



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Máster

Análisis del comportamiento y optimización de un panel solar híbrido con la integración de módulos termoeléctricos

Performance analysis and optimisation of a hybrid solar panel with the integration of thermoelectric modules

Autor

Carlos Subías Espuña

Director

Juan Antonio Tejero Gómez

Codirector

Amaya Martínez Gracia

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza (EINA)

Octubre 2022

Página intencionadamente en blanco.

## *Agradecimientos*

*A mi codirectora Amaya Martínez, pues confió en mi para llevar a cabo este proyecto.  
A mi director Juan Antonio Tejero, con el cual he podido compartir tiempo durante los ensayos, adquiriendo conocimientos que difícilmente se pueden adquirir en las aulas.*

*A mis compañeros de piso, Diego, Andrés y Jesús, que me han regalado,  
posiblemente, los mejores años de mi vida.*

*A todos mis amigos, tanto a los que he conocido en la universidad, como a todos  
aquellos que ya me acompañaban antes.*

*A mi familia, Javier, Merche y Germán, pues son mi alegría y mi motor.*

Página intencionadamente en blanco.



**Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza**

**ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA DE ZARAGOZA  
(EINA)**

## **MEMORIA**

Análisis del comportamiento y optimización de  
un panel solar híbrido con la integración de  
módulos termoeléctricos

[759534@unizar.es](mailto:759534@unizar.es)  
[csubias@unizar.es](mailto:csubias@unizar.es)

Autor: Carlos Subías Espuña  
Director: Amaya Martínez Gracia  
Fecha: Octubre 2022

Página intencionadamente en blanco.



## INDICE DE CONTENIDO

<b>1. RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>2. ABSTRACT</b>	<b>2</b>
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>4. ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA</b>	<b>5</b>
<b>5. METODOLOGÍA</b>	<b>23</b>
<b>6. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>28</b>
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>36</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>37</b>

## INDICE DE CONTENIDO

<b>1. RESUMEN</b>	<b>1</b>
1.1. PALABRAS CLAVE	1
<b>2. ABSTRACT</b>	<b>2</b>
2.1. KEY WORDS	2
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>4. ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA</b>	<b>5</b>
4.1. FUNDAMENTOS ENERGÍA SOLAR Y TECNOLOGÍA PVT	5
4.2. FUNDAMENTOS MÓDULOS TERMOELÉCTRICOS (TEG)	13
4.3. ESTUDIOS ANTERIORES SOBRE LA INTEGRACIÓN DE TEG EN DISTINTOS SISTEMAS	18
<b>5. METODOLOGÍA</b>	<b>23</b>
5.1. BANCADA DE ENSAYOS: CONFIGURACIÓN INICIAL	23
5.2. ENSAYOS AISLADOS EN RADIADORES	25
5.3. NUEVA DISPOSICIÓN DE BANCADA	26
5.4. SIMULACIÓN EN TRNSYS	27
<b>6. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>28</b>



INDICES

6.1. BANCADA DE ENSAYOS ORIGINAL	28
6.2. ENSAYOS AISLADOS CON RADIADOR	30
6.3. BANCADA DE ENSAYOS: NUEVA CONFIGURACIÓN	33
6.4. SIMULACIONES EN TRNSYS	35
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>36</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>37</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolución de la eficiencia FV en el tiempo. [5]	5
Figura 2: Evolución LCOE distintas tecnologías. IRENA Renewable Cost Database [6]	6
Figura 3: Evolución temporal de la eficiencia de distintas células PV [5]	7
Figura 4: Longitudes de onda abarcadas por las distintas células y el espectro solar [7]	7
Figura 5: Esquema funcionamiento de un panel PVT [9]	8
Figura 6: Sección transversal de las distintas evoluciones del PVT [10]	10
Figura 7: Esquema del efecto Seebeck en un termopar [12]	13
Figura 8: Esquema efecto Peltier [13]	14
Figura 9: Esquema construcción TEG [14]	15
Figura 10: Esquema resistencias eléctricas y térmicas de un TEG [14]	16
Figura 11. Aumento de la eficiencia para diferentes ZT en función de la temperatura [11]	17
Figura 12: Figura de mérito vs. Temperatura para semiconductores de tipo n [11]	18
Figura 13: Reparto del espectro solar en PV y TEG [19]	20
Figura 14: Evolución de temperatura y voltaje en un TEG [23]	21
Figura 15: Bancada de ensayos de la Universidad de Zaragoza [31]	23
Figura 16: Modificación colector [31]	24



## INDICES

Figura 17: Detalle modificación colector [31] .....	24
Figura 18: Esquema general configuración de ensayos aislados .....	26
Figura 19: Detalle de la nueva configuración .....	27
Figura 20: Potencia TEG y Caudal (Ensayo 28/06) .....	29
Figura 21: Potencia TEG y Diferencia de Temperaturas (Ensayo 01/07) .....	29
Figura 22: Potencia vs. Resistencia para una $\Delta T$ de 20°C.....	30
Figura 23: Potencia vs. Resistencia para un $\Delta T$ de 25°C.....	31
Figura 24: Potencia mientras se varía el apriete .....	31
Figura 25: Potencia TEG vs Resistencia (Ensayo 2 Nueva Configuración TEG) ...	33

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación serie vs. Paralelo en ensayos aislados.....	32
Tabla 2: Resultados de serie vs. paralelo .....	34
Tabla 3: Resultados simulaciones Trnsys PVT+TEG .....	35
Tabla 4: Resultados simulaciones TEG Trnsys PVT+TEG.....	35

## INDICE DE ECUACIONES

(1).....	9
(2).....	10
(3).....	10
(4).....	11
(5).....	11
(6).....	12
(7).....	12



INDICES

(8).....	12
(9).....	13
(10).....	14
(11).....	15
(12).....	16
(13).....	16
(14).....	16
(15).....	16
(16).....	17



## 1. RESUMEN

La energía solar es, hoy en día, una de las fuentes de energía renovable más importante y que mayor desarrollo han tenido en los últimos años. Los paneles solares híbridos, combinan tanto su faceta eléctrica, como la térmica.

El presente trabajo aborda el estudio y optimización del comportamiento de módulos termoeléctricos (TEG) en colectores solares híbridos, con el fin de aumentar su rendimiento. Para ello, se han ensayado dichos módulos de manera aislada, se ha observado su comportamiento en la configuración original presente en la Universidad de Zaragoza y tras ello, se ha propuesto y ejecutado una solución para optimizar la producción.

Además, tras la optimización, los resultados obtenidos han sido extrapolados al caso de una vivienda real para observar con detalle el aporte de los módulos TEG.

### 1.1. PALABRAS CLAVE

Energía solar, generadores termoeléctricos, eficiencia energética, colectores PVT, TEG, radiador, TRNSYS.



## 2. ABSTRACT

Solar energy is, nowadays, one of the most important renewable energy sources and has had the greatest development in recent years. Hybrid solar panels combine both their electrical and thermal aspects.

The present work deals with the study and optimization of the behaviour of thermoelectric modules (TEG) in hybrid solar collectors, to increase their performance. To do this, these modules have been tested in isolation, their behaviour has been observed in the original configuration present at the University of Zaragoza and after that, a solution has been proposed and executed to optimize production.

In addition, after optimization, the results obtained have been extrapolated to the case of a real house to observe in detail the contribution of the TEG modules.

### 2.1. KEY WORDS

Solar energy, thermo-electric generators, energy efficiency, PVT collectors, TEG, radiator, TRNSYS.



### 3. INTRODUCCIÓN

Es por todos bien sabido que, hoy en día, el uso abusivo de combustibles fósiles está avocando al planeta a un fatal estado de no retorno. Las emisiones de gases contaminantes alteran el ambiente de manera que aumenta la temperatura del planeta, se crean condiciones climáticas extremas y los catástrofes medioambientales cada vez son más comunes.

Frente a eso, se busca la generación de energía mediante fuentes renovables (EERR), junto con una disminución del consumo energético (provocado por un aumento en la eficiencia) y un uso racional de la energía. La energía solar tiene una contribución muy importante en este futuro de energía sostenible y eficiencia energética.

En el ámbito de la energía solar, existen distintas formas de realizar una generación activa de energía: tecnología solar fotovoltaica, tecnología solar térmica y tecnología solar híbrida (PVT<sup>1</sup>), que combina las dos anteriores, generando simultáneamente electricidad y agua caliente sanitaria. Dado que en términos de consumo total, en España, el sector residencial consume un 25% del total de energía eléctrica y el 17% en términos de energía total [1], los paneles solares híbridos pueden suponer una notable reducción en el consumo final.

Estos colectores PVT han sido ya aplicados en numerosos proyectos, habiendo sido ya demostrada su viabilidad técnica, económica y medioambiental en sistemas de producción de energía. Además, han sido integrados con otros elementos como bombas de calor, sistemas de poli generación, almacenamiento estacional [2]...

El presente trabajo estudia la **integración de generadores termoeléctricos** (de ahora en adelante **TEG<sup>2</sup>**) en paneles PVT. Los TEG son dispositivos eléctricos que presentan una serie de efectos que serán presentados más adelante, pero en este caso nos interesa el efecto Seebeck, el cual consiste en la generación de una corriente eléctrica a partir de un gradiente de temperatura. Esta tecnología presenta algunas ventajas como su reducido tamaño, su fiabilidad, no cuentan con partes móviles, no genera ruidos y es de reducido tamaño y peso. Sus inconvenientes: baja eficiencia y coste elevado.

Este Trabajo de Fin de Máster pretende estudiar la integración de dichos módulos TEG de la manera más óptima en una bancada de PVT.

---

<sup>1</sup> PVT: Photovoltaic Thermal hybrid solar collector, abreviatura usada en el sector.

<sup>2</sup> TEG: Thermo-Electric Generator. Abreviatura usada en el sector.



Los **objetivos** del presente trabajo son:

- Conocer el estado actual de la tecnología
- Analizar el comportamiento de los módulos TEG de manera aislada
- Evaluar la integración actual de los TEG en la bancada de ensayos existente
- Plantear una nueva integración de los módulos TEG en la bancada de ensayos PVT
- Estudiar diferentes configuraciones buscando la mayor optimización
- Simular con TRNSYS<sup>3</sup> la configuración definitiva
- Análizar los de resultados obtenidos, elaborar conclusiones sobre estos y establecer unas recomendaciones para la futura integración de PVT+TEG

El presente trabajo se ha llevado a cabo en el marco de un proyecto de investigación dentro del plan nacional del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Se trata del proyecto "Integración de generadores termoelectricos (TEG) en colectores solares PVT y calderas de biomasa" (expediente RTI2018-098886-A-I00).

En el contexto del aprovechamiento de las energías renovables y dado el compromiso de la Universidad de Zaragoza con la Agenda 2030 [3] que promueve los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ODS, los objetivos de este trabajo están alineados con varios de estos ODS.

- Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. Metas 7.2 y 7.3
- Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Metas 13.2 y 13.3.

---

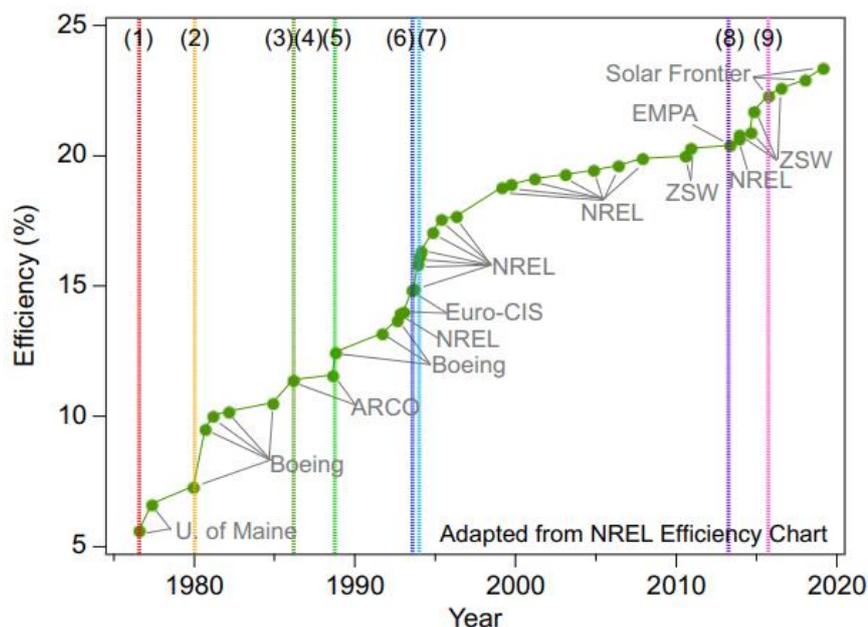
<sup>3</sup> TRSYS es un programa de simulación utilizado principalmente en los campos de la ingeniería de las energías renovables y la simulación de sistemas solares pasivos, así como el diseño solar activo.

## 4. ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA

### 4.1. FUNDAMENTOS ENERGÍA SOLAR Y TECNOLOGÍA PVT

La energía solar ha sido siempre una fuente imprescindible de energía para la humanidad y sin la cual sería imposible de sobrevivir. Podemos clasificar la energía solar en dos grandes variantes: la energía solar fotovoltaica y la solar térmica.

La energía solar fotovoltaica transforma la irradiación proveniente del sol en energía eléctrica gracias al efecto fotoeléctrico. Dicho efecto fue descubierto en 1887 por el alemán Heinrich Hertz, y posteriormente fue Albert Einstein quien publicó una explicación teórica, en 1905 [4]. Más tarde, en 1950, se desarrollaron los semiconductores de silicio presentes en los paneles fotovoltaicos.



- (1) evaporation of the compound CIS
- (2) reactive elemental codeposition of bilayers
- (3) selenization of sputtered metal precursors
- (4) chemical bath deposition of CdS with ZnO:Al as the emitter
- (5) gallium alloying
- (6) sodium alkali incorporation
- (7) three-stage codeposition
- (8) alkali heavy-ion-exchange post-deposition treatment
- (9) sulfurization-after-selenization (SAS)

Figura 1: Evolución de la eficiencia FV en el tiempo. [5]

La tecnología fotovoltaica ha gozado de un gran esplendor en los últimos años, siendo una de las más relevantes actualmente. Esta importancia viene dada en gran parte por la gran reducción de precios en comparación con otras tecnologías (Figura 2) y el aumento de eficiencia conseguido, alcanzando eficiencias de alrededor del 20% [5].

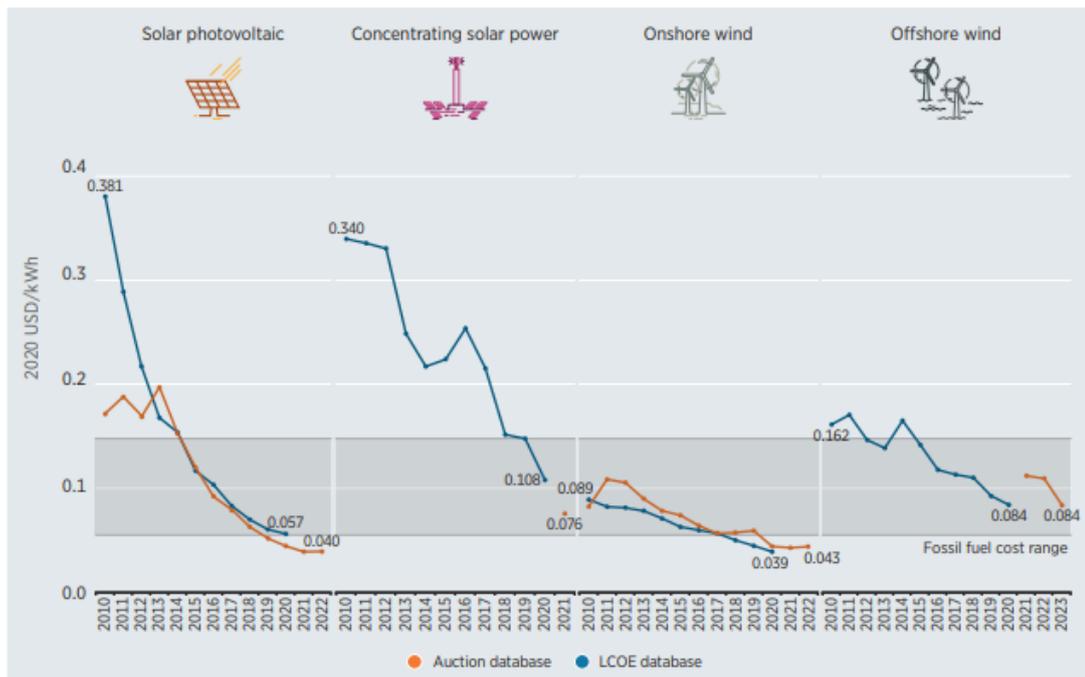


Figura 2: Evolución LCOE distintas tecnologías. IRENA Renewable Cost Database [6]

Además, este crecimiento no ha cesado, la tecnología se encuentra en continuo desarrollo. Actualmente existen distintos tipos de células fotovoltaicas, cada una con sus características:

- Células de silicio cristalino (las más comercializadas)
- Células GaAs (arseniuro de galio), que consiguen una mayor eficiencia, ya que permiten aprovechar mayor longitud de onda, pero su coste es notablemente mayor.
- Células multiunión, que consisten en la unión de varios tipos de semiconductores de manera que abarquen la totalidad de longitud de ondas.
- Células de película delgada: células cuyo espesor es muy reducido (del orden de las micras). Actualmente estas células siguen teniendo un coste alto. Se espera que su desarrollo consiga abaratar los costes de producción.
- Otras tecnologías emergentes como las células de seleniuro de cobre e indio, de telururo de cadmio ...



En cuanto a la energía solar térmica, esta ha sido siempre fundamental para el desarrollo de la vida humana en el planeta y sin la cual sería imposible vivir. Desde la antigüedad se ha utilizado de forma pasiva pero no es hasta la Revolución Industrial cuando se empieza a usar de manera activa [8]. Desde entonces, se ha evolucionado bastante, desde colectores solares para su uso residencial (generando ACS<sup>4</sup> o agua para calefacción) e industrial hasta centrales termo-solares de concentración y alta temperatura.

Una manera especialmente eficiente de aprovechar la energía solar son los paneles PVT, que combinan los efectos de la energía solar térmica con los de la fotovoltaica en una misma área de apertura. Están formados por un laminado fotovoltaico al cual se le adhiere un recuperador de calor en su parte trasera. De esta manera, la radiación incide en el laminado fotovoltaico, transformándose una parte en energía eléctrica y otra parte en calor. Dicho calor es transferido al recuperador de calor y este lo transfiere a el fluido caloportador que circula por su interior.

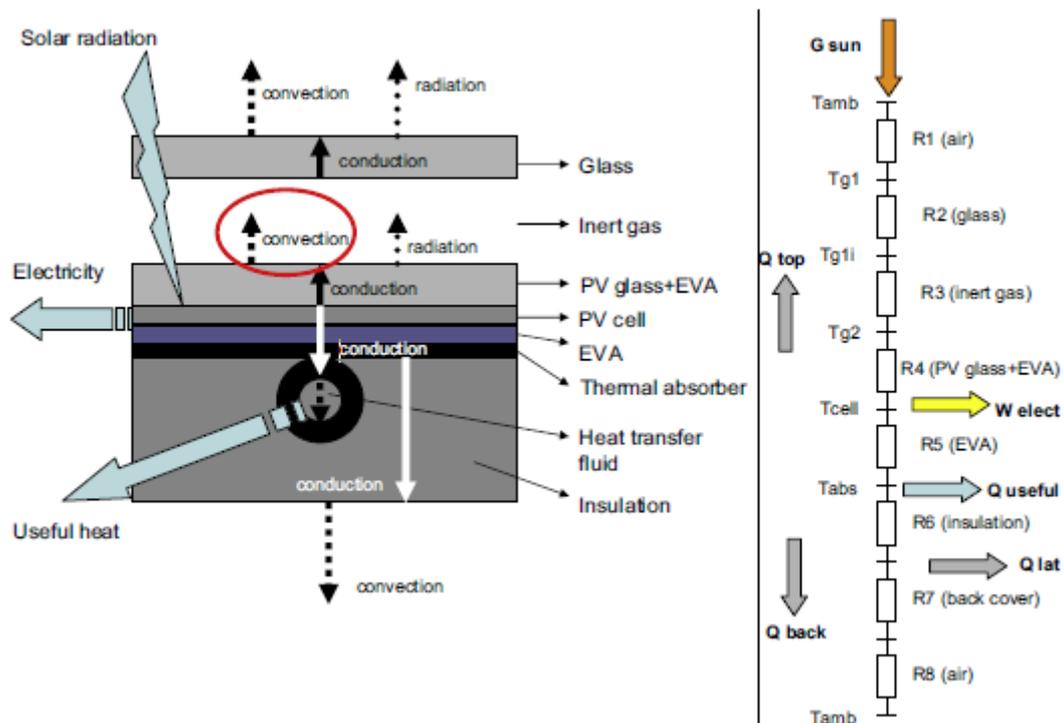


Figura 5: Esquema funcionamiento de un panel PVT [9]

<sup>4</sup> ACS: Agua caliente sanitaria



Estos paneles consiguen un efecto sinérgico entre la parte fotovoltaica y la térmica, ya que al retirar el calor mediante la circulación de un fluido, se consigue reducir la temperatura de la célula, de manera que se aumenta el rendimiento del laminado fotovoltaico.

Aunque es ampliamente conocido que se trata de energías de diferente calidad, es común encontrar la expresión del rendimiento total como:

$$\eta_{total} = \eta_{térmico} + \eta_{eléctrico} \quad (1)$$

Para un análisis teniendo en cuenta la calidad de cada energía, deberíamos hablar en términos exergéticos.

En función del fluido caloportador podemos clasificar los paneles PVT en:

- PVT refrigerado por aire (PVT/a)
- PVT refrigerado por agua (PVT/w)
- 

Los que más desarrollo comercial han alcanzado, en parte por su similitud con los colectores solares planos, son los refrigerados por agua. Estos, dado que la eficiencia de transferencia de calor es mejor en el agua, son más eficientes. Además, es más fácil almacenar energía térmica en forma de agua caliente.

Otra clasificación que se puede realizar es en función de la evolución tecnológica que han tenido los paneles PVT [10].

- La primera generación de paneles híbridos (PVT-0) consistía únicamente en acoplar un recuperador de calor en la parte posterior, sin aislar. Es por esto que las pérdidas eran muy elevadas y la eficiencia reducida
- Posteriormente comenzaron a aparecer recuperadores de calor que ya contaban con un aislamiento por la parte trasera (PVT-1), lo que reducía las pérdidas y aumentaba el rendimiento.
- Más tarde, aparecieron los paneles PVT con cubierta transparente (PVT-2) aislante o CTA. Estos, además de estar aislados por la parte trasera, están aislados por la parte frontal, pero siguen permitiendo la entrada de irradiación.

Dentro de estos últimos, existen distintas tipologías: con cámara de aire, con cámara de vacío o con cámara de gas inerte, como el argón.

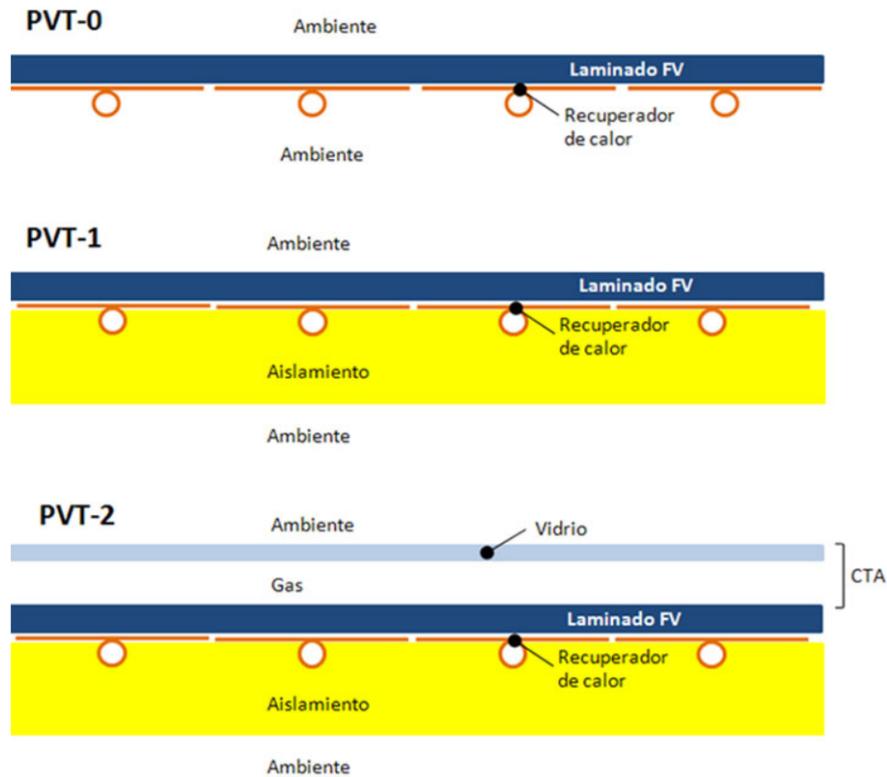


Figura 6: Sección transversal de las distintas evoluciones del PVT [10]

Para caracterizar este tipo de paneles, se deben analizar los parámetros que influyen en la generación energética, tanto térmica como eléctrica.

El rendimiento eléctrico de un panel PVT se define como:

$$\eta_{eléctrico} = \frac{P_{FVT}(kW)}{G(kW)} \quad (2)$$

Donde:

$P_{FVT}$ : Potencia eléctrica producida por el laminado fotovoltaico

$G$ : Irradiación incidente sobre el panel solar

La potencia  $P_{FVT}$  se obtiene como:

$$P_{FVT}(kW) = \frac{P_{pico}(W)}{1000} \cdot \frac{G \left( \frac{kW}{m^2} \right)}{G_{STC} \left( \frac{kW}{m^2} \right)} \cdot \left( 1 - \frac{\gamma(\%)}{100} \right) \cdot (t_{celFV}(^{\circ}C) - 25(^{\circ}C)) \quad (3)$$

Donde:

$P_{pico}$ : Potencia pico del panel

$G_{STC}$ : Irradiación en condiciones estándar

$\gamma(\%)$ : Coeficiente de variación de potencia con la temperatura

$t_{celFV}$ : Temperatura de célula

Este último parámetro, la temperatura de célula, en instalaciones fotovoltaicas se suele calcular de la siguiente manera:

$$t_{celFV}(^{\circ}C) = t_{amb}(^{\circ}C) + G \left( \frac{kW}{m^2} \right) \cdot \frac{TONC(^{\circ}C) - 20(^{\circ}C)}{800 \left( \frac{W}{m^2} \right)} \quad (4)$$

Donde:

TONC ( $^{\circ}C$ ) es la temperatura que alcanzan las células en condiciones normales de funcionamiento ( $800 \text{ W/m}^2$  de irradiación, distribución espectral AM1.5, temperatura ambiente  $20 \text{ }^{\circ}C$  y velocidad de viento e  $1 \text{ m/s}$ )

Sin embargo, cuando se trata de paneles híbridos, esto cambia, ya que las células no están en contacto con el ambiente, si no que el calor es evacuado con el agua (o fluido caloportador). En este caso, la temperatura de célula es igual a la temperatura del recuperador y se determina con la siguiente expresión.

$$t_{abs}(^{\circ}C) = t_{celFV}(^{\circ}C) = t_{we_c}(^{\circ}C) + \frac{q_u \left( \frac{W}{m^2} \right)}{F_e F_R U_p \left( \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C} \right)} \cdot (1 - F_R \cdot F_e) \quad (5)$$

Donde:

$t_{abs}$ : temperatura media del recuperador/absorbedor

$t_{celFV}$ : temperatura media del laminado fotovoltaico

$t_{we_c}$ : temperatura de entrada de agua al colector

$q_u$ : calor transmitido al agua o calor útil

$F_e$ : factor de eficiencia del colector

$F_R$ : factor de extracción de calor

$U_p$ : conductividad total desde el interior del colector

Estos parámetros no es común que se incluyan en las fichas técnicas de los colectores, es por ello por lo que, a menudo, se realiza una aproximación de la temperatura de célula como la media aritmética entre temperatura de entrada y salida del fluido caloportador, las cuales son medibles.

$$t_{celFV}(^{\circ}C) \cong \frac{tws_c(^{\circ}C) + twe_c(^{\circ}C)}{2} \quad (6)$$

Para caracterizar la producción térmica de un panel híbrido acudimos a su ecuación de rendimiento:

$$\eta_c = \eta_0 - a_1 \left( \frac{twm_c - t_{amb}}{G} - a_2 \frac{(twm_c - t_{amb})^2}{G} \right) \quad (7)$$

Donde:

$\eta_0$ : Rendimiento óptico, que caracteriza la transferencia y capacidad de absorción

$a_1$ : coeficiente de pérdidas térmicas líneas (W/m<sup>2</sup>K)

$a_2$ : coeficiente de pérdidas térmicas cuadrático (W/m<sup>2</sup>K)

$twm_c$ : temperatura media del colector (°K)

$t_{amb}$ : temperatura ambiente (°K)

G: irradiación (W/ m<sup>2</sup>)

Es importante resaltar que, a pesar de que en la Ecuación 6 se debe emplear la temperatura media del fluido caloportador de acuerdo a la norma EN ISO 9860 , existen fabricantes que sustituyen dicha temperatura por temperatura de entrada al colector del fluido caloportador, ya que es un parámetro medible. Ambas temperaturas están relacionadas por la siguiente expresión:

$$twm_c = twe_c + \frac{Q_u}{F_R U_L} (1 - F'') \quad (8)$$

Donde:

$twm_c$  es la temperatura media del fluido caloportador, en °C

$twe_c$  es temperatura de entrada del fluido caloportador, en °C

$Q_u$  es el calor útil absorbido por el fluido, en W

$A_c$  es área de apertura, en  $m^2$

$F_R$  es el factor de extracción de calor, adimensional

$U_L$  es conductividad desde el interior del panel al exterior, en  $W/m^2K$

$F''$  es el factor de flujo del colector, que considera el calentamiento progresivo del fluido, adimensional

## 4.2. FUNDAMENTOS MÓDULOS TERMOELÉCTRICOS (TEG)

Como se ha mencionado anteriormente, los módulos TEG hacen uso del efecto Seebeck para transformar una diferencia de temperaturas en energía eléctrica. Pero este no es el único efecto que aparece en la naturaleza. Existen 3 tipos de fenómenos termoelectricos: efecto Seebeck, efecto Peltier y efecto Thomson.

El **efecto Seebeck** consiste en obtener electricidad a partir de una diferencia de temperatura [11]. Este fue descubierto por el científico Thomas Seebeck, quien formó un circuito con dos materiales distintos, eléctricamente conectados en serie y térmicamente en paralelo. Al aplicar calor en los extremos observo una diferencia de voltaje.

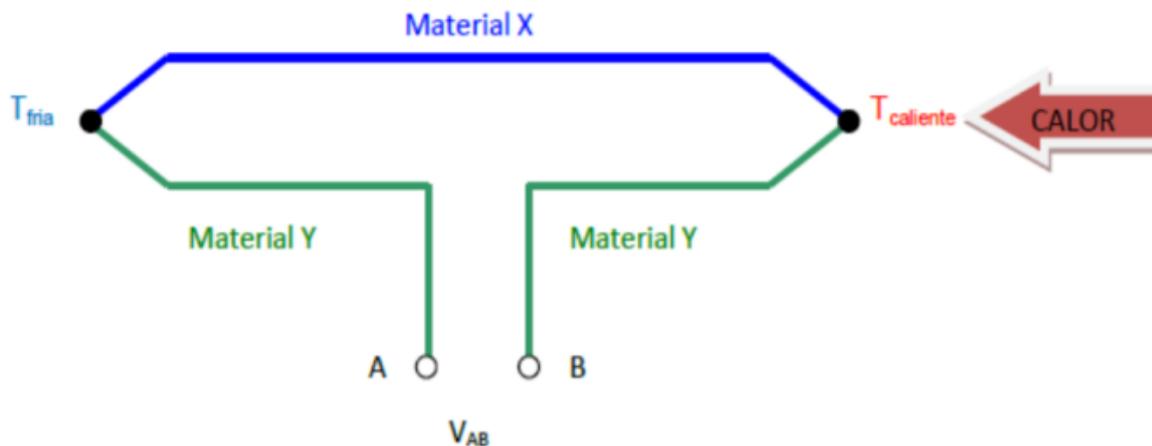


Figura 7: Esquema del efecto Seebeck en un termopar [12]

La diferencia de potencial producida viene dada por:

$$V_{A-B} = \alpha_{A-B} \cdot (T_c - T_f) \quad (9)$$

Donde:

$V_{A-B}$ : diferencia de potencial en voltios

$\alpha_{A-B}$ : coeficiente Seebeck, en V/K, propiedad intrínseca de los materiales

$T_c - T_f$ : temperaturas fría y caliente de las uniones

Jean-Charles Peltier descubrió otro efecto termoeléctrico. Experimento que en la unión de dos materiales distintos por los que circula una corriente eléctrica se genera una diferencia de temperaturas. Descubrió además que, que una zona se calentase o enfriase, dependía de la dirección de la corriente. Este efecto, denominado efecto Peltier, es la base de la refrigeración con materiales termoeléctricos [11].

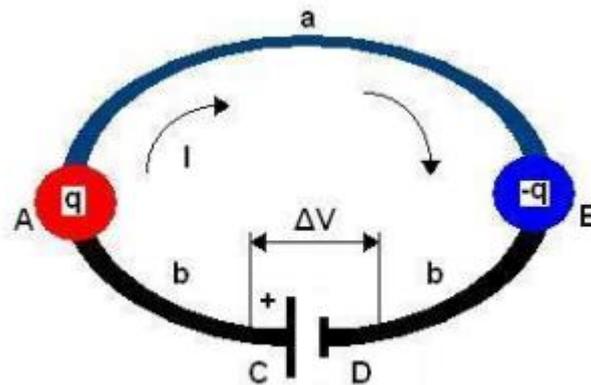


Figura 8: Esquema efecto Peltier [13]

Se determina el coeficiente de Peltier, el cual relaciona la corriente que circula con el flujo de calor generado.

$$\Pi_{ab} = \frac{Q}{I}$$

(10)

Donde:

$\Pi_{ab}$ : coeficiente de Peltier (W/A)

Q: calor absorbido o cedido

I: Intensidad de la corriente que recorre el circuito

Posteriormente, fue William Thompson quien demostró que los efectos de Seebeck y Peltier están relacionados. El **efecto Thompson** distingue de estos dos en que este no necesita de dos materiales. Este efecto consiste

en la presencia de un flujo de calor cuando existe simultáneamente un gradiente de temperatura y una corriente eléctrica [11]. La ecuación que describe el efecto es:

$$q = \beta I \Delta T \quad (11)$$

Donde:

$q$ : calor generado

$\beta$ : coeficiente Thompson

$I$ : corriente circulante por el material termoeléctrico

$\Delta T$ : diferencia de temperaturas en el material termoeléctrico

Los coeficientes de los tres efectos están relacionados entre sí por las relaciones de Kelvin. Estas relaciones se han validado para algunos materiales, y por tanto se consideran válidas [11]

Para la generación de electricidad mediante fuentes de calor, lo cual es el objetivo del presente trabajo, debemos utilizar **módulos generadores termoeléctricos (TEG)**. Estos módulos consisten en varios semiconductores dopados y conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo.

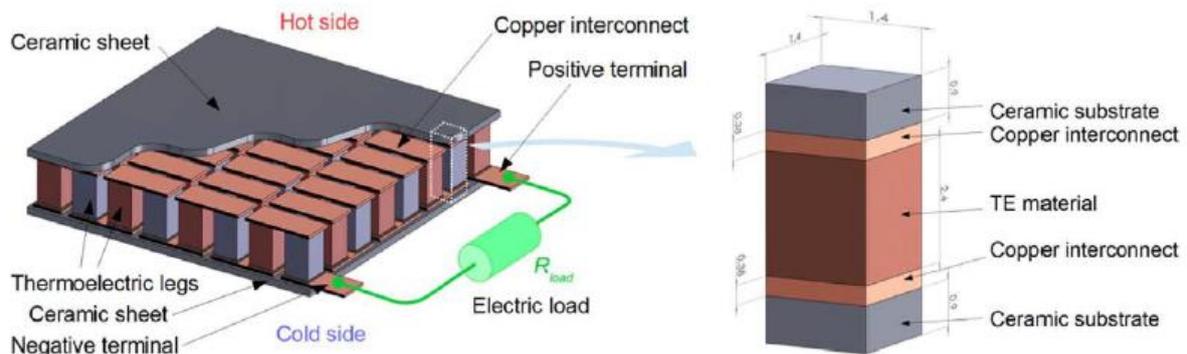


Figura 9: Esquema construcción TEG [14]

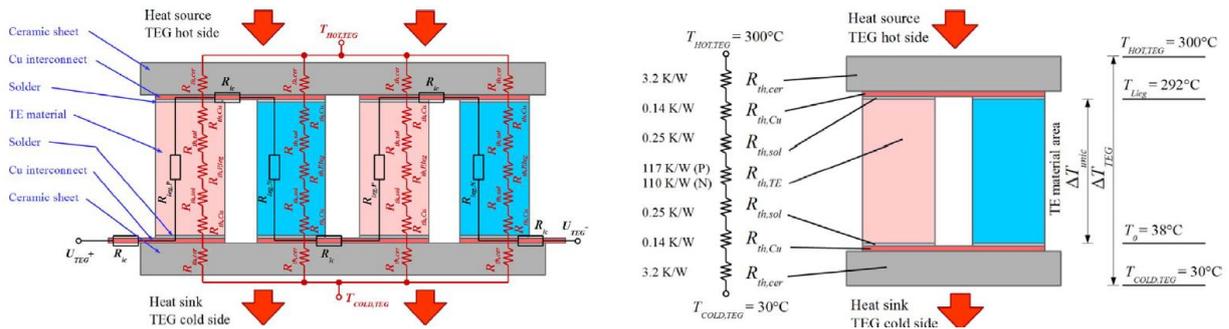


Figura 10: Esquema resistencias eléctricas y térmicas de un TEG [14]

La eficiencia en esta conversión de energía térmica a eléctrica viene condicionada por dos parámetros distintos: el rendimiento de Carnot al cual está sujeto cualquier proceso térmico y el rendimiento del propio TEG.

$$\eta_{max} = \eta_{carnot} \cdot \gamma \quad (12)$$

Dónde:

$\eta_{max}$ : rendimiento máximo

$\eta_{carnot}$ : rendimiento de Carnot calculado según la Ecuación 12

$$\eta_{carnot} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad (13)$$

El parámetro  $\gamma$  trata de definir el comportamiento del TEG y se calcula con la siguiente ecuación [11]:

$$\gamma = \frac{\sqrt{1 + Z_c \bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z_c \bar{T}} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (14)$$

Donde :

$\bar{T}$  es la media aritmética de temperaturas  $\bar{T} = \frac{T_H + T_C}{2}$

$Z_c$ : figura de mérito. Parámetro que concentra las características del TEG. Se calcula según la Ecuación 14 [11].

$$Z_c = \frac{\alpha^2}{\lambda \rho} \quad (15)$$

Donde:

- $\rho$ : resistividad eléctrica
- $\lambda$ : conductividad térmica
- $\alpha$ : coeficiente de Seebeck

Si juntamos todos los parámetros, obtenemos la siguiente expresión para el rendimiento máximo:

$$\eta_{max} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \cdot \frac{\sqrt{1 + Z_c \bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z_c \bar{T} + \frac{T_C}{T_H}}} \quad (16)$$

Según la Ecuación 15, la eficiencia depende fuertemente de las temperaturas empleadas así como de la figura de mérito del material, la cual interesa que sea elevada. Para que esto suceda se tratan de buscar materiales con:

- Elevado coeficiente de Seebeck,  $\alpha$
- Alta conductividad eléctrica (reducida resistividad eléctrica,  $\rho$ )
- Reducida conductividad térmica,  $\lambda$

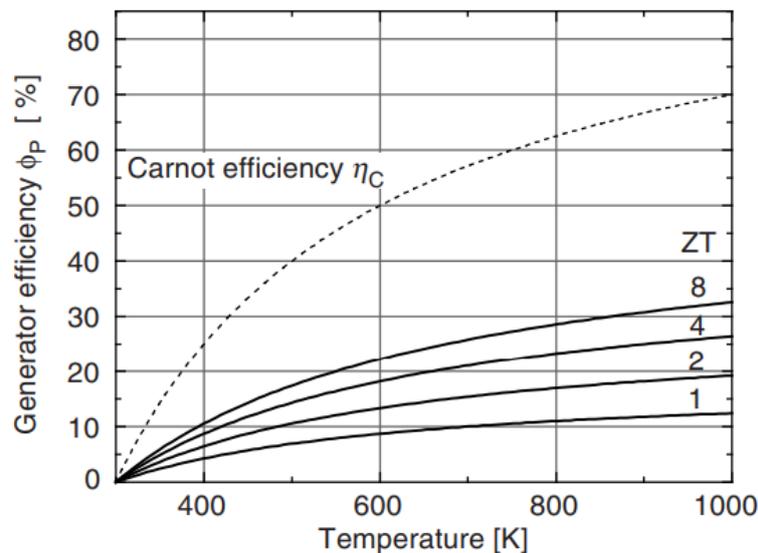


Figura 11. Aumento de la eficiencia para diferentes  $ZT$  en función de la temperatura [11]

Existe una clasificación de materiales termoeléctricos en función de su rango de temperaturas: altas, medias y bajas temperaturas. Estos últimos son los que interesan para el caso de integración con energía solar, pues las diferencias de temperaturas alcanzadas no son elevadas.

### 4.3. ESTUDIOS ANTERIORES SOBRE LA INTEGRACIÓN DE TEG EN DISTINTOS SISTEMAS

En la literatura es habitual encontrar sistemas que emplean generadores termoeléctricos (TEG) con una variedad de configuraciones: con solar híbrida, con colectores solares térmicos, paneles fotovoltaicos, fotovoltaica de concentración... A continuación se van a repasar los principales estudios relacionados con la tecnología TEG y con el uso para mejorar el rendimiento energético de los sistemas.

Para empezar, [11] recoge números estudios sobre la figura de mérito para distintos materiales termoeléctricos de baja temperatura  $(\text{Bi, Sb})_2(\text{Te, Se})_3$ . En él, se puede ver la dependencia de la figura de mérito con la temperatura para diversos materiales (semiconductores de tipo p y n), así como la dependencia de la conductividad térmica y el coeficiente de Seebeck en función de la temperatura. El documento concluye en que el aumento de la figura de mérito (y aumento de eficiencia) se puede conseguir combinando las propiedades (coeficiente de Seebeck, conductividad térmica y eléctrica) en función de su rango de temperaturas. Además, añade que otra manera de aumentar la figura de mérito puede ser con materiales que cambien sus propiedades termoeléctricas a lo largo del módulo.

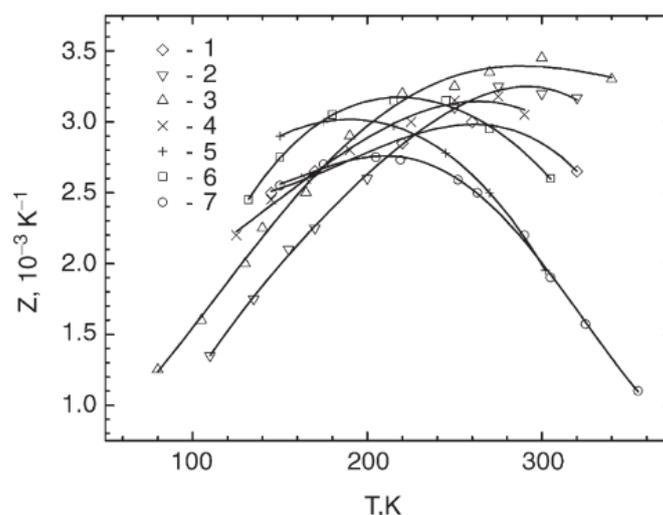


Figura 12: Figura de mérito vs. Temperatura para semiconductores de tipo n [11]



En el Capítulo 50 de [11] se tratan los TEG con el objetivo de recuperar energía de flujos de calor residuales (plantas incineradoras y plantas de combustión interna). Se incluyen en este distintas configuraciones para ello. El texto remarca la importancia de las resistencias térmicas de contacto, las cuales interesa que sean mínimas y concluye con que la eficiencia de conversión obtenida es de entre 2,4% y 3,6%.

Otra manera de aprovechar flujos de calor residuales es utilizando los gases de escape de vehículos, en lo cual se profundiza en el Capítulo 52 de [11], realizando un estudio técnico y económico. El artículo señala que existen tres factores críticos a la hora de recuperar dicho calor: el valor de ZT del material, las resistencias térmicas de contacto que se crean en el sistema y el diseño del intercambiador que extrae el calor de los gases. Aunque se consigue una mejora en la eficiencia, se resalta que aún se deben realizar avances para conseguir que la tecnología llegue a un estado comercial.

[15] analiza el uso de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  como TEG en aplicaciones de energía solar. El artículo concluye que los principales retos son: aislamiento del dispositivo, un buen contacto metálico y una buena implementación dentro del sistema, además de mejorar la eficiencia de los dispositivos. En [16] se profundiza más en este tipo de material ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) como TEG, realizando una caracterización. Se analizan parámetros como la conductividad eléctrica, coeficiente de Seebeck y potencia máxima en función de la temperatura, algo que también realizó [17]. Esta última se puede apreciar que no es lineal con la temperatura, lo cual es un dato importante a tener en cuenta.

[18] probó de manera experimental un panel solar fotovoltaico al cual le añadió módulos TEG en la parte trasera (PV+TEG<sup>5</sup>). De esta manera, la irradiación que llega al panel es transformada en energía eléctrica y térmica, pero de nuevo esta térmica es en parte transformada en eléctrica. Además, usó un flujo de agua como foco frío de los módulos TEG. Observó que la eficiencia aumentaba y además comprobó la mejor disposición eléctrica para los TEG (paralelo). [19] también experimento con un sistema PV+TEG en el cual implemento un sistema de separación espectral. Los ensayos demostraron la superior eficiencia del sistema y el aumento de rendimiento debido a los espejos de aluminio (separación espectral). También se halló que la potencia que se consigue poniendo el PV conectando eléctricamente en serie con el TEG es superior a la suma de sus potencias por separado. [20] ensayó otro sistema PV+TEG en el cual añadió aletas en el foco frío, consiguiendo pasar de un 12,5% de rendimiento que obtenía con el PV, a un 16,3% con simplemente añadir el módulo TEG y con una diferencia de temperaturas de únicamente 15°C

---

<sup>5</sup> PV+TEG: Panel fotovoltaico junto con módulos TEG

Al contrario que estos autores, [21], mediante un análisis numérico, concluyó que añadir módulos TEG a un laminado PV es contraproducente, ya que debido a la baja eficiencia de los TEG, estos aumentan la temperatura del PV, haciendo que la pérdida de eficiencia generada por esto no sea compensada con la producción de los TEG.

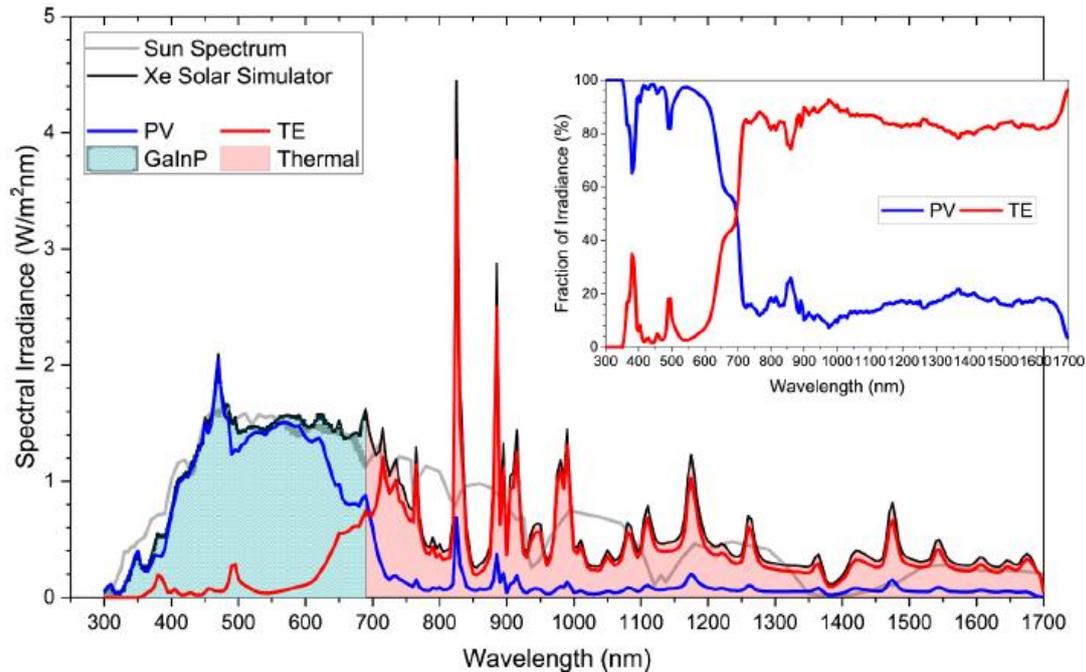


Figura 13: Reparto del espectro solar en PV y TEG [19]

Otro texto que recoge varios artículos es [22], en el cual se tratan los sistemas de concentración fotovoltaica (CPV<sup>6</sup>) y que concluye: se debe optimizar la longitud del TEG, pues aumentarla conlleva un aumento en la eficiencia del TEG, pero un aumento en la temperatura del PV, lo cual conlleva una reducción de eficiencia en él; y la resistencia térmica de contacto afecta notablemente a todo el sistema, por lo que se recomienda el uso de grasa/masa térmica. [23] profundizó en las resistencias térmicas de contacto dentro de los sistemas con TEG y calculó que el hecho de omitir estas en un modelo algebraico puede conducir a una sobrestimación del 7,6% de potencia y un 7,4% de eficiencia.

<sup>6</sup> CPV: Concentrated Photovoltaic (fotovoltaica de concentración)

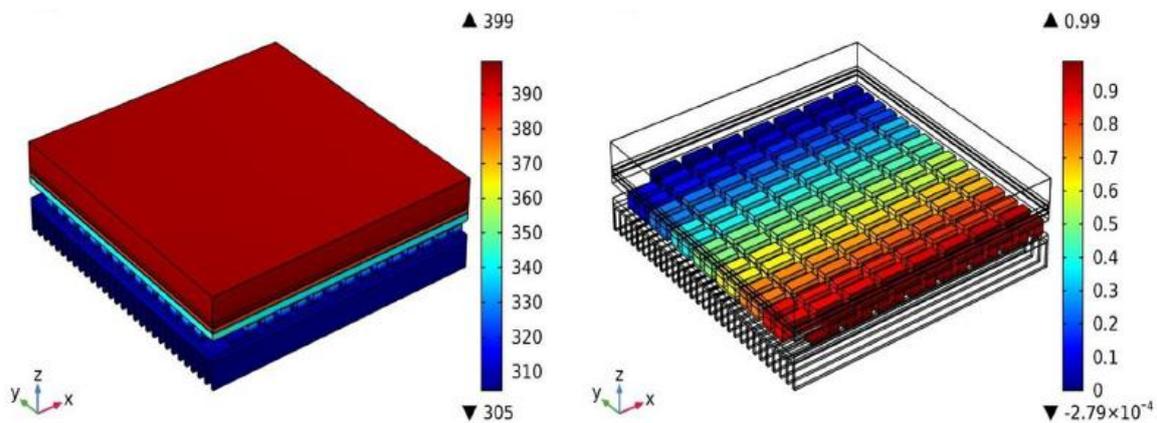


Figura 14: Evolución de temperatura y voltaje en un TEG [23]

En [24] se estudia también un sistema de concentración fotovoltaica con módulos TEG. Se ensaya en condiciones reales un sistema con seguimiento a dos ejes, lentes Fresnel y diversas configuraciones. Una de las conclusiones fue que la configuración CPV+TEG disminuía la eficiencia pues aumentaba la temperatura del PV, y consecuentemente disminuía el rendimiento.

[25] realizaron estudios experimentales con sistemas de baja concentración híbridos (LCPV-T<sup>7</sup>) a los que añadieron módulos TEG. Los resultados demostraron un aumento en la eficiencia y obtuvieron beneficios económicos anuales y periodo de retorno.

[26] trató de integrar módulos TEG en un sistema híbrido de energía solar y geotérmica para la producción de agua caliente, electricidad, agua desalinizada y refrigeración. Se evaluó dicho sistema en términos de energía, exergía y exergo economía y se realizó una optimización en función de varias variables. Se encontró que el uso de módulos TEG reducía los costes de operación y aumentaba la eficiencia exegética del sistema.

En lo relativo a lo eléctrico, [17] y [27] sugiere tratar los TEG como fuente de tensión, al contrario que [14], que propone tratar los TEG como fuentes de corriente. Además, [17] muestra la variación de la resistencia interna del módulo en función de la temperatura, la cual es aproximadamente lineal. Este hecho (la variación de la resistencia interna) sugiere la implementación de un dispositivo buscador del punto de máxima potencia (MPPT<sup>8</sup>) para incrementar la eficiencia del módulo. [27], en su estudio, comparó la potencia que generaban los TEG en paralelo y en serie, obteniendo una mayor en la configuración en serie

<sup>7</sup> LCPV-T: Low Concentrating Photovoltaic-Thermal. Baja concentración fotovoltaica-térmica

<sup>8</sup> MPPT: Maximum power point tracker



En [28] se realiza un estudio exegético a un sistema PVT/a al que se le adhieren módulos TEG en el reverso del recuperador mediante pasta térmica. Se ensaya dicho PVT para distintos caudales de aire y muestra los resultados exegéticos. El estudio concluye que la temperatura es un factor dominante y que, aumentando el caudal de aire, la exergía térmica se reduce pero aumenta la exergía del PV.

Por último, [29] recogió numerosos artículos en su trabajo y consiguió extraer algunas conclusiones: las resistencias térmicas de contacto son un factor crítico en la generación de energía, como ya se anticipaba en [22] y [23]; la eficiencia del PVT+TEG es superior a la de un PV+TEG y esta a su vez mayor que la de un PV únicamente. Además, añade que, en los sistemas PVT+TEG que usan nano fluido como refrigerante se puede aumentar más aún la eficiencia.

## 5. METODOLOGÍA

A continuación, se va a exponer las principales actividades llevadas a cabo durante la elaboración del presente trabajo, así como la metodología adoptada.

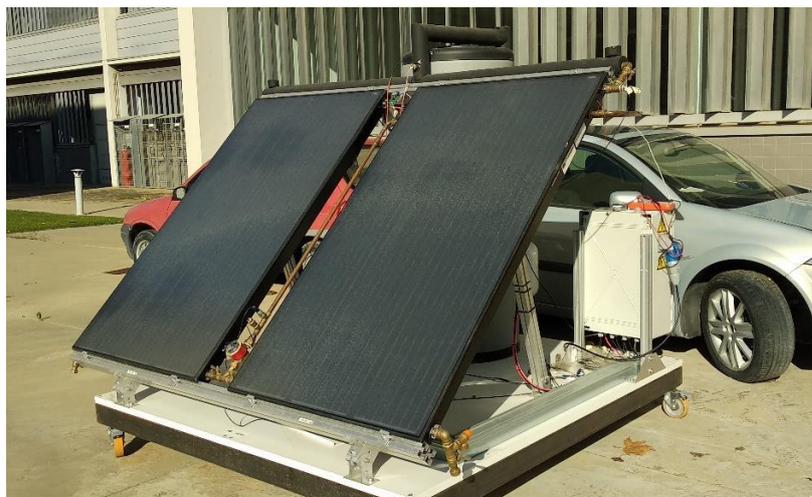
Este apartado se puede dividir en 4 principales subapartados:

- Bancada de ensayos: configuración inicial
- Ensayos a los TEG de manera aislada con radiador
- Bancada de ensayos: implementación del radiador y nueva configuración
- Simulaciones realizadas con TRNSYS

### 5.1. BANCADA DE ENSAYOS: CONFIGURACIÓN INICIAL

La bancada de ensayos está compuesta por dos paneles solares híbridos (PVT) de Abora Solar, su modelo aH60. Las características de este colector pueden ser consultadas en su ficha técnica [30].

Este tipo de colector del fabricante Zaragozano cuenta con la novedad de disponer de una cubierta doble con una cámara de gas intermedia. Esto hecho permite al colector reducir sus pérdidas por una de las principales partes de este, la superficie frontal. Para una lectura más detallada del mismo, se remite al lector al Anexo I: Descripción de la bancada de ensayos. Estos paneles fueron adquiridos y montados en una bancada experimental (Figura 15).



*Figura 15: Bancada de ensayos de la Universidad de Zaragoza [31]*

En cuanto a los generadores termoelectrico (TEG), se escogió el modelo TEG2-07025HT-SS, del fabricantes TEC-Solidstate Power Generation [32]. Esta elección se realizó después de haber consultado detenidamente las características de trabajo de este y comprobar que era el más adecuado.

A la hora de incorporar los módulos TEG dentro de la instalación real, surge la necesidad de disponer de un foco frío y un foco caliente. Para realizar la instalación se optó por la siguiente solución: el tubo con la entrada de agua fría se derivó y dicha corriente de agua, antes de entrar en el panel por su zona normal, pasa por dentro del panel junto a la tubería de salida del panel (o tubería de agua caliente). Gracias a dicha modificación se tienen juntos el foco frío y foco caliente.

Además, para una buena transferencia de calor de la tubería a los TEG, se soldaron aletas de cobre al tubo de agua caliente. Es sobre estas aletas sobre las que van dispuestos los módulos sujetos con grapas de presión.



Figura 16: Modificación colector [31]

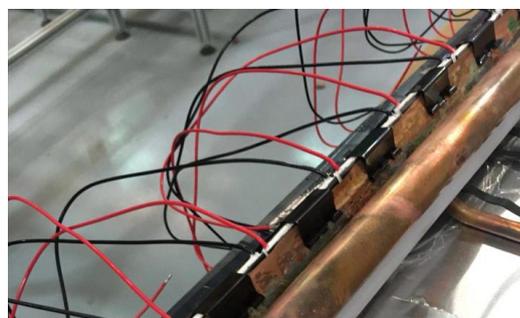


Figura 17: Detalle modificación colector [31]



Con esta modificación se implementaron 19 módulos eléctricamente en serie. Posteriormente se añade aislante en la zona posterior del panel y se cierra todo en su carcasa de aluminio.

Ambos paneles. El modificado con los TEG y el original se encuentran en la misma bancada, con la misma inclinación. Esto permitirá comparar el comportamiento de ambos. Existe un sistema de monitorización y control para registrar el comportamiento de ambos. Además, originalmente la medición de la producción de los TEG se realizaba *in-situ*, con un polímetro, pero ahora propuso una solución a esto, realizando la monitorización mediante un ordenador portátil que registraba automáticamente la producción. Al tratarse de un circuito hidráulico, el sistema cuenta con muchos otros componentes como acumulador, control por histéresis, aerotermo, caudalímetro, sonda de presión, sondas de temperatura...

Por otro lado, al existir también una parte eléctrica, la bancada cuenta con todos los componentes necesarios para tratar con la producción eléctrica y verterla a la red: protecciones, registros de producción, inversor... Con esta disposición se realizaron los primeros ensayos con el objetivo de comprobar la producción de los módulos con la configuración original. Los resultados se pueden observar en el siguiente apartado de la memoria: Resultados.

## 5.2. ENSAYOS AISLADOS EN RADIADORES

Una vez vistos los ensayos realizados en la bancada con la configuración inicial, el progreso del trabajo pasaba por analizar el comportamiento de los módulos TEG en pequeña escala, para de esta manera, poder comprobar cómo afectan a la producción distintos parámetros.

Para este propósito, se realizó una instalación experimental en la cual los TEG fueron ensayados en unas condiciones más controladas. Estos fueron introducidos entre dos radiadores para mejorar la transmisión de calor, pues a la vista de la bibliografía consultada, uno de los parámetros más importantes era el contacto entre TEG y foco caliente/frío.

Además, la instalación experimental contaba con depósitos de agua fría y caliente. El depósito de agua fría estaba alimentado por agua de red, que después de circular por el radiador llegaba a dicho depósito, donde se registraba su temperatura y después se vertía a desagüe. El depósito de agua caliente contaba con una bomba que hacía circular el agua por el radiador. La temperatura de dicho depósito era modificada con una termo-resistencia. Toda esta instalación era registrada con una etapa de Arduino y almacenada en un servidor.

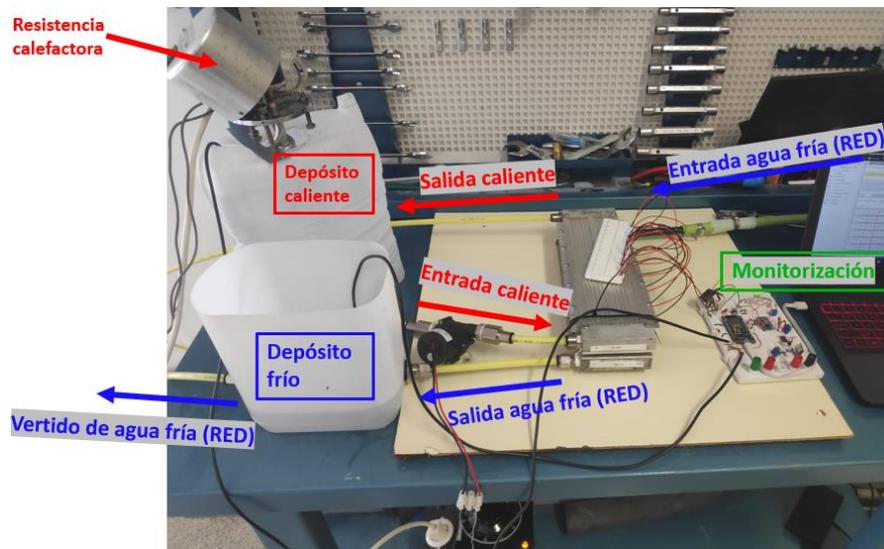


Figura 18: Esquema general configuración de ensayos aislados

Con esta configuración se realizaron múltiples ensayos analizando distintos parámetros: salto de temperatura, resistencia conectada, número de módulos, conexión eléctrica, presión... Además, se realizaron ensayos en cortocircuito y en circuito abierto para caracterizar los módulos.

Los resultados de estos ensayos, de nuevo, serán comentados en el apartado de la memoria destinado a este objetivo. Tanto más información, como los ensayos completos y detallados junto con sus resultados pueden ser consultados en el Anexo II: Ensayos a los módulos TEG de manera aislada.

### 5.3. NUEVA DISPOSICIÓN DE BANCADA

Tras analizar los principales factores que intervenían en la generación de energía de los módulos TEG, se propuso y ejecutó una nueva solución para implementar los módulos. En esta nueva solución, los TEG's se encuentran fuera del panel, dispuestos en un radiador cuya finalidad es maximizar la transferencia de calor y de esa manera crear unos focos de temperatura de mayor calidad. A este radiador se le hará pasar, tanto el agua fría antes de su entrada a panel, como el agua caliente de salida de panel.

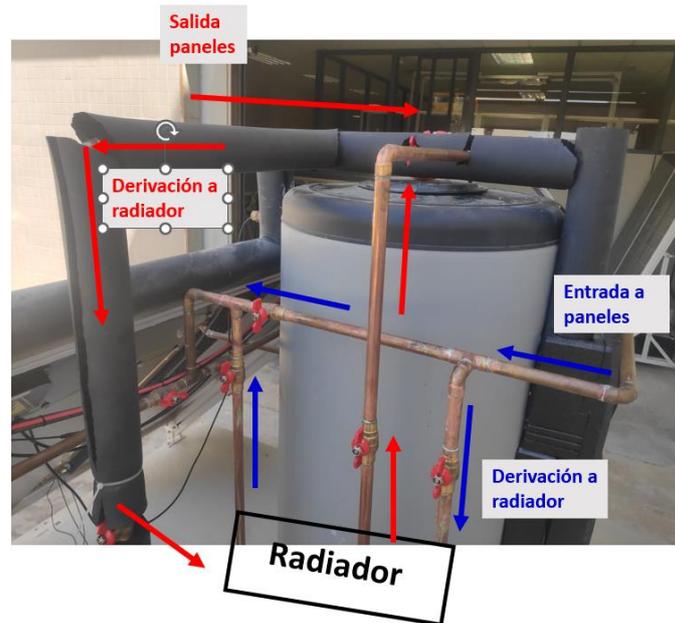


Figura 19: Detalle de la nueva configuración

Además, en esta configuración se añadió una modificación que permite introducir agua de red en el foco frío, de manera que se simula mejor el comportamiento de una instalación real, ya que si no, al calentarse el depósito y no existir consumo, modificamos el foco frío.

Esta modificación fue realizada por la empresa Abora Solar, la fabricante de los colectores. Para ello, ensayo los elementos a presión en sus instalaciones y posteriormente acudió a la Universidad de Zaragoza para realizar la instalación. Para más detalles sobre la instalación, se remite al lector al Apartado 1.4 del Anexo I.

## 5.4. SIMULACIÓN EN TRNSYS

Con el objetivo de analizar el efecto de la adición de los módulos TEG no solo en una instalación experimental, si no extrapolados a una instalación real en un edificio (con sus respectivos consumos eléctricos y de ACS), se han llevado a cabo simulaciones con el software *Trnsys* partiendo de los datos obtenidos en los ensayos. De esta manera, se podrá observar el efecto de los módulos en periodos mayores y analizar diversos parámetros: rendimiento, cobertura...

## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el siguiente apartado se procede a mostrar y analizar algunos de los **resultados más interesantes** (no todos) obtenidos durante los diversos ensayos realizados.

Para una lectura más detallada de los resultados obtenidos, se remite al lector a los Anexos II, III y IV.

### 6.1. BANCADA DE ENSAYOS ORIGINAL

Tras la visita de Abora Solar a la bancada experimental, estos instalaron un sistema de monitorización que permitió caracterizar el comportamiento del sistema. Se muestran los **resultados más relevantes**, remitiendo al lector al Anexo III para consultar los 5 días de ensayos.

En todos los ensayos, las **temperaturas del sistema** ( $T^a$  de salida de paneles,  $T^a$  de entrada a paneles...) siguieron una tendencia similar a la de la irradiancia. En cuanto a la **potencia** producida por los **laminados fotovoltaicos**, esta también sigue de manera fiel a la irradiancia, aunque se observan fallos en la monitorización del laminado N.º 1. Además, esta es muy superior a la producida por los módulos TEG, que con 19 módulos instalados como máximo llega a los 0,8 mW.

Si analizamos la **producción de los módulos** en función del caudal, podemos concluir a la vista de los resultados (Figura 20) que las tendencias son inversamente proporcionales. Esto se debe a que, al alojarse los TEG's dentro del panel, cuando no circula caudal, el agua contenida dentro de estos aumenta, sin evacuarse, y ello hace que se dispare la producción cuando el caudal es nulo.

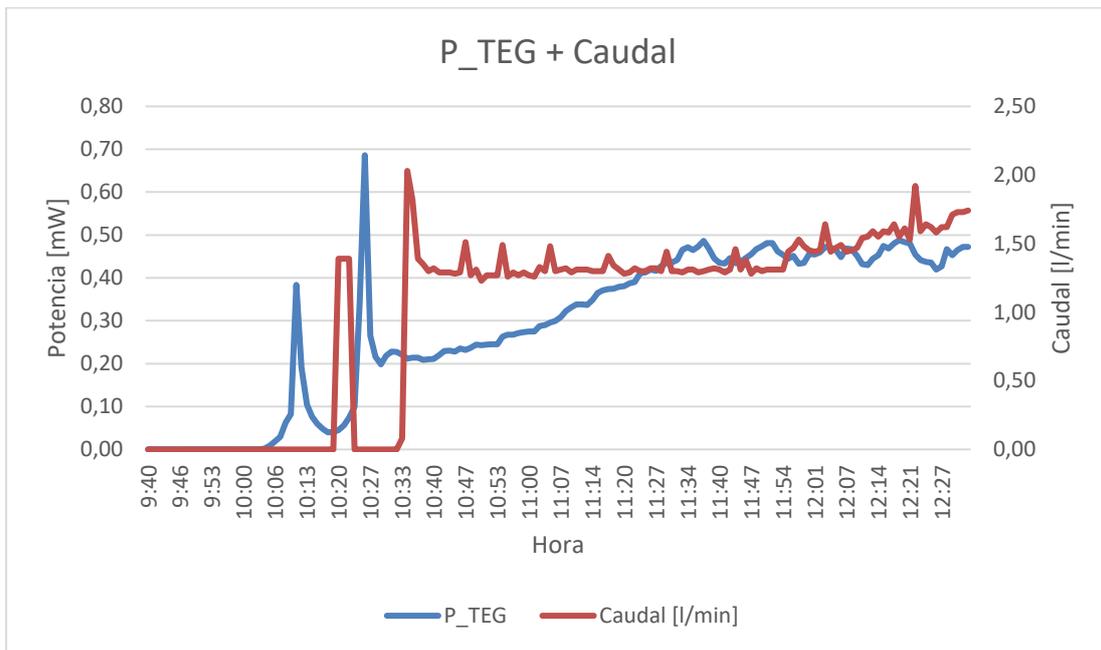


Figura 20: Potencia TEG y Caudal (Ensayo 28/06)

Por otro lado, podemos analizar el efecto de la diferencia de temperaturas sobre la producción de los TEG's. El efecto de esta es aumentar la potencia producida, pues es el motivo de la generación. En otras gráficas disponibles en el Anexo III se puede observar un desfase entre las dos variables debido a que se trataba de distinto sistema de monitorización.

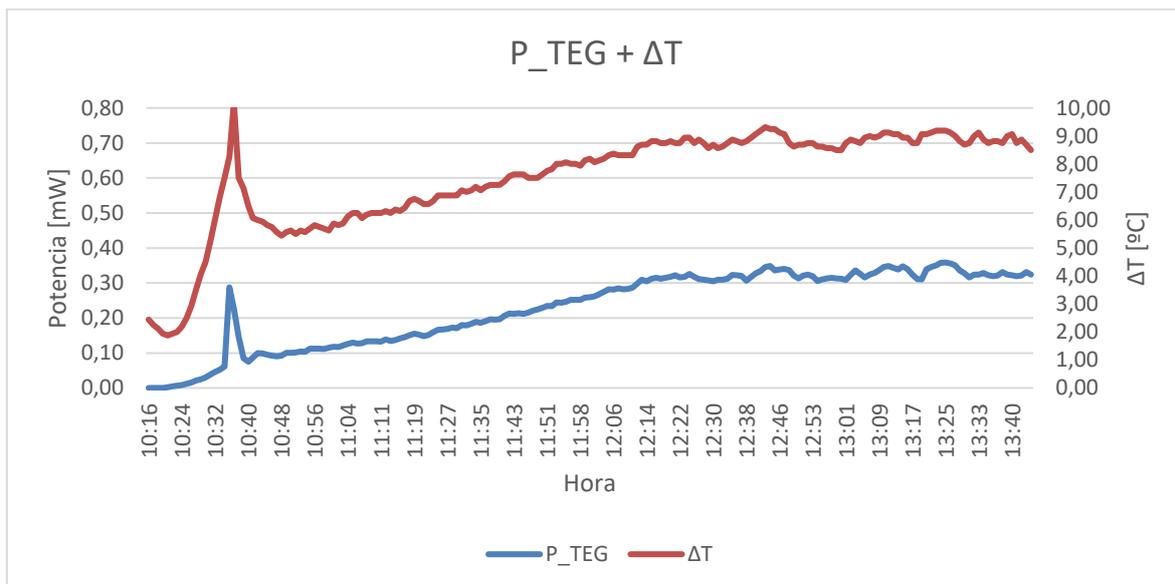


Figura 21: Potencia TEG y Diferencia de Temperaturas (Ensayo 01/07)

En cuanto a la relación de la potencia TEG con la irradiancia, esta no guarda una relación tan fuerte como sí que lo guarda con las variables anteriormente mencionadas.

En vista de los resultados obtenidos, se extraen algunas **conclusiones**:

- Al encontrarse los módulos en el interior del colector, el efecto de la circulación/no circulación de agua afecta directamente a la producción, generando picos de potencia.
- Para diferencias de temperaturas pequeñas, podemos observar un comportamiento de los módulos poco predecible y con bajo rendimiento. A medida que aumenta la diferencia de temperatura, la potencia adquiere cierta linealidad y existen ensayos que sugieren que el rendimiento aumenta con la diferencia de temperaturas, algo que nombraban algunos autores en la bibliografía.

Algunos **puntos de mejora** en estos ensayos podría ser la integración de los dos sistemas de monitorización en uno único, para evitar desfases que puedan llevar a conclusiones erróneas, así como el incluir más sondas de temperatura.

## 6.2. ENSAYOS AISLADOS CON RADIADOR

En los ensayos aislados, se comenzó experimentando con un solo módulos. Se realizaron **ensayos en cortocircuito** (o circuito cerrado), **en vacío y con una carga de 10 ohmios**.

Tras estos ensayos, se procedió con uno de especial interés, en el cual se conseguía una diferencia de temperatura estable ( $20^{\circ}\text{C}$ ) y se **variaba la resistencia** conectada al módulo.

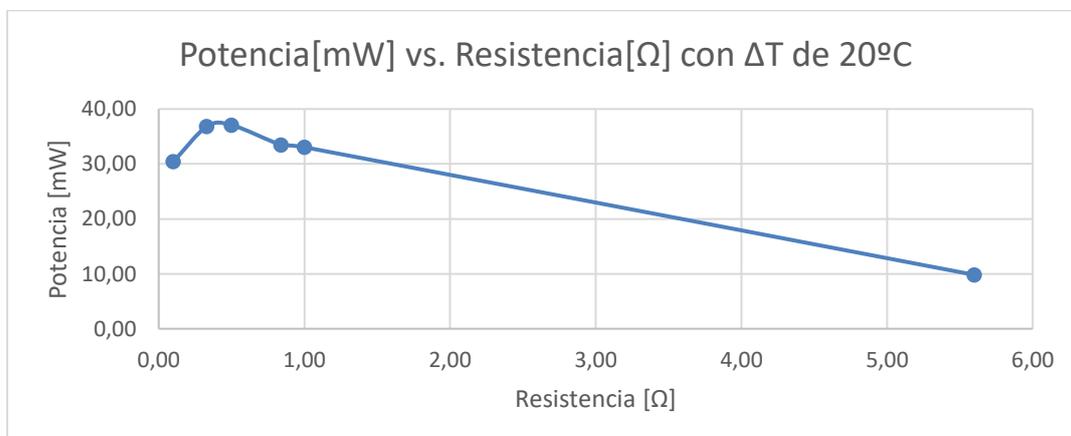


Figura 22: Potencia vs. Resistencia para una  $\Delta T$  de  $20^{\circ}\text{C}$

Se puede observar como la **potencia generada varía bastante con la resistencia conectada**. Esto es algo que se constata tras repetir el ensayo, pero esta vez con una diferencia de temperatura de 25 °C.

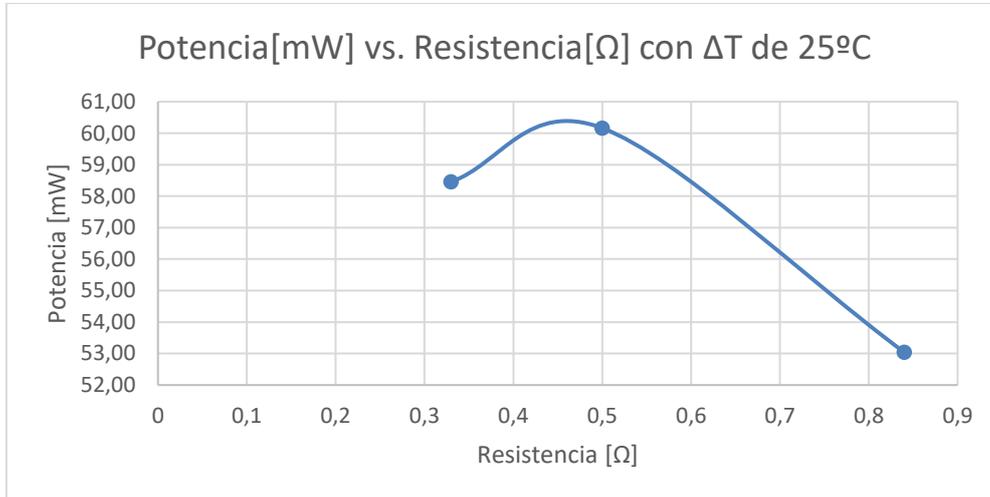


Figura 23: Potencia vs. Resistencia para un  $\Delta T$  de 25°C

Estos ensayos dan cuenta de la importancia de conectar una carga que maximice la potencia generada.

Otro de los ensayos realizados y de importancia en base a lo consultado en bibliografía es un ensayo **variando la presión de contacto/apriete de tornillos del radiador**. En la Figura 22 se puede observar cómo, para una misma diferencia de temperaturas, la potencia generada puede llegar a ser el doble en algunos casos.

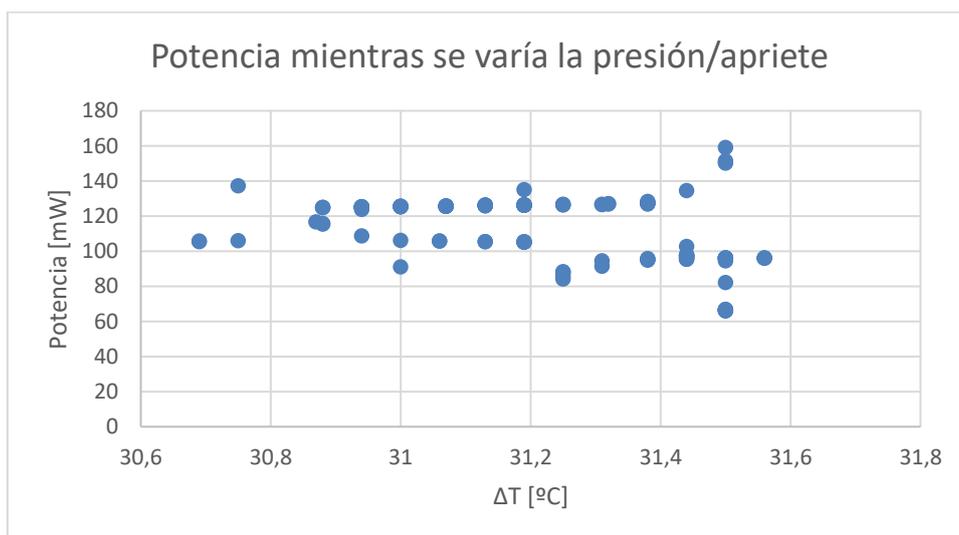


Figura 24: Potencia mientras se varía el apriete

Estos dos mismos efectos puede verse reflejado en los ensayos realizados a 2 módulos TEG (ver Anexo II Apartado 4), que además también fueron ensayados a cortocircuito y en vacío.

Por último, se colocaron en el radiador **6 TEG en fila** y se procedió a realizar diversos ensayos: **variación de presión/apriete** (comprobando el efecto anteriormente visto), **comparación** de la producción de cada TEG **en función de su posición**, y por último, un **ensayo comparando configuración en serie vs. Paralelo**.

Este último le otorgó una clara **ventaja a la configuración en paralelo**, pues obtenía una potencia bastante superior.

Configuración	Potencia [mW]
Serie	0,27
Paralelo	28

Tabla 1: Comparación serie vs. Paralelo en ensayos aislados.

Tras estos ensayos, se pueden extraer algunas **conclusiones**:

- **El contacto es un punto crítico**. Como se ha podido ver, para una misma diferencia de temperatura, la generación puede variar bastante.
- Es importante la **búsqueda del punto de máxima potencia (MPP<sup>9</sup>)**. Se ha observado como, para una misma diferencia de temperatura, la potencia generada varía bastante en función de la resistencia conectada. Esto da idea de lo importante que puede ser incluir una etapa MPPT.
- La **disposición eléctrica en paralelo**, a la vista de los resultados, parece ser la indicada.

Algunos **puntos de mejora**:

- **Garantizar un contacto óptimo** y replicable, con la ayuda de grasa térmica y una llave dinamométrica
- Adición de una **etapa MPPT** personalizada para bajas potencias
- **Aislar el radiador** en todas sus superficies, no solo entre las dos caras.
- **Reducir las fugas** hidráulicas (punto crítico en instalaciones reales)

---

<sup>9</sup> MPP: Maximum Power Point. Punto de máxima potencia

### 6.3. BANCADA DE ENSAYOS: NUEVA CONFIGURACIÓN

Tras la nueva instalación de Abora Solar en la cual se añadió el radiador a los colectores, se procedió a caracterizar el comportamiento de esta nueva configuración. Los ensayos realizados son realizados empleando como **foco frío** en el radiador **agua fría de red** que luego es vertida a desagüe. De nuevo, son presentados a continuación los resultados más relevantes, remitiendo al lector al Anexo IV para una lectura de estos más detallada.

La nueva configuración con **el radiador mejora claramente la producción**. Si se observa la Ecuación 1 del Anexo IV, en la que se relaciona la potencia producida con el salto de temperatura, podemos observar un claro aumento de potencia, con únicamente 6 módulos TEG colocados (en la antigua configuración eran 19).

Otra ensayo importante realizado es el de **variación de la resistencia eléctrica conectada**, en el cual se varió desde 1 ohmio hasta los 0,077 ohmios. En la siguiente figura se puede observar, para una diferencia de temperaturas que vamos a considerar constante (2°C de variación), la variación de potencia producida.

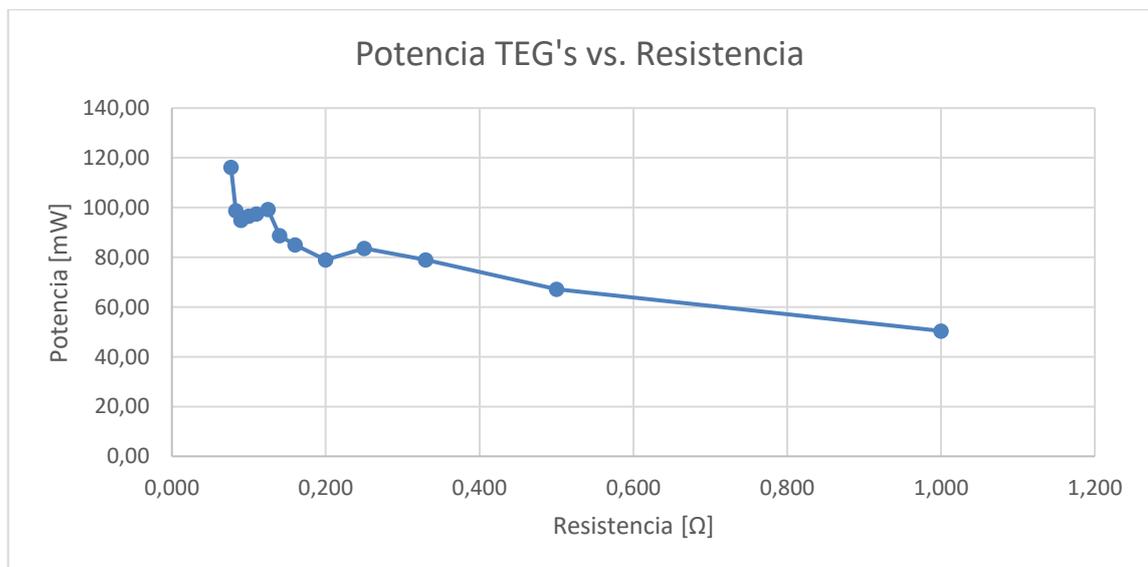


Figura 25: Potencia TEG vs Resistencia (Ensayo 2 Nueva Configuración TEG)

Con esta resistencia eléctrica se volvió a realizar un ensayo en el que se obtuvo una nueva ecuación (Ecuación 2 Anexo IV) que relacionase potencia con diferencia de temperaturas, observándose que se había mejorado esta, y por lo tanto, se había optimizado la producción.

Posteriormente, se procedió a comparar la **disposición eléctrica de los TEG en paralelo vs. serie**, y al contrario de los resultados obtenidos en los ensayos a los módulos por aislado, la **configuración en serie demostró ser superior**, a la vista de los resultados de la Tabla 2.

Disposición	Corriente [mA]	Voltaje [V]	P_TEG [mW]
Paralelo	327,04	0,12	39,24
Serie	412,13	0,14	57,70

Tabla 2: Resultados de serie vs. paralelo

Otro ensayo consistió en añadir **aislamiento entre las caras** para aislar el foco frío del foco caliente y que así no se contaminasen. El efecto de esto es un incremento en la producción, reflejado en un aumento de los coeficientes de la ecuación que relaciona potencia producida con diferencia de temperaturas.

Por último, se realizó un ensayo en el cual, gracias a la adquisición de una llave dinamométrica se **ajustó el par de todos los tornillos del radiador** a 5 N/m. Esto se realizó en vista de los resultados vistos en los ensayos aislados, donde la presión ejercida en el radiador parecía ser un factor crítico. Sin embargo, en este ensayo no solo no supuso ninguna mejora, si no que los términos de la ecuación llegaron incluso a empeorar. Esto quizá sea debido a que la presión no debe ser ejercida en todos los tornillos por igual, pues puede crear espacios de no contacto.

La mejor configuración ensayada obtuvo la siguiente ecuación:

$$y = 4,3161x + 5,686$$

(16)

Esta ecuación es la que más tarde será empleada en las simulaciones de Trnsys.

Tras estos ensayos, **se concluye**:

- La adición del **radiador**, a expensas de otros elementos, **mejora la producción**. Esto es debido a una mejor transmisión del calor.
- La **búsqueda del punto de máxima potencia** es fundamental, pues se puede llegar a conseguir el doble de potencia, algo que ya había sido observado en los ensayos aislados. Esto da idea de lo importante que puede ser un buscador de punto de máxima potencia (MPPT).
- La **configuración eléctrica óptima es en serie**, a diferencia de lo visto en anteriores ensayos.

- El **aislamiento entre caras** del radiador parece ser un factor bastante influyente.
- El **par de apriete**, que parecía ser un factor fundamental, no ha marcado tanto la diferencia como se pensaba, lo cual puede deberse a que ya se haya alcanzado el punto a partir del cual deja de ser un factor tan relevante.

Algunas posibles **línea de mejora** en estos ensayos son:

- Adición de **aislamiento en todo el radiador**.
- Añadir **pasta térmica** para mejorar el contacto.
- Crear una **etapa MPPT**.

## 6.4. SIMULACIONES EN TRNSYS

En el siguiente apartado se procede a mostrar los resultados obtenidos de las simulaciones para la extrapolación del caso de los paneles PVT+TEG a situaciones de instalaciones en edificios, con consumos eléctricos y de ACS. En el Anexo VI se puede consultar la comparación del sistema PVT+TEG con otros sistemas distintos.

	<b>Rendimiento eléctrico (%)</b>	<b>Cobertura eléctrica (%)</b>	<b>Rendimiento colector (%)</b>	<b>Cobertura térmica (%)</b>
Inst. PVT	13,01	51,24	29,26	44,36

Tabla 3: Resultados simulaciones Trnsys PVT+TEG

	<b>Energía producida (1 año) [Wh]</b>	<b>Rendimiento (%)</b>	<b>Cobertura eléctrica (%)</b>
TEG	238,62	0,01959	0,02917

Tabla 4: Resultados simulaciones TEG Trnsys PVT+TEG

A la vista de los resultados, se puede constatar que el rendimiento y cobertura de los módulos TEG es mínima. Esto se debe a su bajo rendimiento teórico, agravado enormemente por el hecho de que para conseguir dicho rendimiento teórico las condiciones de operación deben ser excelentes o de laboratorio, algo que es difícil replicar.

Por lo tanto, a la vista de los resultados de las simulaciones, se puede concluir que la instalación de los módulos TEG no supone un aumento sustancial de la producción.



## 7. CONCLUSIONES

Tras haber sido estudiada la bibliografía y conocido el estado actual de la tecnología, el presente trabajo ha profundizado en el comportamiento de los módulos termoeléctricos (o TEG).

Ha analizado su comportamiento de manera aislada, con parámetros y situaciones controladas, ha evaluado la actual integración existente en una bancada de ensayos, y posteriormente ha probado y evaluado una nueva configuración con la intención de optimizar la producción de los módulos.

Además, los resultados han sido extrapolados a casos más complejos mediante el uso de software de simulación Trnsys.

Los objetivos propuestos al inicio del trabajo han sido alcanzados y de las labores realizadas se pueden extraer algunas conclusiones:

- La implementación de TEG's en colectores PVT puede suponer un aumento en la producción de energía eléctrica
- Sin embargo, este aumento de producción está, de momento, limitado por el bajo rendimiento que estos módulos ofrecen, sumado a las complicaciones técnicas que se han de salvar para conseguir los rendimientos que indica el fabricante
- Por otro lado, salvar estas complicaciones técnicas, puede suponer que el aumento de producción no compense, económicamente hablando, el uso de los módulos.

Así mismo, se proponen algunas líneas en las que continuar investigando:

- Creación de una etapa MPPT a medida para mejorar la producción de potencia.
- Estudiar distintas integraciones o continuar con medidas similares cuando la tecnología mejore y el rendimiento de los módulos aumente.



## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IDAE, «Consumos del Sector Residencial en España. Resumen de Información Básica».
- [2] M. T. Pintanel, A. Martínez Gracia, J. Uche, A. del Amo, Á. A. Bayod Rújula, S. Usón y I. Arauzo, «Energy and environmental benefits of an integrated solar photovoltaic and thermal hybrid, seasonal storage and heat pump system for social housing,» *Applied Thermal Engineering* 213, 2022.
- [3] «ONU: Objetivos de Desarrollo Sostenible,» 22 08 2022. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
- [4] «Wikipedia, La enciclopedia libre,» 20 Junio 2022. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_fotoel%C3%A9ctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_fotoel%C3%A9ctrico).
- [5] NREL, «Best Research-Cell Efficiencies,» 2022.
- [6] IRENA, «Renewable Power Generation Costs in 2019,» 2019.
- [7] SODEAN Sociedad para el Desarrollo Energético de Andalucía.
- [8] O. Planas, «Energía Solar: Historia de la energía solar,» 31 8 2020. [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/que-es-energia-solar/historia>.
- [9] J. Antonanzas, A. del Amo, A. Martínez Gracia y A. A. Bayod Rújula, «Towards the optimization of convective losses in photovoltaic-thermal panels,» *Solar Energy* 116, pp. 323-336, 2015.
- [10] A. del Amo Sancho, «Estudio, modelado y simulación de paneles solares híbridos con cubierta transparente y aislante y validación experimental para su aplicación en sistemas de trigeneración; Tesis doctoral,» Universidad de Zaragoza, 2015.



- [11] I. Rowe y D. Michael, *Thermoelectrics handbook: macro to nano* / editado por D.M. Rowe, CRC Press, 2006.
- [12] A. Vieira da Rosa, «Thermoelectricity,» de *"Fundamentals of Renewable Energy Processes"*, Capítulo 5, 2009.
- [13] I. Serrano Canals y S. Vazeh Rasekh, «Estudio de nuevos materiales termoeléctricos basados en óxidos de hierro,» Zaragoza, 2010.
- [14] L. Kütt, J. Millar, A. Karttunen, M. Lehtonen y M. Karppinen, «Thermoelectric applications for energy harvesting in domestic applications and micro-production units. Part I: Thermoelectric concepts, domestic boilers and biomass stoves,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 98, pp. 519-544, 2018.
- [15] S. Kumar Bhukesh, A. Kumar y S. Kumar Gaware, «Bismuth telluride (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>) thermoelectric material as a transducer for solar energy application,» *Materials Today: Proceedings* 26, pp. 3131-3137, 2020.
- [16] S. Karabetoglu, A. Sisman, Z. F. Ozturk y T. Sahin, «Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures,» *Energy Conversion and Management* 62, pp. 47-50, 2012.
- [17] M. Borrelli, T. Pujol, N. Luo, L. Pacheco, A. Massaguer y L. Montoro, «Effective thermal conductance of thermoelectric generator modules,» *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2017.
- [18] P. Kuchroo, H. Bhatia y E. Sidhu, «Floating TEG Integrated Solar Panel Hybrid Energy Harvesting System,» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2017.
- [19] M. Alnajideen y G. Min, «Hybrid photovoltaic-thermoelectric system using a novel spectral splitting solar concentrator,» *Energy Conversion and Management* 251, 2022.



- [20] K.-T. Park, S.-M. Shin, A. S. Tazebay, H.-D. Um, J.-Y. Jung, S.-W. Jee, M.-W. Oh, S.-D. Park, B. Yoo, C. Yu y J.-H. Lee, «Lossless hybridization between photovoltaic and thermoelectric devices,» *Scientific Reports*, 2013.
- [21] R. Bjork y K. K. Nielsen, «The performance of a combined solar photovoltaic (PV) and thermoelectric generator (TEG) system,» *Solar Energy* 120, pp. 187-194, 2015.
- [22] S. Sripadmanabhan Indra, C. Arravind Vaithilingam, K.-K. Chong, R. Saidur, M. Faizal, S. Abudakar y S. Paiman, «A review on various configurations of hybrid concentrator photovoltaic and thermoelectric generator system,» *Solar Energy*, pp. 122-148, 2020.
- [23] S. Shittu, G. Li, X. Zhao, X. Ma, Y. Golizadeh Akhlaghi y Y. Fan, «Comprehensive study and optimization of concentrated photovoltaic-thermoelectric considering all contact resistances,» *Energy Conversion and Management* 205, 2020.
- [24] F. Badr, A. Radwan, M. Ahmed y A. M. Hamed, «An experimental study of the concentrator photovoltaic/thermoelectric generator performance using different passive cooling methods,» *Renewable Energy*, pp. 1078-1094, 2022.
- [25] H. Zhang, H. Yue, J. Huang, K. Liang y H. Chen, «Experimental studies on a low concentrating photovoltaic/thermal (LCPV/T) collector with a thermoelectric generator (TEG) module,» *Renewable Energy* 171, pp. 1026-1040, 2021.
- [26] E. Assareh, S. Mojtaba Alirahmi y P. Ahmadi, «A Sustainable model for the integration of solar and geothermal energy boosted with thermoelectric generators (TEGs) for electricity, cooling and desalination purpose,» *Geothermics* 92, 2021.
- [27] B. Lorenzi, M. Acciarri y D. Narducci, «Suitability of Electrical Coupling in Solar Cell Thermoelectric Hybridization,» 2018.



- [28] Ershuai Yin, Qiang Li y Yimin Xuan, «Experimental optimization of operating conditions for concentrating photovoltaic-thermoelectric hybrid system,» de *Journal of Power Sources*, Elsevier, 2019, pp. 25-32.
- [29] N. Syakirah Nazri, A. Fudholi, W. Mustafa, C. Hoy Yen, M. Mohammad, M. Hafidz Ruslan y K. Sopian, «Exergy and improvement potential of hybrid photovoltaic thermal/thermoelectric (PV/T) air collector,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 111, pp. 132-144, 2019.
- [30] K. Garud Sandip, S.-G. Hwang, J.-W. Han y M.-Y. Lee, «Review on Performance Enhancement of Photovoltaic/Thermal-Thermoelectric Generator Systems with Nanofluid Cooling,» *MDPI*, 2021.
- [31] Aora Solar, «aH 60 Optimum: Ficha técnica,» 2022.
- [32] M. P. Galindo Alegre, A. Martínez Gracia y M. T. Pintanel Raymundo, «Estudio preliminar de la integración de módulos termoelectricos (TEG) en paneles solares híbridos,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2020.
- [33] TEC Solid State Power Generators, «Specifications TEG Module TEG2-07025HT-SS,» 2022.
- [34] IRENA, «Renawable Power Generation Costs,» 2019.
- [35] G. M. Wilson, M. Al-Jassim, W. K. Metzger y S. W. Glunz, «The 2020 photovoltaic technologies roadmap,» *Journal of Physics*, 2020.
- [36] M. P. Galindo Alegre, A. Martínez Gracia y M. T. Pintanel Raymundo, «Estudio preliminar de la integración de módulos termoelectricos (TEG) en paneles solares híbridos,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2020.
- [37] M. T. Pintanel Raymundo y A. Martínez Gracia, «Estudio experimental de la integración de módulos termoelectricos en paneles soares híbridos PVT,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2021.
- [38] S. Shoeibi, H. Kargarsharifabad, M. Sadi, A. Arabkoohsar y S. A. Agha Mirjalily, «A review on using thermoelectric cooing, heating, and electricity



- generators in solar energy applications,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022.
- [39] S. Shittu, G. Li, Y. Golizadeh Akhlaghi, X. Ma, X. Zhao y E. Ayodele, «Advancements in thermoelectric generators for enhanced hybrid photovoltaic system performance,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 109, pp. 25-54, 2019.
- [40] P. M. Rodrigo, Á. Valera, E. F. Fernández y F. M. Almonacid, «Annual Energy Harvesting of Passively Cooled Hybrid Thermoelectric Generator-Concentrator Photovoltaics Modules,» *IEEE Journal of Photovoltaics*.
- [41] D. T. Gotfas, P. A. Gotfas, S. Mahmoudinezhad y M. Louzazni, «Critical factors and parameters for hybrid Photovoltaic-Thermoelectric systems; review,» *Applied Thermal Engineering* 215, 2022.
- [42] R. Rabari, S. Mahmud y A. Dutta, «Effect of thermal conductivity on performance of thermoelectric systems based on Effective Medium Theory,» *International Journal of Heat and Mass Transfer* 91, pp. 190-204, 2015.
- [43] L. L. Baranowski, G. J. Snyder y E. S. Toberer, «Effective thermal conductivity in thermoelectric materials,» *Journal of Applied Physics*, 2013.
- [44] S. N. Mohd Tawil y M. Zainal Zulkarnain, «Energy harvesting using TEG and PV cell for low power application,» *AIP Conference Proceedings*, 2018.
- [45] Á. A. Bayod Rújula, A. Martínez Gracia, A. del Amo, M. Cañada, S. Usón y J. A. Tejero, «Integration of Thermoelectric generator (TEG) in Solar PVT panels,» *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, 2019.
- [46] Y. Gao, D. Wu, Z. Dai, C. Wang, B. Chen y X. Zhang, «Performance analysis of a hybrid photovoltaic-thermoelectric generator system using heat pipe as heat sink for synergistic production of electricity,» *Energy Conversion and Management* 249, 2021.



- [47] L. Ma, Q. Zhao y H. Zhang, «Performance analysis of a new hybrid system composed of a concentrated photovoltaic cell and a two-stage thermoelectric generator,» *ustainable Energy, Grids and Networks* 27, 2021.
- [48] S. Mahmoudinezhad, P. A. Cotfas, D. T. Cotfas, L. A. Rosendahl y A. Rezania, «Response of thermoelectric generators to Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> and Zn<sub>4</sub>Sb<sub>3</sub> energy harvester materials under variant solar radiation,» *Renewable Energy* 146, pp. 2488-2498, 2020.
- [49] X. Liu, R. Jani, E. Orisakwe, C. Johnston, P. Chudzinski, M. Qu, B. Norton, N. Holmes, J. Kohanoff, L. Stella, H. Yin y K. Yazawa, «State of the art in composition, fabrication, characterization, and modeling methods of cement-based thermoelectric materials for low-temperatura applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [50] J. Chen, «Thermodynamic analysis of a solardriven thermoelectric generator,» *AIP Journal of Applied Physics* 79, 1996.
- [51] N. Farrar-Foley, N. Augustus Rongione, H. Wu, A. S. Lavine y Y. Hu, «Total solar spectrum energy converter with integrated photovoltaics, thermoelectrics, and thermal energy storage: System modeling and design,» *Energy Research*, 2021.
- [52] «Construible.es: Paneles solares híbridos de segunda generación, más energía solar con menos superficie de captación,» 14 10 2016. [En línea]. Available: <https://www.construible.es/comunicaciones/paneles-solares-hibridos-segunda-generacion-mas-energia-solar-menos-superficie-captacion>.
- [53] «Construible.es,» 20 01 2012. [En línea]. Available: <https://www.construible.es/2012/01/20/consumo-energetico-del-sector-residencial>.
- [54] TEC Solid State Power Generators, «WHALEFIN12-40mmLIQUID».



## **Relación de documentos**

(X) Memoria 42 páginas

(\_) Anexos NN páginas

Zaragoza, a 25 de octubre de 2022

Firmado: Carlos Subías Espuña