



Universidad
Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio experimental de paneles solares híbridos
(PVT) con módulos termoelectricos integrados

Experimental study of hybrid solar panels (PVT) with
integrated thermoelectric modules

Autor

Javier Aguaviva Pérez

Director

Cristóbal Cortés Gracia

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza (EINA)

Junio 2023

Agradecimientos

A mi familia y a mis amigos por apoyarme durante todos estos años.

A mi director Cristóbal Cortés Gracia, por ayudarme durante la realización de este trabajo y proporcionarme toda la información necesaria para la realización de este.

Al centro y a la empresa Abora, por permitir realizar la parte experimental del trabajo en la instalación.

ABSTRACT

Mediante este trabajo, se pretende realizar un estudio de la tecnología PVT, que aborde diferentes aspectos de la misma. El estudio se realiza experimentalmente en una instalación que consta de perteneciente a la Universidad de Zaragoza.

El presente trabajo aborda la producción de energía eléctrica y térmica mediante el uso de paneles solares híbridos (PVT) que generan simultáneamente energía eléctrica y térmica en la misma superficie plana convectiva.

Además, se analizará la integración de módulos termoeléctricos (TEG) para mejorar la eficiencia y producción de energía.

Through this work, the aim is to carry out a study on PVT technology, addressing different aspects of it. The study is conducted experimentally in a facility belonging to the University of Zaragoza.

This paper addresses the production of electrical and thermal energy through the use of hybrid solar panels (PVT) that simultaneously generate electrical and thermal energy on the same convective flat surface.

Furthermore, the integration of thermoelectric modules (TEG) will be analyzed to improve efficiency and energy production.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	7-8
2. FUNDAMENTOS, APLICACIONES Y TECNOLOGÍA	9-20
2.1 FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA PVT	9-14
2.2 TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA ACTUAL Y PREVISIONES	15-17
2.3 FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA TEG	18-19
2.4 ESTUDIOS Y APLICACIONES ANTERIORES DE LA TECNOLOGIA TEG	21-21
3. METODOLOGÍA	22-38
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INSTALACIÓN	22-33
3.1.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PANELES PVT UTILIZADOS	22-26
3.1.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA HIDRÁULICO	27-32
3.1.3 ELEMENTOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO	33-34
3.2 FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN	34-35
3.2.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HIDRÁULICO	35
3.2.2 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ELÉCTRICO	36
3.3 NORMA DE APLICACIÓN	36
3.4 PUESTA EN MARCHA DE LA BANCADA	37-38
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	39-41
5. CONCLUSIONES	42
6. BIBLIOGRAFÍA	43-44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: ODS relacionados con el trabajo [3].	8
Figura 2: Imagen de un panel PV convencional.	9
Figura 3: Esquema de un colector solar plano convencional [4].	10
Figura 4: Panel PVT refrigerado por aire [5].	10
Figura 5: Esquema clasificación PVT según su aislamiento [6].	12
Figura 6: Ecuaciones de funcionamiento de diversos colectores [4].	13
Figura 7: Estructura del panel solar Abora ah60 [7].	13
Figura 8: Representación esquemática del panel Abora ah60.	14

Figura 9: Coste por cada vatio de potencia del panel solar en función del tiempo [8].	15
Figura 10: Evolución del precio del módulo fotovoltaico del panel plano [9].	16
Figura 11: Comparación generación de energía eléctrica 2021 vs 2022.	16
Figura 12: Evolución del empleo en los sectores de energías renovables según [13].	17
Figura 13: Un circuito termoeléctrico compuesto por materiales de diferentes coeficientes de Seebeck (semiconductores tipo p-dopados y n-dopados), configurado como un generador termoeléctrico [14].	18
Figura 14: Esquema de un módulo termoeléctrico comercial [15].	19
Figura 15: Especificaciones de modelo aH60 del PVT de la empresa Abora Solar [7].	22
Figura 16: Rendimiento y producción esperada de un panel PVT aH60 [7].	23
Figura 17: Modelo de TEG utilizado.	23
Figura 18: Modificación de la tubería de entrada del PVT+TEG [22].	24
Figura 19: Disposición de los TEG colocados en las aletas de cobre [22].	24
Figura 20: Visión del interior del panel con los módulos TEG ya colocados [22].	24
Figura 21: Imagen del radiador colocado.	25
Figura 22: A la izquierda el interior de un radiador, a la derecha el exterior de un radiador [22].	25
Figura 23: Modelo de ensayos del radiador [22].	26
Figura 24: Sistema de monitorización [22].	26
Figura 25: Imagen de la bancada utilizada.	27
Figura 26: Imagen de la zona posterior de la bancada utilizada.	27
Figura 27: Esquema del sistema hidráulico.	28
Figura 28: Esquema hidráulico del radiador.	28
Figura 29: Imagen del grupo de bombeo utilizado [21].	29
Figura 30: Imagen del aerotermo de la bancada.	29
Figura 31: Imagen del vaso de expansión.	30
Figura 32: Imagen del caudalímetro.	30
Figura 33: Imagen del sensor de presión.	30
Figura 34: Imagen de la sonda TSolar.	31
Figura 35: Imagen de la sonda TDepósito.	31
Figura 36: Imagen de la sonda TInlet.	31
Figura 37: Imagen de la sonda TOutlet.	31
Figura 38: Imagen del Piranómetro.	32
Figura 39: Caracterización del piranómetro [23].	32
Figura 40: Microinversor modelo YC500I [24].	33

Figura 41: Ficha técnica modelo YC500I [24].	33
Figura 42: Cuadro eléctrico.	34
Figura 43: Esquema sistema eléctrico de la instalación.	34
Figura 44: Imagen de las válvulas V6 y V5, ambas abiertas.	35

ÍNDICE DE ECUACIONES

(1)	32
(2)	39
(3)	39
(4)	39
(5)	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Desviación permitida para parámetros medidos durante un periodo de medida según ISO 9806.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

PVT: Térmico-Fotovoltaico.

TEG: Generador Termoeléctrico.

ACS: Agua Caliente Sanitaria.

AIE: Agencia Internacional de la Energía.

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.

PV: Fotovoltaico.

DC: Corriente continua.

AC: Corriente alterna.

PVT/a: Térmico-Fotovoltaico refrigerado por aire.

PVT/w: Térmico-Fotovoltaico refrigerado por agua.

CTA: Cubierta Transparente y Aislante.

TIM: Transparent Insulating Material.

EVA: Acetato de vinilo-etileno.

TDT: Tedlar Poliéster Tedlar

LEM: Liaison Électronique et Mécanique

1. INTRODUCCIÓN

El uso excesivo de compuestos nocivos para el medioambiente con el objetivo de la generación de distintos tipos de energía ha supuesto uno de los mayores problemas a los que se ha podido enfrentar la humanidad.

El inminente avance del cambio climático acecha a nuestro modo de vida tal y como lo conocemos.

Para combatirlo es necesario abordar la producción de energía mediante métodos más sostenibles que no pongan en peligro el único lugar habitable que conoce la humanidad.

Uno de los métodos de producción sostenible que más en auge está en la actualidad y que más viabilidad tiene en el futuro es la generación de energía eléctrica y térmica simultáneamente mediante paneles solares PVT.

Tanto es así, que España según [1] ha triplicado la producción de energía solar fotovoltaica en tan solo tres años, pasando de 4.767 MW 2019 a 15190 MW en 2021.

[2] prevé el uso de energía procedente de fuentes renovables llegará a un 44% en 2040, la bajada en los precios de los paneles en los últimos años y el impulso del autoconsumo demuestra la obviedad de que la producción de energía mediante paneles fotovoltaicos va a seguir aumentando enormemente durante los próximos años.

En este trabajo se aborda la generación de energía eléctrica y térmica, usada está última para la producción de ACS.

Además, se abordará, la optimización y mejora de la producción y eficiencia de estos paneles mediante la integración de módulos termoeléctricos.

Viendo la viabilidad real que tiene la integración de estos y si realmente es rentable instalar estos módulos o los costes superan a los beneficios.

Para establecer las conclusiones respecto a estos aspectos se realizará un estudio experimental.

Todos los detalles de los paneles, módulos termoeléctricos, componentes de la instalación, así como funcionamiento de esta serán explicados más adelante.

Los objetivos que presenta este trabajo son varios:

- Dar conocimientos de donde surge esta tecnología, así como su situación actual y expectativas de futuro
- Explicar el funcionamiento y estructura de los paneles PVT.
- Explicar el funcionamiento y estructura de los módulos TEG.
- Realizar un estudio experimental que nos permita evaluar el funcionamiento de los paneles PVT en diferentes condiciones de trabajo
- Evaluar la integración de los módulos TEG en los paneles PVT.
- Analizar los resultados obtenidos del estudio y poder establecer conclusiones que sean útiles para posteriores estudios.

Siendo consecuentes con el compromiso de la universidad de Zaragoza en el desarrollo de fuentes de energía renovables tan necesarias para el cumplimiento de los ODS y las metas de la Agenda 2030 [3], a la que la universidad también le otorga suma importancia, se remarcan los ODS y metas con los que este trabajo está relacionado.

ODS 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura sostenible y moderna

- Meta 7.2: De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.
- Meta 7.3: De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética

ODS 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles

- Meta 11.6: De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per capita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo.

ODS 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles

- Meta 12.a: Ayudar a los países en desarrollo a fortalecer su capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles.



Figura 1: ODS relacionados con el trabajo [3].

2. FUNDAMENTOS, APLICACIONES Y TECNOLOGÍA

2.1 FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA PVT

Los paneles PVT tienen por objetivo la generación de energía eléctrica y energía térmica simultáneamente en la misma superficie plana convectiva.

Debido a este objetivo, los paneles PVT se basan en la hibridación de dos elementos:

Los paneles solares fotovoltaicos, que tienen el objetivo de generar la energía eléctrica. Y los colectores solares que tienen por objetivo el captar la energía solar para producir el calentamiento de un fluido.

El funcionamiento de un panel fotovoltaico está basado en el aprovechamiento de la irradiancia que emite el sol. Para ello necesita una serie de elementos que son explicados posteriormente, uno de los más importantes son las células fotovoltaicas, que constituyen el panel PV.

Cuando los fotones de la luz solar inciden sobre las células fotovoltaicas, los electrones en el material semiconductor que forman las células fotovoltaicas comúnmente suelen ser de silicio, adquieren suficiente energía para escapar de sus átomos y generar una corriente eléctrica. Los electrones se mueven de la zona negativa (exceso de carga negativa) a la zona positiva través del material de manera controlada, lo que crea un flujo de corriente eléctrica.

Para aumentar el voltaje y la potencia generada, varias células se conectan en serie para formar un módulo o panel fotovoltaico. Sin embargo, la potencia producida es generada en DC, por lo que se necesita un inversor, que la convierte en AC compatible con la red eléctrica.



Figura 2: Imagen de un panel PV convencional.

El proceso que tiene lugar en los colectores solares es diferente, un colector solar es un dispositivo que gracias a la energía térmica emitida por el sol eleva la temperatura de un fluido que circula por un sistema de conductos.

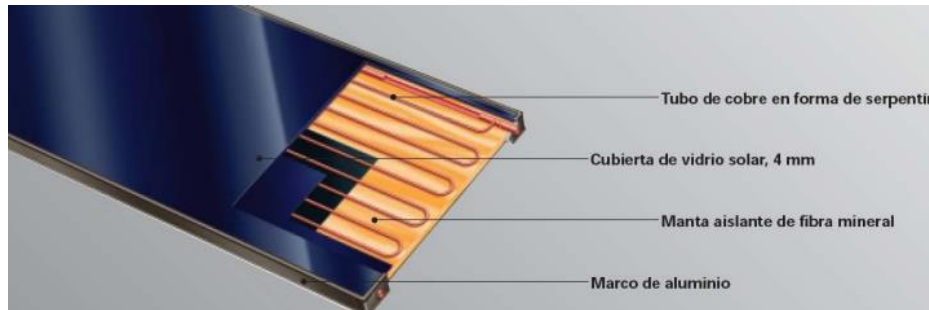


Figura 3: Esquema de un colector solar plano convencional [4].

Mediante la hibridación de un panel PV y un colector solar, elementos obligatorios en la edificación, obtenemos un panel PVT, que se basa en la integración de un panel PV con agua caliente en la misma superficie de captación.

Como ya se ha comentado anteriormente, estos paneles tienen como objetivo la producción de energía térmica y eléctrica simultáneamente. Estos paneles pueden ser clasificados según diversas características.

Clasificación de los paneles PVT

Los paneles PVT se pueden clasificar en función de diversas características. Aquí vamos a clasificarlos según el fluido caloportador y la tecnología usada.

1. Según el fluido caloportador:

PVT refrigerado por aire (PVT/a):

En este tipo de refrigeración el aire se utiliza tanto para refrigerar la superficie del panel como el recuperador de calor. La refrigeración por aire es más sencilla y barata ya que no requiere de conductos que transporten el fluido.

Sin embargo, es menos eficiente, esto es debido a la baja transmisión térmica del aire ya que su conductividad térmica (λ) es tan solo de 0.024 W/mK.

Son paneles utilizados en aplicaciones de pequeña escala como puede ser en el precalentamiento de aire o en la agricultura.

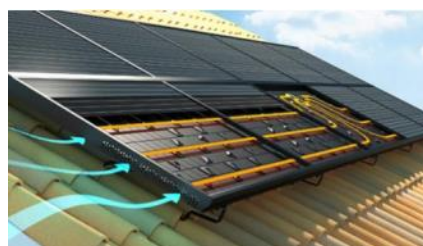


Figura 4: Panel PVT refrigerado por aire [5].

PVT refrigerado por agua (PVT/w):

Debido al sistema de conductos y bombas necesarias para impulsar el agua que funciona como refrigerante por el panel y el recuperador de calor hace que el sistema sea más costoso. Esto es debido a la complejidad del circuito y a la necesidad de un mantenimiento cada cierto tiempo, por esto mismo suelen presentar una menor durabilidad que los refrigerado por aire.

Sin embargo, presenta una eficiencia bastante mayor ya que presenta una mayor transmisión térmica, con un coeficiente de conductividad λ de 0.58 W/mK.

Son paneles que su uso radica en aplicaciones de alto nivel de eficiencia, como puede ser refrigeración de edificios o uso industrial.

Además, usan depósitos térmicamente aislados que ayudan a un almacenamiento mucho más eficiente de la energía cuando la generación es mayor que el consumo.

Según la tecnología usada:

PVT-0: Son los primeros modelos, registrados por primera vez en la década de los 70. El recuperador de calor no está aislado térmicamente del ambiente por su cara posterior. Este diseño está concebido para refrigerar al máximo las células fotovoltaicas no siendo interesante el calor recuperado. El objetivo de este modelo es maximizar la generación eléctrica mediante la refrigeración de las células.

PVT-1: Paneles híbridos que tienen adosado un recuperador de calor por la cara posterior y a su vez está aislado térmicamente del ambiente, esto se hace para reducir las pérdidas de calor. Su objetivo es aprovechar parte de calor para aplicaciones de baja temperatura, en climas cálidos u obtener un panel económico.

PVT-2: Corresponde con un PVT-1 al cual se le adosa una CTA que aísla térmicamente el panel también por la cara frontal. Con esto se minimizan aún más las pérdidas de calor al ambiente.

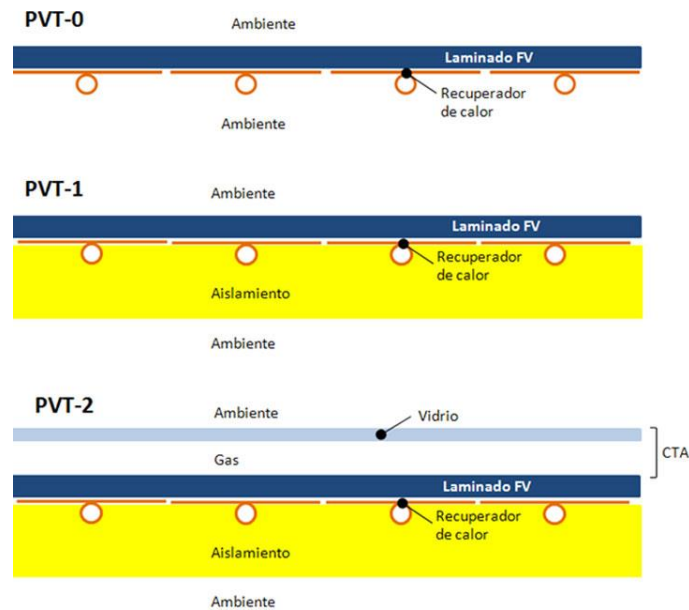


Figura 5: Esquema clasificación PVT según su aislamiento [6].

Los modelos PVT-2 pueden ser clasificados según la clasificación de la CTA.

CTA-Aire: Entre el vidrio que separa el laminado FV del exterior se encuentra una capa de aire.

CTA-TIM: Esta basado en el diseño del CTA-Aire. Sin embargo, ahora posee también una cámara TIM, que consiste en pequeñas retículas cilíndricas formadas por un material transparente, estas impiden el paso del aire formando una capa aislante.

CTA-Vacío: Se aplican unos separadores entre el vidrio y el laminado PV que impidan la reducción de espacio y este se sella al vacío.

CTA-GN: El espacio entre el vidrio y el laminado PV se llena con un gas inerte, generalmente Argón.

Los paneles sin cubierta tienen su aplicación directa en instalaciones como piscinas debido al bajo rango de temperaturas en el que trabajan. Esto se puede apreciar en la siguiente gráfica.

Ecuaciones de funcionamiento

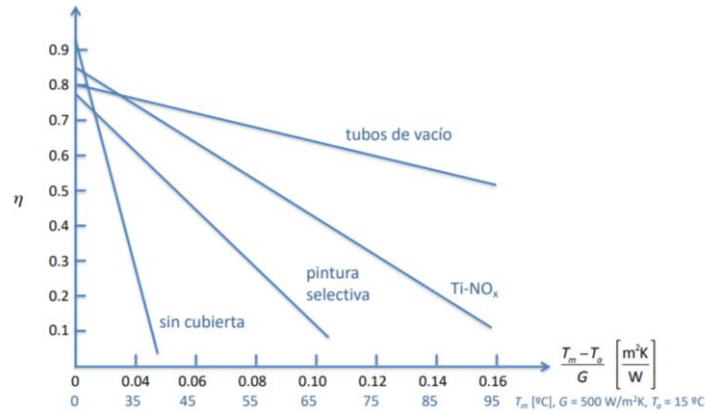


Figura 6: Ecuaciones de funcionamiento de diversos colectores [4].

Como se puede ver en las distintas rectas, el modelo sin cubierta pese a tener una pendiente muy acrecentada, es el que más rendimiento presenta para rangos de bajo de $(T_m - T_a)$, que es la diferencia entre la temperatura media del agua y la temperatura ambiente.

Estructura del Panel PVT

En cuanto a los paneles PVT, en nuestro caso han sido suministrados por el fabricante zaragozano Ahora Solar, el modelo suministrado es el

aH60-PROTO-680, por lo que será el panel utilizado para explicar los componentes de este, es decir, puede haber diferencias entre la estructura de este panel en concreto y otros modelos realizados por otros fabricantes.

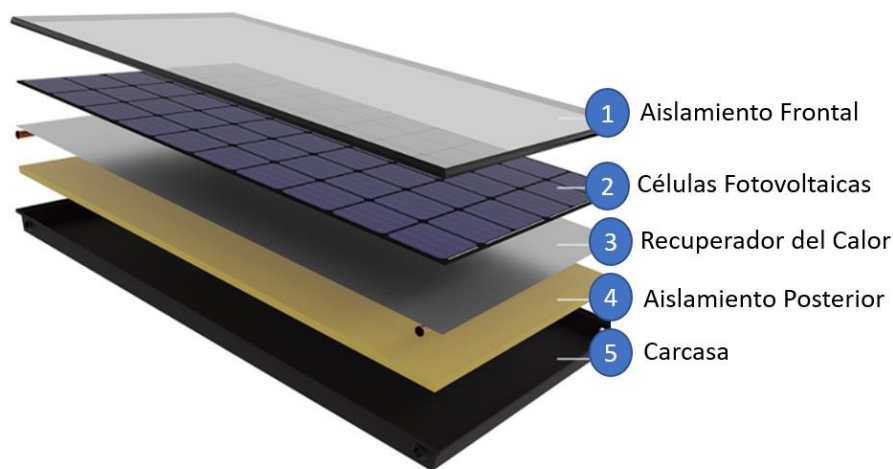


Figura 7: Estructura del panel solar Ahora ah60 [7].

Capa 1: Aislamiento frontal, consta de dos vidrios aislantes, entre ellos, una cámara de Argón, se usa este gas debido a las propiedades aislantes térmicas que aporta, reduciendo así las pérdidas por convección.

Capa 2: En la capa 2 se encuentra el panel de células fotovoltaicas, este panel cuenta con 60 células. Este panel de células se encuentra encapsulado por el encapsulante acetato de vinilo-etileno, conocido como EVA (Polímero termoplástico, que forma una película aislante evitando la entrada de aire o humedad.), encontrándose 3 capas distintas del mismo. Además de todo esto, se encuentra una lámina de TPT (Backsheet) con el objetivo de aumentar el rendimiento eléctrico, esta lámina se encuentra cubierta entre las dos últimas capas de EVA.

Capa 3: Aquí encontramos el recuperador de calor, formador por chapas de aluminio soldadas a tubos de cobre, por estos tubos circulará el agua con el objetivo de calentarla.

Capa 4: Aislamiento Posterior, se encarga de reducir las pérdidas provocadas por falta de aislamiento.

Capa 5: Carcasa, cierra el panel solar híbrido.

Vidrio (G1)
Gas Inerte (Argón)
Vidrio (G2)
EVA1
Célula Fotovoltaica (PV)
EVA2
Backsheet (Bs)
EVA3
Placa Absorbadora (ABS)
Aislante (AIS)
Carcasa (CAR)

Figura 8: Representación esquemática del panel Abora ah60.

2.2 TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA ACTUAL Y PREVISIONES

INFORMACIÓN ACTUAL Y ESTIMACIONES PREVISTAS

Como se ha planteado anteriormente, el auge de la tecnología fotovoltaica la sitúa en una posición excepcional para ser una de las principales sustitutas de las fuentes de energía no renovables.

La mejora constante de la tecnología y la necesidad de un cambio de modelo hace que acceder a este tipo de tecnología cada vez sea más factible, basándonos en unos datos que lo avalan.

Principalmente, los paneles solares tanto PV como PVT se han vuelto mucho más económicos con el paso de los años. Han bajado tanto los costes de fabricación, como los costes de generación de la energía.

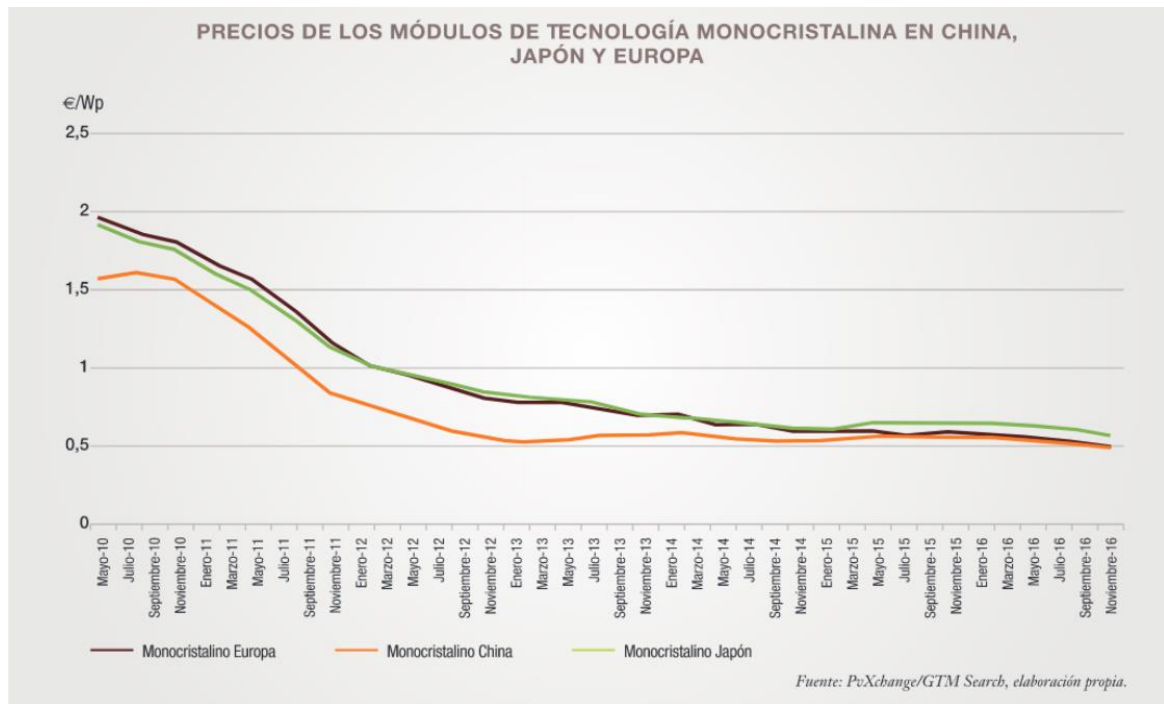


Figura 9: Coste por cada vatio de potencia del panel solar en función del tiempo [8].

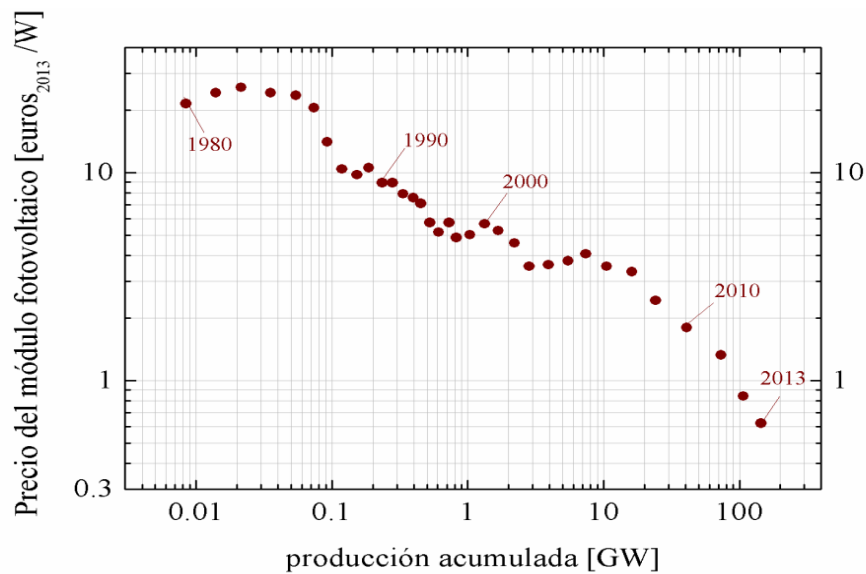


Figura 10: Evolución del precio del módulo fotovoltaico del panel plano [9].

La disminución de los precios ha ocasionado que el porcentaje de la demanda cubierta por la energía solar fotovoltaica haya aumentado considerablemente.

Según [10], en 2021, cubrió el 8% de la demanda eléctrica anual en España. Tan solo un año después, en 2022 ese número aumentó hasta el 10.1%.

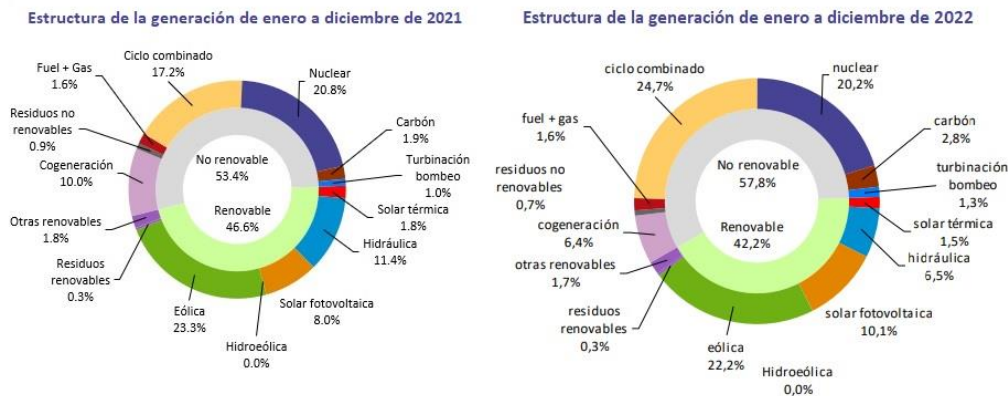


Figura 11: Comparación generación de energía eléctrica 2021 vs 2022.

En cuanto a las previsiones a futuro en España y a nivel global, varían según la fuente e informe consultado. Sin embargo, la inmensa mayoría de los informes son muy prometedores.

Según [11], se espera que la energía solar fotovoltaica alcance una capacidad instalada de 39 GW en el año 2030. Este aumento de la capacidad instalada permitiría que la energía solar fotovoltaica cubra el 35% de la demanda eléctrica en 2030.

Según [12], En 2050, la energía solar FV constituiría la segunda fuente de generación eléctrica más importante, solo por detrás de la energía eólica, y marcaría la senda de la transformación del sector eléctrico global. La energía solar FV generaría una cuarta parte (el 25%) de la electricidad total necesaria a escala global, con lo que se convertiría en una de las fuentes de generación más importantes para 2050.

Otro punto de vista desde el cual podemos ver la gran importancia del sector fotovoltaico tanto en el presente como en el futuro a largo plazo es el número de empleos que genera.

Según [13], se estima que, en el año 2021, la energía solar fotovoltaica generó alrededor de 31.500 empleos directos en España.

Lo que supone un aumento significativo respecto a años anteriores.

Además, el informe también recoge que fue la fuente de energía renovable que más empleo generó ese mismo año. Superando los generados por el sector de la energía eólica y los del sector de la energía hidráulica, que son los principales rivales del sector de la energía solar fotovoltaica.

Figure 1 Evolution of global renewable energy employment by technology, 2012-2021



Figura 12: Evolución del empleo en los sectores de energías renovables según [13].

2.3 FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA TEG

En este apartado se van a exponer los fundamentos de la generación termoelectrica mediante módulos. Así como ecuaciones matemáticas que permiten estimar las características principales de los módulos.

La característica principal de los módulos termoelectricos es que están basados en los principios del efecto Seebeck.

El principal fundamento físico es el efecto Seebeck que se basa en la producción de voltaje eléctrico debido a una diferencia de temperaturas entre dos metales diferentes, dos semiconductores o un metal y un semiconductor.

Al conectar dos conductores diferentes entre sí, la diferencia de temperatura entre ellos en el punto de contacto causa una diferencia de potencial lo que genera una corriente eléctrica en los conductores, el sentido del corriente eléctrico está determinado por las temperaturas de los metales, fluyendo del de mayor temperatura al menor.

En el caso de los TEG, se puede representar con el siguiente esquema:

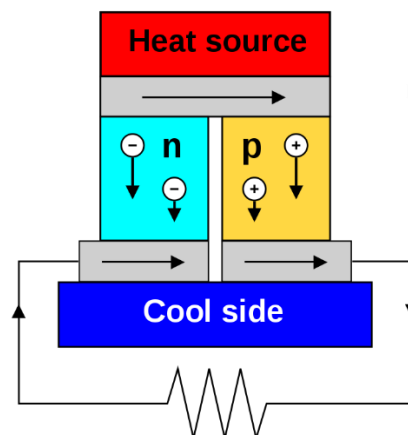


Figura 13: Un circuito termoelectrico compuesto por materiales de diferentes coeficientes de Seebeck (semiconductores tipo p-dopados y n-dopados), configurado como un generador termoelectrico [14].

El Coeficiente de Seebeck de un material mide la magnitud de un voltaje termoelectrico inducido en respuesta a una diferencia de temperatura a través de ese material, el coeficiente de Seebeck tiene unidades en la práctica de $\mu\text{V}/\text{K}$. Los valores en los cientos de $\mu\text{V}/\text{K}$, negativos o positivos, son típicos de buenos materiales termoelectricos.

Este coeficiente depende en gran medida de la estructura cristalina del material. En los metales este coeficiente suele ser bajo, debido a que los valores negativos de los electrones se suelen compensar con los valores positivos de los huecos. Sin embargo, los semiconductores, que pueden estar dopados en excesos de

huecos o electrones sí que pueden tener alto coeficientes Seebeck, tanto positivos como negativos.

Este es uno de los motivos principales por el cual se utilizan semiconductores dopados para la formación de módulos termoeléctricos, así se potencia el voltaje generado.

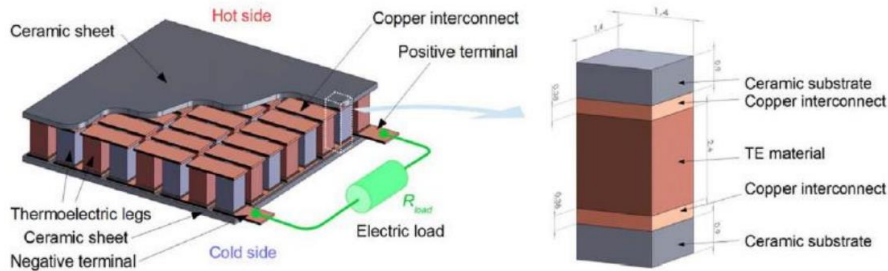


Figura 14: Esquema de un módulo termoeléctrico comercial [15].

Estos módulos constan de tres elementos principales:

1. Termoelementos.
2. Puentes eléctricos.
3. Placas (generalmente cerámicas aislantes).

Generalmente, varios pares de semiconductores tipo p (huecos) y tipo n (cargas) se conectan térmicamente en paralelo y eléctricamente en serie, mediante puentes eléctricos con el objetivo de aumentar la tensión eléctrica de operación.

Para realizar los puentes eléctricos se suelen utilizar elementos como el cobre, de bajo punto de fusión, con el objetivo de no dañar los termoelementos durante el proceso de soldadura.

El funcionamiento práctico es el siguiente: si a la soldadura que une los pares semiconductores se le aplica calor manteniéndose una temperatura caliente en un extremo, mientras que el otro extremo se mantiene a una temperatura más fría, se produce una fuerza electromotriz que genera una corriente eléctrica en el circuito.

Es decir, es la aplicación de los conocimientos teóricos del efecto Seebeck explicados anteriormente.

2.4 ESTUDIOS Y APLICACIONES ANTERIORES DE LA TECNOLOGÍA TEG

En aspectos generales, anteriormente los módulos TEG han sido utilizados en marcapasos debido a la es la necesidad de realizar una operación añadida cuando la pila está próxima a agotarse. Con los TEG se elimino este problema, la cara fría del módulo termoeléctrico se encuentra en contacto con la parte interna de la piel, mientras que la cara caliente está en contacto con el corazón. Aunque la diferencia de temperatura es de tan solo un grado, se puede conseguir cargar la pila a un ritmo superior al de descarga. Lo que evita que el marcapasos deje de funcionar [16].

También han sido usados en sondas no tripuladas o satelites. En este caso los módulos obtienen la energía por la desintegración de elementos radiactivos, el calor emitido en este proceso es convertido en energía eléctrica debido al efecto termoeléctrico, a este dispositivo se le conoce como RTG y puede ser considerado como un tipo de batería [17].

En lo referentes a nuestro estudio, anteriormente se han realizado diferentes estudios recientes con propositos similares en la misma instalación de nuestro centro, hay varios destacables como [18],[19],[20],[21] y [22]. Todos ellos se llevaron a cabo en la misma instalación, cabe destacar que entre ellos ha habido modificaciones notables en la instalación.

En [19] se habla de la construcción y diseño de la instalación, el objetivo es observar el incremento de producción que se produce en el panel con PVT+TEG, y las diferencias de comportamiento entre los paneles, concretamente en rendimientos y el ratio W/Q. Concluye que la generación adicional es modesta y que puede contribuir a mejorar la eficiencia general de los sistemas.

En [18] se analizan las condiciones que pueden maximizar la producción tanto del PVT como del PVT+TEG, y se analizan cuatro parámetros, la irradiancia, la temperatura de entrada, la de ambiente y el flujo másico de entrada.

El estudio muestra los siguientes resultados:

Temperatura de entrada:

Conforme baja la temperatura de entrada aumenta la eficiencia eléctrica de los TEG, además de la eficiencia general de ambos PVT.

Temperatura ambiente:

El aumento de la temperatura ambiente produce un aumento en la eficiencia térmica de los paneles y la eficiencia eléctrica de los TEG. Sin embargo no se aprecia un aumento de la producción.

Caudal másico:

Su reducción supone un sobrecalentamiento de las células PV y una reducción en la eficiencia eléctrica de los paneles.

Este sobrecalentamiento afecta positivamente la eficiencia de los módulos TEG, pero no se aprecia mejora en la eficiencia térmica.

Irradiancia:

La eficiencia eléctrica de los paneles PVT disminuye con un aumento en la radiación solar. Por el contrario, la eficiencia de los módulos TEG y la eficiencia térmica de los paneles aumentan, al igual que la producción térmica.

En [20] y [21] se siguen realizando ensayos en la instalación, ambos concluyen que la instalación de los TEG no suponen un beneficio relevante en la producción.

En [22] se configura una nueva versión de la instalación, añadiendo un radiador compuesto por varios TEG, que permita aprovechar la diferencia de temperaturas entre foco frío y caliente.

Debido a que nuestro estudio va a tener relación directa con los proyectos anteriores se adoptará la configuración diseñada en [22].

3. METODOLOGÍA

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INSTALACIÓN

3.1.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PANELES PVT UTILIZADOS

La instalación consta principalmente de dos bloques, el sistema eléctrico y el sistema hidráulico.

La bancada está compuesta por dos paneles solares PVT, suministrados por la empresa Abora Solar del modelo aH60 de las siguientes características, las cuales se pueden encontrar en la ficha técnica del producto:

+ Especificaciones Generales	
Largo x Ancho x Espesor	1650 x 995 x (85+22) mm
AreaTotal	1.65m ²
Area de Apertura	1.61 m ²
Nº células	60
Peso	43 kg.
Vidrio Frontal	3.2 mm.templado
Marco	Aluminio
Protección Caja de Conex.	IP65
Nº Diodos	3 diodos
Dimensiones de célula	156 x 156
Tipo de conexión FV / Longitud cables	Solarlok PV4 / 1m
+ Especificaciones Térmicas	
Rendimiento óptico	0.59
Coef. Pérdidas Térmicas,a1	3.3 W/m ² .K
Coef. Pérdidas Térmicas,a2	0.018 W/m ² .K ²
Volumen liquido interior	1.2 L
Temperatura de estancamiento	154,9 °C
Num. Conexiones hidráulicas	4 conexiones
Medida Conexión hidráulica	conexionado rápido
Presión máxima admisible	10 bar
+ Especificaciones Eléctricas	
Condiciones de prueba estándar STC: AM 1.5, Irradiación 1000 W/m ² , temperatura de la célula 25 °C.	
Tipo de célula	Mono-cristalina
Potencia Nominal (W)	260 W
Tensión Máxima Potencia (Vmpp)	31.72 V
Corriente Máxima Potencia (Impp)	8.05 A
Tensión Circuito Abierto (Voc)	38.65 V
Corriente Cortocircuito (Isc)	9.07 A
Eficiencia del módulo (%)	16.01
Tolerancia de Potencia (W)	0/+3%
Tensión Máxima del Sistema	DC 1000 V (IEC)
Backsheet	Negro
Coeficiente de temperatura de Pmpp	-0.43%/°C
Coeficiente de temperatura de Voc	-0.34%/°C
Coeficiente de temperatura de Isc	+0.03%/°C
Corriente inversa máxima	15A
Temperatura NOCT*	47+/-2 °C

Figura 15: Especificaciones de modelo aH60 del PVT de la empresa Abora Solar [7].

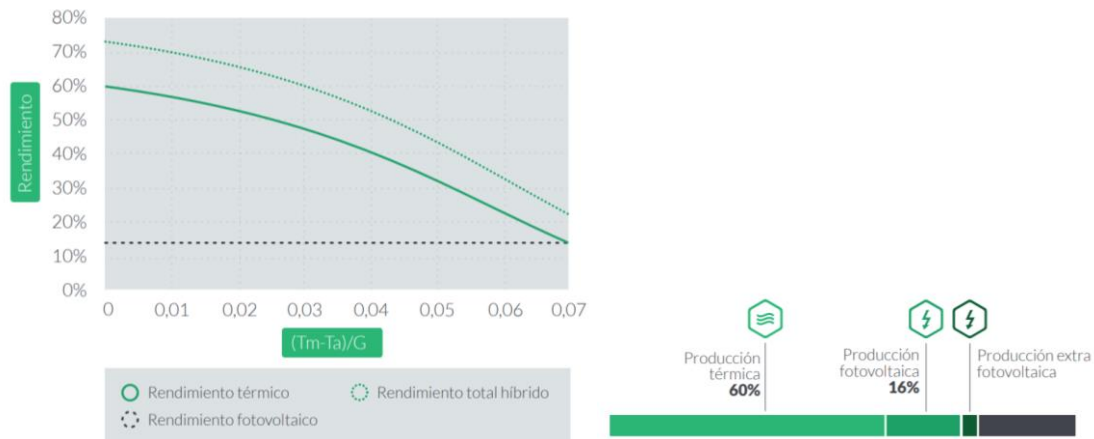


Figura 16: Rendimiento y producción esperada de un panel PVT aH60 [7].

En cuanto a la estructura del panel sigue la referenciada en el apartado 2.1, como ya se ha comentado a uno de los paneles se le ha implementado en el interior 19 módulos TEG conectados en serie, con el objetivo de mejorar la eficiencia del sistema en anteriores proyectos, parte de estos módulos han sido extraídos y posicionados en un radiador exterior, aprovechando la diferencia de temperaturas que se origina en el sistema hidráulico.

Estos TEG implementados son el modelo TEG2-07025HT-SS del fabricante TEC-Solidstate Power Generation.



Figura 17: Modelo de TEG utilizado.

Para aprovechar al máximo la capacidad de generar potencia de los módulos TEG que se encuentran dentro del panel fue necesario modificar la disposición inicial de las tuberías que recorrían el PVT, desviando la tubería de agua fría (entrada al panel) al lado de la tubería de agua caliente (salida panel), actuando, así como foco frío y foco caliente respectivamente.



Figura 18: Modificación de la tubería de entrada del PVT+TEG [22].

Además, con el objetivo de mejorar la transferencia de calor a los módulos TEG, se dispusieron una serie de aletas de cobre unidas a las tuberías.

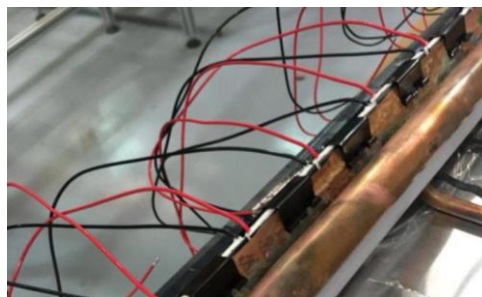


Figura 19: Disposición de los TEG colocados en las aletas de cobre [22].

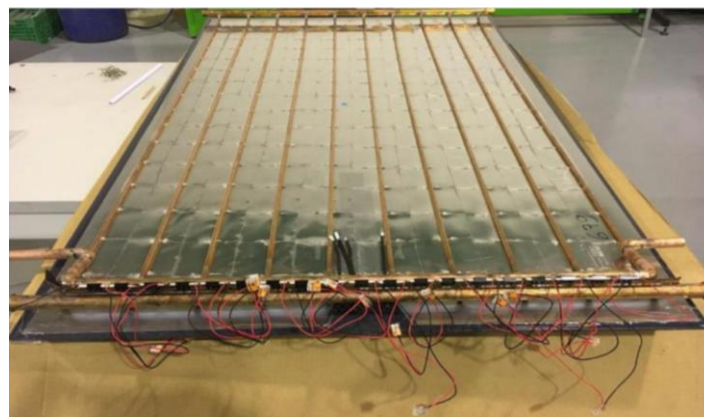


Figura 20: Visión del interior del panel con los módulos TEG ya colocados [22].

Como ya se ha comentado, en [21] con el objetivo de mejorar la producción y eficiencia de la instalación se colocó en el exterior un radiador, el cual contiene 6 TEG, que aprovecha la diferencia de temperaturas en el sistema hidráulico para mejorar la producción.

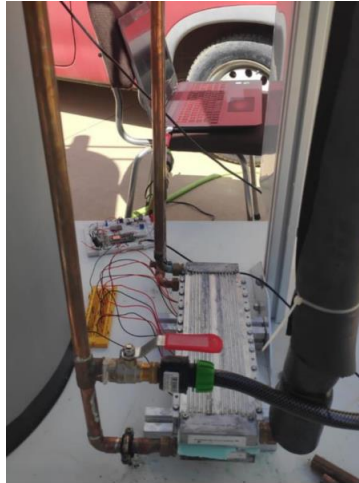


Figura 21: Imagen del radiador colocado.

El diseño del nuevo sistema hidráulico que permitiera incorporar el radiador fue realizado por la empresa Abora Solar, para ello realizó ensayos en sus propias instalaciones y más tarde acudió a la Universidad de Zaragoza donde realizó la modificación.

También se realizaron en la propia universidad ensayos propios en los que se variaban el número de TEG para ver como afectaba a la potencia generada.

Para llevar a cabo los ensayos se generó un entorno que pudiera replicar la situación que se iba a dar a cabo en la propia instalación.

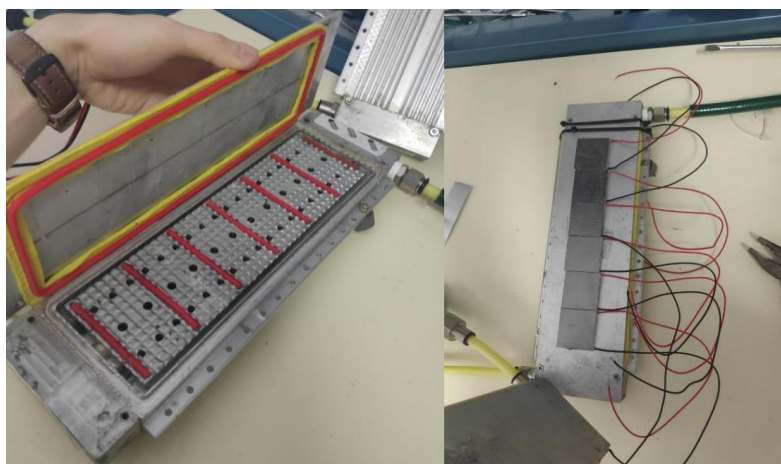


Figura 22: A la izquierda el interior de un radiador, a la derecha el exterior de un radiador [22].

En la instalación los TEG se encuentran entre dos de estos radiadores en uno de ellos se hacía circular el agua del foco caliente y por el otro el agua del foco frío. Para simular esta situación se llevo a cabo un ensayo aislado en este modelo:

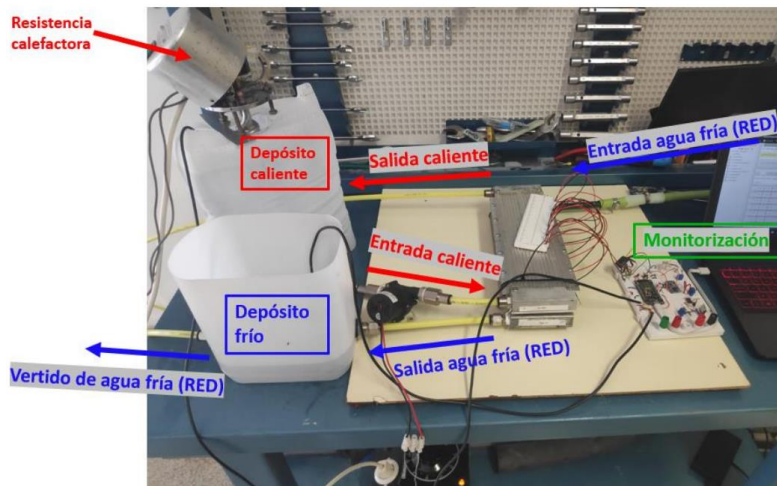


Figura 23: Modelo de ensayos del radiador [22].

La producción eléctrica que se genere va a ser monitorizada por una etapa digital programada en Arduino y constituida por un sensor LEM, un convertor analógico-digital, dos sondas de temperatura sumergibles, y un microcontrolador que recoge los datos y los sube y almacena en un servidor proporcionado por Abora.

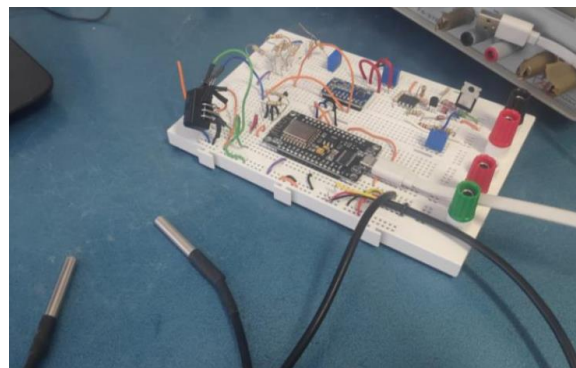


Figura 24: Sistema de monitorización [22].

3.1.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA HIDRÁULICO



Figura 25: Imagen de la bancada utilizada.



Figura 26: Imagen de la zona posterior de la bancada utilizada.

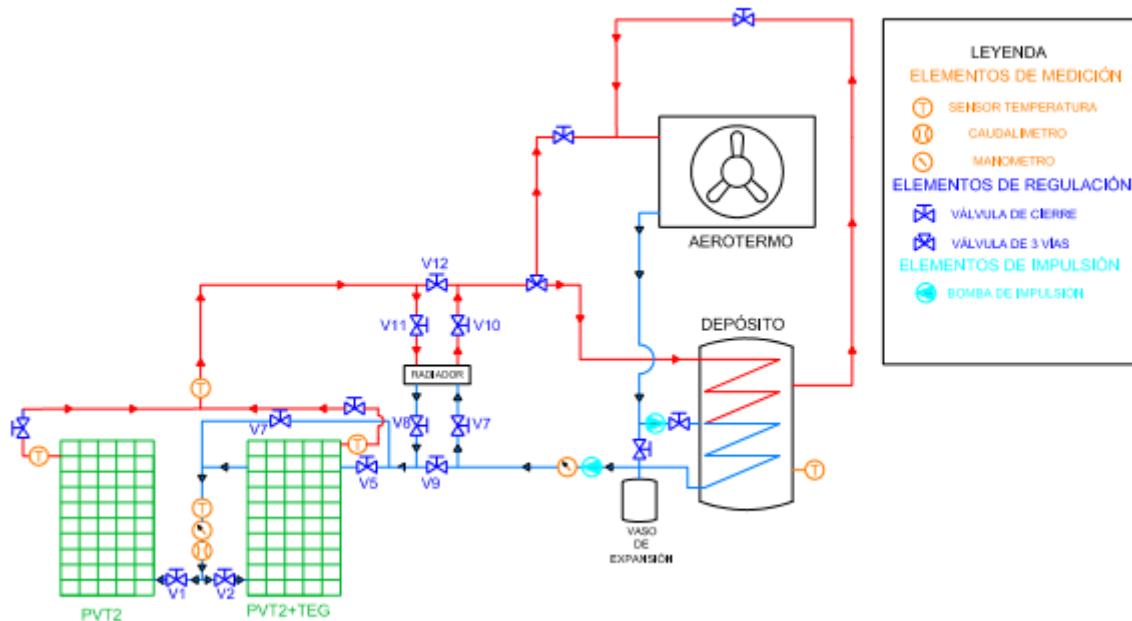


Figura 27: Esquema del sistema hidráulico.

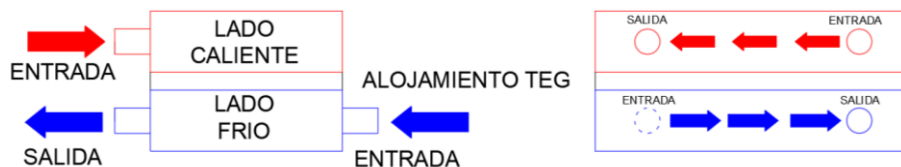


Figura 28: Esquema hidráulico del radiador.

El sistema hidráulico está compuesto de diversos elementos, que podemos diferenciar en:

GRUPO DE BOMBEO:

Para realizar el desplazamiento óptimo del fluido caloportador por el sistema hidráulico se necesita un sistema de bombas de impulsión.

El equipo general del grupo de bombeo cuenta con:

- **Bomba de circulación de caudal variable:** Utilizada con el objetivo de impulsar el fluido caloportador.
- **Manómetro:** Mide la presión del fluido caloportador.
- **Válvula de seguridad:** Colocada con el objetivo, de si fuera necesario, reducir la presión del fluido.
- **Llaves de llenado y vaciado:** Permite aumentar o reducir el nivel de agua que tiene la instalación.

- **Dos termómetros:** Miden la temperatura del fluido, en el punto frío y el punto caliente.
- **Centralita de control:** Nos permite ver desde una pantalla los valores de la temperatura en el punto caliente y el punto frío, la presión y el caudal.



Figura 29: Imagen del grupo de bombeo utilizado [21].

Deposito: Con capacidad de 197L, él que se aprecia en la figura 35, y se encarga de realizar la transferencia de calor con el circuito primario, el intercambio de calor se realiza mediante un serpentín que circula por su interior.

Aerotermino: En los casos en los que la temperatura del depósito se encuentra en valores máximos y la diferencia de temperaturas entre el depósito y el foco caliente no permita generar energía térmica, la bomba se encontrará parada por lo que la energía que reciben los paneles no será distribuida al circuito secundario. Esto hace que la temperatura de los paneles pueda llegar a ser muy elevada, afectando a la seguridad. Para ello existe el aerotermino, que permite eliminar el exceso de calor del fluido portador, pudiendo volver así a activar la bomba y volver a generar energía térmica.



Figura 30: Imagen del Aerotermino de la bancada.

Vaso de expansión: Asume las variaciones de volumen que soporta el fluido caloportador debido a las variaciones de temperatura y de presión.



Figura 31: Imagen del vaso de expansión.

Radiador: Incorporado para aprovechar la diferencia de temperaturas entre el foco frío y el caliente, generando potencia mediante los TEG.

EQUIPOS DE MEDIDA:

- **Caudalímetro:** Mide el caudal que circula en la instalación (litros/minuto).



Figura 32: Imagen del caudalímetro.

- **Sensor de presión:** Mide la presión del fluido que circula en la instalación.



Figura 33: Imagen del sensor de presión.

- **Sensores de temperatura:** Podemos encontrar 5 en total en la bancada. Dos de ellos, conectados a la centralita:
TSolar: Envía la temperatura de salida de ambos paneles a la centralita.
TDeposito: Envía la temperatura del depósito a la centralita. Tres de ellos, conectados al sistema de adquisición:
Tinlet: Temperatura de entrada a los paneles PVT.
Toutlet1: Temperatura de salida del primer panel.
Toutlet2: Temperatura de salida del segundo panel.

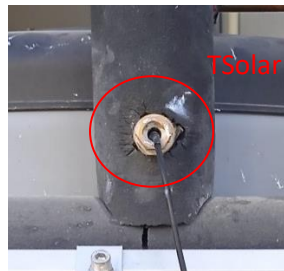


FIGURA 34: Imagen de la sonda TSolar.



FIGURA 35: Imagen de la sonda TDeposito.



FIGURA 36: Imagen de la sonda Tinlet.



FIGURA 37: Imagen de la sonda Toutlet1.

Piranómetro: Es el instrumento de medida encargado de medir la irradiancia que le llega a los paneles. Conocido como G y expresada en W/m^2 .

Este modelo, el Sensortyp B CS10, relaciona la señal de salida con la irradiancia mediante una ecuacion lineal $y=Cte \cdot x$, la cte para este modelo es de $1.80 \mu A$.

Por lo que la ecuación de salida de la señal queda:

$$y = 1.80x \tag{1}$$

Donde:

y es la señal de salida, medida en μA .

x es la irradiancia, medida en W/m^2 .



FIGURA 38: Imagen del Piranómetro.

Instalación

La célula debe ser instalada con el cable hacia abajo.

TIPO DE Sonda		[μA]
A	1	1.72
B	2	1.80
C	3	1.87
D	4	1.95
E	5	2.03
F	6	2.10
G	7	2.18
H	8	2.26
I	9	2.34
K	10	2.41

Ejemplo: Sonda tipo E.

A una radiación de $450 W/m^2$ corresponde una señal de salida de:

$$450 \cdot 2,03 \mu A = 913,5 \mu A = 0.9135 mA.$$

$$Y = Cte \cdot X$$

Cte = tipo de sonda



Modelo actual

Orientación de la célula

La orientación de la célula depende de la instalación en la cual debe actuar. En una instalación de Energía Solar, la célula debe tener la misma dirección e inclinación de los paneles.

FIGURA 39: Caracterización del piranómetro [23].

3.1.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Panel Fotovoltaico: Formado por un conjunto de células fotovoltaicas, conectadas entre si en serie o paralelo, con el objetivo de aumentar la potencia.

Inversor: La potencia generada por el panel solar es generada corriente continua (DC), para convertirla en corriente alterna y poder ser usada en viviendas se usa inversor para convertir a corriente alterna (AC). Además se encarga de regular la tensión y la frecuencia de la corriente alterna producida para que se ajuste a los requisitos específicos de la red eléctrica y optimizar el rendimiento del sistema fotovoltaico. Y busca el balance entre voltaje y corriente en el que los paneles solares operan a su máxima potencia.

En el caso de está instalación el inversor es un microinversor de APSystems, en concreto el modelo YC500I.



Figura 40: Microinversor modelo YC500I [24].

Datos de Entrada (DC)	
Rango de Voltaje MPPT	22V-45V
Rango de Voltaje de Operación	16V-52V
Voltaje Máxima de Entrada	55V
Voltaje de Inicio	22V
Corriente Máxima de Entrada	10.5A×2 12A×2
Datos de Salida (AC)	
Máxima Potencia de Salida Continua	450W 500W
Voltaje Nominal de Salida	127V 220V
Corriente Nominal de Salida	3.54A 2.27A
Rango de Voltaje de Salida por Defecto/Extendido	95V-155V* / 82V-155V 181V-264V* / 181V-298V
Frecuencia Nominal de Salida	60Hz
Rango de Frecuencia de Salida por Defecto/Extendido	57Hz-62Hz* / 55.1Hz-64.9Hz
Factor de Potencia	>0.99
Distorsión Total Armonica	<3%
Unidades Maximas por Circuito Derivado	4 / Interruptor 20A** 7 / Interruptor 20A** 5 / Interruptor 25A** 8 / Interruptor 25A**
Eficiencia	
Eficiencia Pico	95.5%
Consumo de Energía Nocturno	120mW
Datos Mecánicos	
Rango de Temperatura Ambiental	-40°C to +65°C (-40°F to +149°F)
Rango de Temperatura de Almacenamiento	-40°C to +85°C (-40°F to +185°F)
Dimensiones (A x L x P)	221mm x 167mm x 29mm (8.7" x 6.6" x 1.1")
Peso	2.5kg (5.5lbs)
Cable de CA	12AWG
Clasificación Ambiental de la Carcasa	NEMA 6
Enfriamiento	Convección Natural - Sin Ventiladores
Características & Conformidad	
Comunicación	Power Line Communication (PLC)
Monitoreo	Via EMA Software
Diseño de Transformador	Transformadores Alta Frecuencia, Separación Galvánica
Conformidad de Conexión a Red	NOM
Conformidad de Seguridad	NOM

Figura 41: Ficha técnica modelo YC500I [24].

Sistema de protección eléctrica: Cuenta con dos sistemas, uno para la parte de corriente continua y otro para la parte de corriente alterna.

- **Sistema de protección para corriente continua:** Serie de fusibles para proteger el sistema hasta la entrada del inversor.
- **Sistema de protección para corriente alterna:** Interruptor diferencial, para proteger de descargas eléctricas a la salida del inversor e interruptor magnetotérmico, para proteger de sobrecargas.

Además, para el funcionamiento de la bancada se precisa de conexión eléctrica. Por ello, en el cuadro eléctrico se ha habilitado una toma eléctrica para alimentar los componentes del cuadro eléctrico. También encontraremos otro conector en la centralita del sistema.

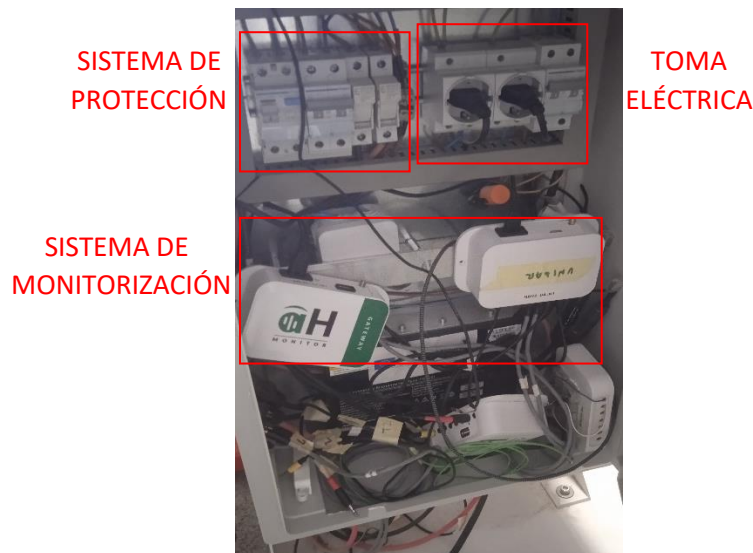


Figura 42: Cuadro eléctrico.

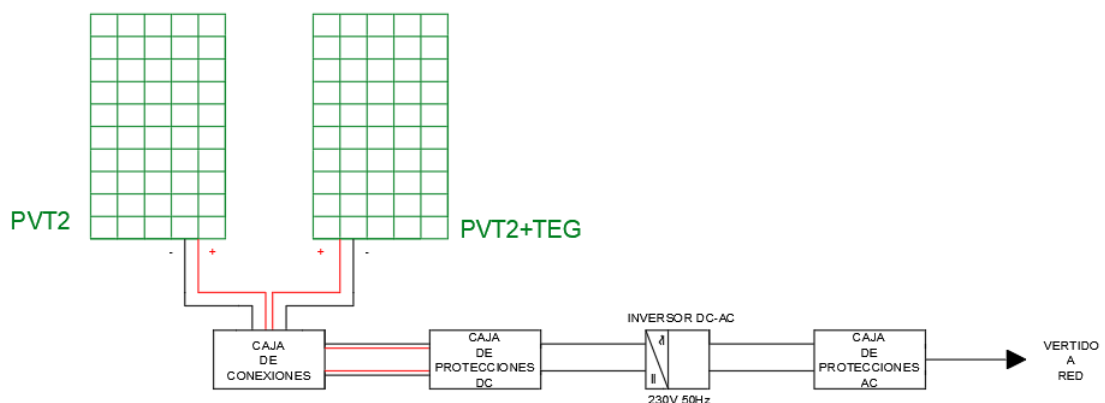


Figura 43: Esquema sistema eléctrico de la instalación.

3.2 FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN

3.2.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HIDRÁULICO

La configuración del circuito hidráulico y la presencia de multitud de llaves de paso nos permite operar en diferentes modos. Si el objetivo es trabajar en el modo de operación PVT+TEG, las válvulas V1 y V2 (Entrada a los paneles) y V5 y V6 deben permanecer abiertas. En cambio, si lo que queremos es operar en el modo PVT, para poder establecer una comparación de la producción con los TEG la llave V6 se debe cerrar.

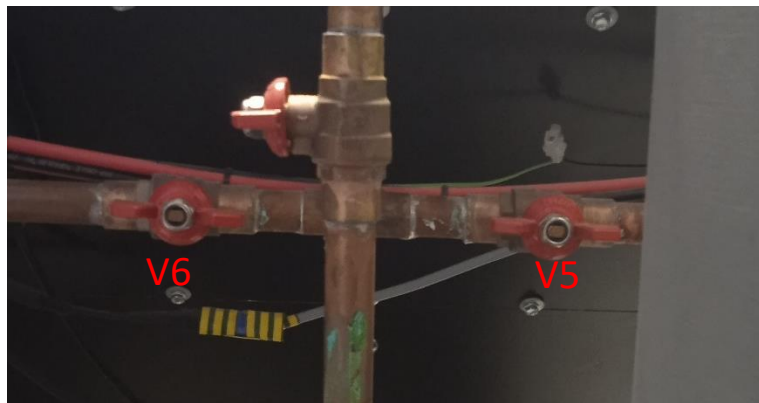


Figura 44: Imagen de las válvulas V6 y V5, ambas abiertas.

Por otra parte, también se puede regular la derivación al radiador TEG mediante las válvulas V7, V8, V10 y V11. Si cerramos V10 y V11 la derivación tras la salida de los paneles queda inoperativa. Si por otra parte cerramos V7 y V8, la derivación antes de la entrada a paneles queda cortada.

El funcionamiento de la bancada es dirigido por la centralita de control, como ya hemos dicho antes a la centralita se conectan dos sondas, TSolar y TDepósito, que miden la temperatura de salida del panel y la temperatura del depósito respectivamente. Si la diferencia de temperaturas es mayor de 7°C la centralita activará la bomba desencadenando la transferencia de calor, por el contrario, si la diferencia de temperatura baja hasta 4°C la bomba se parará.

También es importante conocer que, para asegurar el buen funcionamiento de los sensores, serán recubiertos con masa térmica, con el objetivo de mejorar su conductividad.

En cuanto a la medida de la producción de los TEG alojados en el radiador no se encuentra automatizada, por lo que se debe realizar manualmente con un polímetro.

3.2.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ELÉCTRICO

El panel permite la producción de electricidad cuando la bancada está conectada a la red. Sin embargo, como se ha comentado en el apartado 3.1.2 es necesario un microinversor en el sistema eléctrico. Esto es debido a que la producción que realiza el panel se encuentra en corriente continua, el microinversor la convierte en corriente alterna para adecuarla a la red.

El sistema de adquisición registra el voltaje e intensidad en el panel en DC, con lo que se puede estimar la producción.

3.3 NORMA DE APLICACIÓN

El ensayo debería seguir los protocolos marcados en la norma UNE-EN ISO 9806. Esta especifica los métodos de ensayo para evaluar la fiabilidad, durabilidad, rendimiento térmico y seguridad de un captador solar. Además de asegurar que el estudio parte del estado estacionario. Para ello el estudio debe realizarse con la instalación completamente al aire libre, pudiendo el aire recorrer sin dificultad toda la superficie del colector. La orientación del banco deberá ser azimutal y deberemos asegurarnos de que ninguna sombra se proyecte sobre el colector.

Parámetro	Variación Límite
<i>Irradiancia solar hemisférica (W/m^2)</i>	± 50
<i>Temperatura del aire ambiente (K)</i>	± 1.5
<i>Caudal másico del fluido (%)</i>	± 1.0
<i>Temperatura del fluido a la entrada del captador (K)</i>	± 0.1
<i>Temperatura del fluido a la salida del captador (K)</i>	± 0.4
<i>Velocidad del aire circundante (m/s)</i>	± 1.0

Tabla 1: Desviación permitida para parámetros medidos durante un periodo de medida según ISO 9806.

Se considera que un captador ha estado operando en condiciones de estado estacionario durante un periodo dado si ninguno de los parámetros experimentales se desvía de su valor medio por encima de los límites que figuran en la Tabla 1. El periodo de medida es al menos cuatro veces la constante de tiempo del captador (si se conoce), o no menos de 15 minutos.

Además, la presión debe ser constante, la velocidad del viento se considera apta si se encuentra entre 1 y 4 m/s y la irradiancia debe ser mayor a $700 W/m^2$.

Sin embargo, debido a la situación de la instalación, que no permite la toma de datos mediante el sistema de adquisición y que no presenta anemómetro, esta norma no puede ser aplicada durante el ensayo.

3.4 PUESTA EN MARCHA DE LA BANCADA

Para realizar la puesta en marcha de la bancada se deben tener en consideración los problemas que se han tenido en proyectos anteriores.

1. Estudio del sistema hidráulico y eléctrico:

Para ello se realizan visitas a la bancada con el fin de entender el funcionamiento general de la instalación, se plantean esquemas de los mismos y se analizan los elementos que componen los sistemas.

2. Identificación de sensores y el sistema de monitorización:

Se estudia cómo se recogen los datos clave de la instalación. Para ello se identifican los sensores y sondas, su funcionamiento y que función cumple cada uno.

3. Colocación de maseta térmica:

Tras conocer los sensores, se decide recubrirlos con maseta térmica para mejorar su conductividad y establecer datos más precisos.

4. Toma de datos:

Se procede a la toma de datos de la bancada.

Problemas en anteriores proyectos:

Uno de los principales problemas que se apreció es que se producía un sobrecalentamiento del depósito. La primera opción, vaciar el depósito, fue descartada debido al gasto que suponía. Otra opción fue la activación de la bomba del circuito primario durante toda la noche, sin embargo, la transferencia de calor era muy limitada, debido a la diferencia de volumen contenido en el serpentín del circuito primario con el depósito. La activación del aerotermo durante horas tampoco resulto efectiva pero no produjo resultados satisfactorios.

Finalmente, se realizó una modificación del circuito secundario incluyendo una bomba adicional (presente en el esquema de la **Figura 26**) haciendo circular el agua acumulada en el aerotermo de forma más efectiva.

Otro problema solucionado fácilmente, fue el comentado anteriormente sobre la conductividad de los sensores, que se solucionó con maseta térmica.

Problemas en el proyecto actual:

El principal problema presente es que el sistema de adquisición de datos no funciona, esto es un problema de grandes dimensiones pues limita enormemente la cantidad de datos que podemos tomar y que debería ser solucionado inminentemente si se quieren seguir realizando estudios.

Durante el avance de los ensayos también se observan fallos y complicaciones en el proceso de activación de la bomba de impulsión, acrecentándose estos conforme avanzan los ensayos.

Otro aspecto, y este de fácil solución sería la adquisición de una nueva junta que asegure la correcta unión entre al vaso de expansión y el conducto que lo uno con el grupo de control, para evitar el escape del agua.

También se aconseja la adquisición de un anemómetro, que permitiría registrar la velocidad del viento y aplicar la norma UNE-EN ISO 9806.

En cuanto a las limitaciones en las medidas son las siguientes:

Toutlet1 y Toutlet2: Si bien no las podemos conocer realmente, pues los sensores con los que se registran estas temperaturas van asociados al sistema de adquisición de datos, gracias a la centralita podemos conocer TSolar, lo que nos da una muy buena estimación de Toutlet1 y Toutlet2.

Tinlet: Es otra de las temperaturas, medida en el foco frío y que también va asociada al sistema de adquisición, esta se estimará con TDepósito.

Irradiancia: Esta es registrada por el piranómetro, que deriva la señal al cuadro del sistema de adquisición. Por el momento no se ha podido medir, pero se plantea un método que si se adquiriera un miliamperímetro podría ser medida. El método se basa en la relación entre la intensidad y irradiancia mediante la ecuación que se ha mostrado anteriormente en la descripción del piranómetro.

Caudal: Los valores que mostraba la centralita eran muy dispares en periodos muy cortos de tiempo. Por lo que se estima que hay algún tipo de problema en el registro del caudalímetro. También se aconseja que se tomen medidas de caudal a la entrada de cada panel, pudiendo así comparar si la entrada de caudal a cada panel es la misma.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Primero, se ha de hacer saber que el análisis podría ser mucho más amplio, sin embargo, se ve enormemente limitado por el estado en el que se encuentra la instalación, como se ha comentado anteriormente y se comenta en los anexos, el sistema de adquisición de datos no funciona, además de problemas posteriores que surgen con el avance de los ensayos lo que nos limita la toma de datos en diferentes rangos:

A partir de aquí se procede al análisis de resultados:

Las tablas y gráficas correspondientes a cada día de ensayo se encuentran en los Anexos, aquí se procederá a dar una visión general de ellos.

Se puede concluir que el aumento de la temperatura tanto en TSolar como en TDepósito sigue una tendencia lineal una vez que los picos de temperatura que se producen en el proceso de activación de la bomba cesan.

Tanto para TSolar como para TDepósito encontramos tendencias diferentes según el día de ensayo.

TSolar :

$$y = 164.32x - 49.612 \quad (2)$$

$$y = 107.7 - 10.973 \quad (3)$$

TDepósito:

$$y = 132.6x - 41.928 \quad (4)$$

$$y = 88.26x - 10.576 \quad (5)$$

Donde:

y es la temperatura, medida en °C

x es una equivalencia de la hora a la que se mide la temperatura, realizando una conversión de $x=0.00069$ por minuto.

Ejemplo: Para las 10:33h, son $10h*60min/h + 33min = 633$ min con la conversión, $633min*0.00069/min = 0.44$, por lo que el valor de x para las 10:33h sería 0.44.

Es importante decir que los datos utilizados para establecer las ecuaciones son escogidos una vez que el aumento de la temperatura comienza un proceso lineal, ya que debido a los problemas en la bomba de activación se producían al momento de activarse caídas y aumentos drásticos en la temperatura que modificarían la tendencia.

Se puede apreciar que en ambos días en los que la bomba permitió establecer una tendencia, la pendiente era mayor en ambos casos en la TSolar, esto tiene sentido pues el intercambio de calor entre el depósito y el serpentín es muy reducido debido a la diferencia de volumen entre ambos.

En cuanto a la generación de potencia, es variable según las condiciones climáticas, como se preveía. Concretamente es determinada por la irradiancia, la cual sin el sistema de adquisición no se ha podido medir. Sin embargo, sí que se podía ver fácilmente que cuando la intensidad solar que incidía sobre el panel disminuía, la potencia generada por los paneles caía bruscamente, siendo muy notable la caída en la corriente producida en el panel. Todo esto queda registrado en los respectivos anexos.

Como se puede apreciar en torno a las 10:55h hay una caída brusca de la intensidad, esto fue debido a la presencia de diversas nubes que impedían que la luz solar incidiera en el panel.

También cabe destacar, que pese a que según el fabricante la corriente máxima en el circuito es de 8.1A con la pinza amperimétrica se llegó a registrar un valor superior en dos ocasiones, ambas fueron el mismo día y en un tiempo muy cercano entre ellas. Siendo registrados 8.4A a las 11:25h y 8.2A a las 11:40h.

Por último y en cuanto a los TEG, aunque se quiso medir la potencia generada en el radiador, pues debería ser mayor que la que generan los TEG que están integrados en el PVT, ya que en el radiador la superficie de contacto entre los TEG y el foco frío y caliente es mayor. Sin embargo, el día que se quiso empezar a realizar las medidas, el 03/05/2023, la bomba de activación dejó de funcionar por problemas de la instalación, como se aprecia en el Anexo de ese mismo de ensayos (Anexo 2.4).

Sin embargo, sí que podemos hacer la comparación con los dos paneles, el que tiene integrados los TEG y el que no. Y como se muestra en las tablas de los anexos, la diferencia no es apreciable, siendo en ocasiones la potencia producida mayor en el PVT que tiene los TEG integrados, y en otras siendo mayor en el PVT que no los tiene. Y si bien en algunos casos si se puede apreciar mayor diferencia esto es debido a que al tener que realizar las medidas manualmente (descrito el procedimiento en los Anexos), había pequeñas diferencias de tiempo entre lo medido en el panel PVT1 y lo medido en el panel PVT2, qué aun siendo diferencias de tiempo de entorno a 1 minuto o menores, en los casos en los que la intensidad solar variaba rápidamente sí que se notaba

en el estudio. Todo esto queda registrado mediante tablas y gráficas en los respectivos anexos.

Por ello se plantean las siguientes hipótesis sobre los TEG para el caso concreto de esta instalación:

- El bajo rendimiento para los TEG a la hora de generar energía eléctrica mediante la diferencia de temperaturas limita en gran parte la potencia que podemos obtener.
- La diferencia de temperaturas entre el foco caliente y el foco frío que encontramos en esta instalación es demasiado baja como para generar una potencia que sea significativa respecto a la que genera el panel.
- La superficie de contacto entre los TEG y los focos no es la adecuada, si bien los que se encuentran en el radiador sí que solucionan este problema, los 21 TEG que se encuentran integrados en el panel no cuentan con el contacto entre focos adecuado, por lo que esto limita la potencia generada.

5. CONCLUSIONES

Tras el trabajo experimental que se ha realizado en la instalación perteneciente a la Universidad de Zaragoza, podemos concluir varias cosas. Una de las conclusiones principales que se extraen es que, si se quieren seguir realizando, cualquier tipo de prueba o experimentación es pertinente hacer una inspección exhaustiva de la instalación y solucionar todos los problemas mencionados en este trabajo, sobre todo y principalmente, solucionar el problema que no permite acceder al sistema de adquisición de datos, esto dificulta enormemente la toma de datos, además de tener que introducir otros equipos para la toma de medidas que pueden ocasionar imprecisiones en la medida. También se deben solucionar otros problemas de carácter primordial como los múltiples problemas en la bomba de activación o las fugas constantes en el vaso de expansión. Además de esto se recomienda una mejora integral de la instalación que incluya la adquisición de un anemómetro y caudalímetros que permitan la medida de caudal a cada panel, no solo el caudal total de la instalación.

También se concluye que, en cuanto a las temperaturas, hasta el problema con la bomba de activación, tienen el comportamiento esperado, siguiendo una tendencia lineal una vez la bomba empieza a trabajar correctamente. Se observa también que la potencia registrada de los paneles cumple con las expectativas esperadas otorgando valores que se corresponden generalmente con los del fabricante.

En lo referente a los TEG, se puede concluir que, pese a que tiene un campo de desarrollo interesante y con muchas posibilidades, actualmente no tiene sentido integrarlos en instalaciones como esta, pues el rendimiento en los módulos es bastante bajo y no se genera la diferencia de temperaturas necesaria para que suponga una mejora mínima a la potencia generada por los paneles, esto ocasiona que los costes superen a los beneficios.

Aunque las conclusiones no han sido satisfactorias, se recomienda evaluar en el desarrollo de esta tecnología en el futuro y estudiar si los avances tecnológicos pueden hacer que lo ensayado pueda ser aplicado con rentabilidad en un futuro.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Red Eléctrica Española*, <<Red Eléctrica: Generación,>> 28 04 2023 [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/datos/generacion>
- [2] AIE, <<Informe Anual 2017 de la Agencia Internacional de la Energía>>.
- [3] «ONU: Objetivos de Desarrollo Sostenible,» 28 04 2023. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [4] *Cristóbal Cortés*, *Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales de la Universidad de Zaragoza Asignatura: Energías Renovables <<Instalaciones solares de baja temperatura>>, 2021.*
- [5] <<Agencia Internacional de la Energía (AIE),>> 28 04 2023 [En línea]. Available: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/solar>.
- [6] *A. del Amo Sancho*, *Tesis Doctoral Universidad de Zaragoza EINA, «Estudio, modelado y simulación de paneles solares híbridos con cubierta transparente y asilante y validación experimental para su aplicación en sistemas de trigeneración; Tesis doctoral,» 2015.*
- [7] *Abora Solar*, «aH 60 Optimum: Ficha técnica,» 12 03 2023 [En línea] Available: <https://docs.gestionaweb.cat/1191/ft-ah72-optimum-1061371.pdf>.
- [8] *PvXchange/GTM Search*, <<Informe Anual Unef 2017>>.
- [9] Elaboración del Instituto de Energía Solar con datos de *C.Breyer and A.Gerlach.*, << Prog. in Phot.: Res. And App.>>, 21(1):121-136, 2013 y *Navigant Consulting*.
- [10] *Red Eléctrica Española*, <<Red Eléctrica: Estructura Generación,>> 28 04 2023 [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/datos/generacion/estructura-generacion>
- [11] *Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico*, <<Plan Nacional integrado de energía y clima 2021-2030>> , 2020.
- [12] *IRENA.*, <<El futuro de la energía solar fotovoltaica>>, 2019.
- [13] *International Renewable Energy Agency (Irena) y la Organización Mundial del Trabajo (OIT)*, «Energías Renovables y empleo: revisión anual 2022».
- [14] *Colaboradores de Wikipedia*, <<Wikipedia: Thermoelectric generator>>, 25 05 23 [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_generator#.

- [15] 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.
- [16] Jorge Castillo Fernández, Trabajo Fin de Grado Universidad de Zaragoza EINA <<Generadores termoeléctricos accionados por el calor humano para dispositivos portátiles. Estado del arte y modelado térmico sencillo>>,2017.
- [17] Colaboradores de Wikipedia <<Wikipedia: Radioisotope thermoelectric generator>>, 25 05 23 [En línea] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator
- [18] M^a Teresa Pintanel, Amaya Martínez Gracia, M^a Pilar Galindo, Ángel A. Bayod-Rújula, Javier Uche, Juan A. Tejero, Alejandro del Amo,<< Analysis of the Experimental Integration of Thermoelectric Generators in Photovoltaic–Thermal Hybrid Panels>>, *Appl. Sci.* 2021, 11(7), 2915.
- [19] Ángel A. Bayod-Rújula, Amaya Martínez Gracia, Alejandro del Amo, Marta Cañada, Sergio Usón, Javier Uche, Juan A. Tejero.,<<Integration of thermoelectric generators (TEG) in solar PVT panels>>, *Renewable Energy and Power Quality Journal* 17 (2019), 495-499.
- [20] María Pilar Galindo Alegre, Trabajo Fin de Grado Universidad de Zaragoza EINA <<Estudio preliminar de la integración de módulos termoeléctricos (TEG) en paneles solares híbridos>>,2020.
- [21] María Teresa Pintanel Raymundo, Trabajo Fin de Máster Universidad de Zaragoza EINA <<Estudio experimental de la integración de módulos termoeléctricos en paneles solares híbridos PVT.>>,2021.
- [22] Carlos Subías España, Trabajo Fin de Máster Universidad de Zaragoza EINA << Análisis del comportamiento y optimización de un panel solar híbrido con la integración de módulos termoeléctricos>>,2022.
- [23] Controlli Iberica, S.A, <<Hoja Técnica Sensotryp CS10>> 23 05 2023 [En línea] Available: https://megaindustrial.shop/server/Portal_0022990/img/pdf/cs10.pdf.
- [24] APSsystems, << Ficha Técnica Microinversor YC500I Apsystems>>, 25 05 2023 [En línea] Available: <https://www.energiaymovilidad.com/blog/wp-content/uploads/2018/05/APsystems-YC500-Datasheet-Spanish-170706.pdf> .