MJ, abre la posibilidad de aumentar la conversión general de energía mediante el uso de sistemas híbridos OPC- TEG.

7 REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency. International Energy Agency (IEA) World Energy Outlook 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary> 2022:524.
- [2] Causas y efectos del cambio climático | Naciones Unidas n.d. <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change> (accessed April 27, 2023).
- [3] International Energy Agency. Energy Technology Perspectives. Energy Technol Perspect 2022. <https://doi.org/10.1787/9789264109834-en>.
- [4] International Renewable Energy Agency (IRENA). World energy transitions outlook 2022. 2022.
- [5] FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS. Photovoltaics Report 2023.
- [6] Rodrigo P, Micheli L, Almonacid F. The High-Concentrator Photovoltaic Module. In: Pérez-Higueras P, Fernández EF, editors. High Conc. Photovoltaics, Cham: Springer International Publishing; 2015, p. 115–52. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15039-0>.
- [7] Shanks K, Senthilarasu S, Mallick TK. Optics for concentrating photovoltaics: Trends, limits and opportunities for materials and design. Renew Sustain Energy Rev 2016;60:394–407. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.01.089>.
- [8] Habraken S, Languy F. Nonimaging achromatic shaped Fresnel lenses for ultrahigh solar concentration. Opt Lett Vol 38, Issue 10, Pp 1730-1732 2013;38:1730–2. <https://doi.org/10.1364/OL.38.001730>.
- [9] Fernández EF, Almonacid F, Rodrigo PM, Pérez-Higueras PJ. CPV Systems, McEvoy's Handbook of Photovoltaics (3rd ed.). CPV Syst 2017:931 – 985.
- [10] Fernández EF, Talavera DL, Almonacid FM, Smestad GP. Investigating the impact of weather variables on the energy yield and cost of energy of grid-connected solar concentrator systems. Energy 2016;106:790–801. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.03.060>.
- [11] Gray JL. The Physics of the Solar Cell. Handb Photovolt Sci Eng 2011:82–129. <https://doi.org/10.1002/9780470974704.CH3>.
- [12] Philipps SP, Dimroth F, Bett AW. High-Efficiency III–V Multijunction Solar Cells. McEvoy's Handb Photovoltaics Fundam Appl 2018:439–72. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809921-6.00012-4>.
- [13] Geisz JF, France RM, Schulte KL, Steiner MA, Norman AG, Guthrey HL, et al. Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration. Nat Energy 2020 54 2020;5:326–35. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5>.
- [14] Pérez-Higueras P, Muñoz-Rodríguez FJ, Adame-Sánchez C, Hontoria-García L, Rus-Casas C, González-Rodríguez A, et al. High-concentrator photovoltaic power plants: Energy balance and case studies. In: Pérez-Higueras P, Fernández EF, editors. High Conc. Photovoltaics. Fundam. Eng. Power Plants, vol. 190, Springer Verlag; 2015, p. 443–77. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15039-0_16/COVER.
- [15] Pérez-Higueras P, Ferrer-Rodríguez JP, Almonacid F, Fernández EF. Efficiency and acceptance angle of High Concentrator Photovoltaic modules: Current status and indoor

- measurements. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;94:143–53. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.06.011>.
- [16] Goldsmid HJ. *The Thermoelectric and Related Effects. Introd. to Thermoelectr.*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2016, p. 1–7. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7_1.
- [17] Ravindra NM, Jariwala B, Bañobre A, Maske A. *Introduction. Thermoelectr. Fundam. Mater. Sel. Prop. Perform.*, Cham: Springer International Publishing; 2019, p. 1–5. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96341-9_1.
- [18] Goldsmid HJ. *Thermoelectric Modules and Their Application. Introd. to Thermoelectr.*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2016, p. 197–220. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7_10.
- [19] Rowe DM. Chapter 3. Conversion Efficiency and Figure-of-Merit. *CRC Handb. Thermoelectr.*, CRC Press; 1995, p. 19–26.
- [20] Champier D. Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Convers Manag* 2017;140:167–81. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.02.070>.
- [21] Fleurial J-P, Borshchevsky A, Caillat T. New thermoelectric materials and devices for terrestrial power generators. *Sp. Technol. Appl. Int. forum (STAIF - 97)*, ASCE; 1997, p. 293–8. <https://doi.org/10.1063/1.52005>.
- [22] Liu W, Hu J, Zhang S, Deng M, Han C-G, Liu Y. New trends, strategies and opportunities in thermoelectric materials: A perspective. *Mater Today Phys* 2017;1:50–60. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2017.06.001>.
- [23] Venkatasubramanian R, Siivola E, Colpitts T, O’Quinn B. Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit. *Nature* 2001;413:597–602. <https://doi.org/10.1038/35098012>.
- [24] Wu Y, Chen Z, Nan P, Xiong F, Lin S, Zhang X, et al. Lattice Strain Advances Thermoelectrics. *Joule* 2019;3:1276–88. <https://doi.org/10.1016/J.JOULE.2019.02.008>.
- [25] Vorobiev Y, González-Hernández J, Vorobiev P, Bulat L. Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion. *Sol Energy* 2006;80:170–6. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2005.04.022>.
- [26] Sark WGJHM va. Feasibility of photovoltaic - Thermoelectric hybrid modules. *Appl Energy* 2011;88:2785–90. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.008>.
- [27] Zhang J, Xuan Y, Yang L. Performance estimation of photovoltaic-thermoelectric hybrid systems. *Energy* 2014;78:895–903. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.087>.
- [28] Liao T, Lin B, Yang Z. Performance characteristics of a low concentrated photovoltaic-thermoelectric hybrid power generation device. *Int J Therm Sci* 2014;77:158–64. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.10.013>.
- [29] Attivissimo F, Nisio A Di, Maria A, Lanzolla L, Paul M. Feasibility of a Photovoltaic – Thermoelectric Generator : Performance Analysis and Simulation Results. *IEEE Trans Instrum Meas* 2015;64:1158–69.
- [30] Rezanía A, Sera D, Rosendahl LA. Coupled thermal model of photovoltaic-thermoelectric hybrid panel for sample cities in Europe. *Renew Energy* 2016;99:127–35. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.06.045>.

- [31] Bjørk R, Nielsen KK. The performance of a combined solar photovoltaic (PV) and thermoelectric generator (TEG) system. *Sol Energy* 2015;120:187–94. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.07.035>.
- [32] Bjørk R, Nielsen KK. The maximum theoretical performance of unconcentrated solar photovoltaic and thermoelectric generator systems. *Energy Convers Manag* 2018;156:264–8. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.11.009>.
- [33] Li G, Zhou K, Song Z, Zhao X, Ji J. Inconsistent phenomenon of thermoelectric load resistance for photovoltaic–thermoelectric module. *Energy Convers Manag* 2018;161:155–61. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.079>.
- [34] Cui T, Xuan Y, Li Q. Design of a novel concentrating photovoltaic-thermoelectric system incorporated with phase change materials. *Energy Convers Manag* 2016;112:49–60. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.008>.
- [35] Rezanía A, Rosendahl LA. Feasibility and parametric evaluation of hybrid concentrated photovoltaic-thermoelectric system. *Appl Energy* 2017;187:380–9. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.11.064>.
- [36] Yin E, Li Q, Xuan Y. Optimal design method for concentrating photovoltaic-thermoelectric hybrid system. *Appl Energy* 2018;226:320–9. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.127>.
- [37] Mahmoudinezhad S, Rezanía A, Rosendahl LA. Behavior of hybrid concentrated photovoltaic-thermoelectric generator under variable solar radiation. *Energy Convers Manag* 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.025>.
- [38] Shittu S, Li G, Zhao X, Akhlaghi YG, Ma X, Yu M. Comparative study of a concentrated photovoltaic-thermoelectric system with and without flat plate heat pipe. *Energy Convers Manag* 2019;193:1–14. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.04.055>.
- [39] Shittu S, Li G, Zhao X, Ma X, Akhlaghi YG, Fan Y. Comprehensive study and optimization of concentrated photovoltaic-thermoelectric considering all contact resistances. *Energy Convers Manag* 2020;205:112422. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112422>.
- [40] Zhang J, Xuan Y, Yang L. A novel choice for the photovoltaic-thermoelectric hybrid system: the perovskite solar cell. *Int J Energy Res* 2016;40:1400–9. <https://doi.org/10.1002/er.3532>.
- [41] Fallah Kohan HR, Lotfipour F, Eslami M. Numerical simulation of a photovoltaic thermoelectric hybrid power generation system. *Sol Energy* 2018;174:537–48. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.09.046>.
- [42] Sripadmanabhan Indira S, Vaithilingam CA, Chong KK, Saidur R, Faizal M, Abubakar S, et al. A review on various configurations of hybrid concentrator photovoltaic and thermoelectric generator system. *Sol Energy* 2020;201:122–48. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2020.02.090>.
- [43] Li G, Shittu S, Diallo TMO, Yu M, Zhao X, Ji J. A review of solar photovoltaic-thermoelectric hybrid system for electricity generation. *Energy* 2018;158:41–58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.021>.
- [44] Teffah K, Zhang Y. Modeling and experimental research of hybrid PV-thermoelectric system for high concentrated solar energy conversion. *Sol Energy* 2017;157:10–9. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.017>.

- [45] Tamaki R, Toyoda T, Tamura Y, Matoba A, Minamikawa T, Tokuda M, et al. Hybrid photovoltaic and thermoelectric module for high concentration solar system. *AIP Conf Proc* 2017;1881:1–7. <https://doi.org/10.1063/1.5001453>.
- [46] Yin E, Li Q, Li D, Xuan Y. Experimental investigation on effects of thermal resistances on a photovoltaic-thermoelectric system integrated with phase change materials. *Energy* 2019;169:172–85. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.12.035>.
- [47] Badr F, Radwan A, Ahmed M, Hamed AM. An experimental study of the concentrator photovoltaic/thermoelectric generator performance using different passive cooling methods. *Renew Energy* 2022;185:1078–94. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.080>.
- [48] Siefer G, Bett AW. Analysis of temperature coefficients for III-V multi-junction concentrator cells. *Prog Photovoltaics Res Appl* 2014;22:515–24. <https://doi.org/10.1002/pip.2285>.
- [49] Muñoz-Rodríguez FJ, Muñoz-Cerón E, Almonacid F, Fernández EF. Efficiencies and energy balance in high-concentrator photovoltaic devices. *High Conc. Photovoltaics*, vol. 190, Springer Verlag; 2015, p. 239–60. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15039-0_9.
- [50] Chow TT. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Appl Energy* 2010;87:365–79. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2009.06.037>.
- [51] Chaibi Y, El Rhafiki T, Simón-Allué R, Guedea I, Luaces SC, Gajate OC, et al. Air-based hybrid photovoltaic/thermal systems: A review. *J Clean Prod* 2021;295. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126211>.
- [52] Masood F, Nor NBM, Nallagownden P, Elamvazuthi I, Saidur R, Alam MA, et al. A Review of Recent Developments and Applications of Compound Parabolic Concentrator-Based Hybrid Solar Photovoltaic/Thermal Collectors. *Sustain* 2022;14. <https://doi.org/10.3390/su14095529>.
- [53] DUALSUN. DualSun SPRIN Solar PV-T panel n.d. <https://dualsun.com/produits/dualsun-spring/>.
- [54] Mahmoudinezhad S, Ahmadi Atouei S, Cotfas PA, Cotfas DT, Rosendahl LA, Rezanian A. Experimental and numerical study on the transient behavior of multi-junction solar cell-thermoelectric generator hybrid system. *Energy Convers Manag* 2019;184:448–55. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.081>.
- [55] Sabry M, Lashin A, Al Turkestani M. Experimental and simulation investigations of CPV/TEG hybrid system. *J King Saud Univ - Sci* 2021;33. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2020.101321>.
- [56] Xiao J, Yang T, Li P, Zhai P, Zhang Q. Thermal design and management for performance optimization of solar thermoelectric generator. *Appl Energy* 2012;93:33–8. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.006>.
- [57] Ouyang Z, Li D. Design of segmented high-performance thermoelectric generators with cost in consideration. *Appl Energy* 2018;221:112–21. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.106>.
- [58] Venkatasubramanian R, Siivola E, Colpitts T, O’Quinn B. Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit. *Nat* 2001 4136856 2001;413:597–602. <https://doi.org/10.1038/35098012>.

- [59] Micheli L, Fernández EF, Almonacid F, Mallick TK, Smestad GP. Performance, limits and economic perspectives for passive cooling of High Concentrator Photovoltaics. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2016. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.04.016>.
- [60] Tatsiankou V, Hinzer K, Haysom J, Schriemer H, Emery K, Beal R. Design principles and field performance of a solar spectral irradiance meter. *Sol Energy* 2016;133:94–102. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2016.03.054>.
- [61] Rodrigo PM, Valera A, Fernández EF, Almonacid FM. Performance and economic limits of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules. *Appl Energy* 2019;238:1150–62. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.01.132>.
- [62] Alqurashi MM, Ganash EA, Altuwirqi RM. Simulation of a Low Concentrator Photovoltaic System Using COMSOL. *Appl Sci* 2022, Vol 12, Page 3450 2022;12:3450. <https://doi.org/10.3390/APP12073450>.
- [63] Zandi S, Saxena P, Razaghi M, Gorji NE. Simulation of CZTSSe Thin-Film Solar Cells in COMSOL: Three-Dimensional Optical, Electrical, and Thermal Models. *IEEE J Photovoltaics* 2020;10:1503–7. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.2999881>.
- [64] Alqurashi MM, Altuwirqi RM, Ganash EA. Thermal Profile of a Low-Concentrator Photovoltaic: A COMSOL Simulation. *Int J Photoenergy* 2020;2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8814572>.
- [65] Luo D, Wang R, Yan Y, Sun Z, Zhou W, Ding R. Comparison of different fluid-thermal-electric multiphysics modeling approaches for thermoelectric generator systems. *Renew Energy* 2021;180:1266–77. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.09.033>.
- [66] Theristis M, Fernández EF, Sumner M, O'Donovan TS. Multiphysics modelling and experimental validation of high concentration photovoltaic modules. *Energy Convers Manag* 2017;139:122–34. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.02.044>.
- [67] – CPV Solar Cells - AZUR SPACE Solar Power GmbH n.d. <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-cpv/cpv-solar-cells> (accessed March 31, 2020).
- [68] European Thermodynamics. TEG. n.d. <https://www.eurothermodynamics.com/products/> (accessed March 31, 2020).
- [69] Jin K, Zhou W. Wireless Laser Power Transmission: A Review of Recent Progress. *IEEE Trans Power Electron* 2019;34:3842–59. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2853156>.
- [70] Fafard S, Masson DP. 74.7% Efficient GaAs-Based Laser Power Converters at 808 nm at 150 K. *Photonics* 2022;9. <https://doi.org/10.3390/photonics9080579>.

PARTE II. COPIA DE PUBLICACIONES

Para finalizar, en la Parte II se exponen las copias originales de las publicaciones que se han generado, en diferentes revistas científicas, durante el desarrollo de la presente Tesis Doctoral y que han servido como contribución al conocimiento de una nueva tecnología.

PARTE II: COPIA DE PUBLICACIONES

Publicación n°1	<i>“Feasibility of flat-plate heat-sinks using microscale solar cells up to 10,000 suns concentrations”</i>
Autores	Álvaro Valera , Eduardo F. Fernández, Pedro M. Rodrigo, Florencia Almonacid
Revista	<i>Solar Energy</i>
Volumen, etc.	181, pp.361-371
Fecha publicación	Marzo 2019
Clasificación JCR	ENERGY & FUELS: 35/112 (Q2)
Índice de impacto	4.608 (2019)
DOI	10.1016/j.solener.2019.02.013

PARTE II: COPIA DE PUBLICACIONES

Publicación n°2	<i>“Performance and economic limits of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules”</i>
Autores	Pedro M. Rodrigo, Álvaro Valera , Eduardo F. Fernández, Florencia Almonacid,
Revista	<i>Applied Energy</i>
Volumen, etc.	238, pp.1150-1162
Fecha publicación	Marzo 2019
Clasificación JCR	ENERGY & FUELS: 9/112 (Q1)
Índice de impacto	8.848 (2019)
DOI	10.1016/j.apenergy.2019.01.132

PARTE II: COPIA DE PUBLICACIONES

Publicación n°3	<i>“Annual energy harvesting of passively cooled hybrid thermoelectric generator-concentrator photovoltaic modules”</i>
Autores	Pedro M. Rodrigo, Álvaro Valera , Eduardo F. Fernández, Florencia Almonacid,
Revista	<i>IEEE Journal of Photovoltaics</i>
Volumen	9(6), pp.1652-1660
Fecha publicación	Noviembre 2019
Clasificación JCR	ENERGY & FUELS: 59/112 (Q3)
Índice de impacto	4.401 (2021)
DOI	10.1109/JPHOTOV.2019.2939878

PARTE II: COPIA DE PUBLICACIONES

Publicación n°4	<i>“Efficiency improvement of passively cooled micro-scale hybrid CPV-TEG systems at ultra-high concentration levels”</i>
Autores	Álvaro Valera , Pedro M. Rodrigo, Florencia Almonacid, Eduardo F. Fernández
Revista	<i>Energy Conversion and Management</i>
Volumen, etc.	244-114521
Fecha publicación	Septiembre 2021
Clasificación JCR	ENERGY & FUELS: 14/119 (Q1)
Índice de impacto	11.533 (2021)
DOI	10.1016/j.enconman.2021.114521

PARTE II: COPIA DE PUBLICACIONES

Publicación n°5	<i>“Design, manufacturing and indoor/outdoor testing of a hybrid thermoelectric-concentrator photovoltaic mono-module at unprecedented ultra-high concentration levels”</i>
Autores	Álvaro Valera , Pedro M. Rodrigo, María A. Ceballos, Florencia Almonacid, Eduardo F. Fernández
Revista	<i>Solar Energy Materials and Solar Cells</i>
Volumen, etc.	(En revisión)
Clasificación JCR	ENERGY & FUELS: 35/119 (Q2)
Índice de impacto	7.305 (2022)
DOI	https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112269

