



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

ANEXOS

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

759534@unizar.es
csubias@unizar.es

Autor: Carlos Subías Espuña

Director: Juan Antonio Tejero Gómez

Fecha: Octubre 2022

Página intencionadamente en blanco.



INDICE DE CONTENIDO

1. ANEXO I: DESCRIPCIÓN DE LA BANCADA DE ENSAYOS	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. BANCADA DE ENSAYOS INICIAL Y FUNCIONAMIENTO	1
1.3. FUNCIONAMIENTO DE LA BANCADA	11
1.4. MODIFICACIÓN REALIZADA EN LA BANCADA	12
2. ANEXO II: ENSAYOS A LOS MÓDULOS TEG DE MANERA AISLADA.	15
2.1. INTRODUCCIÓN.	15
2.2. CONFIGURACIÓN ENSAYOS.	15
2.3. ENSAYOS A 1 TEG.	18
2.4. ENSAYOS A 2 TEG.	23
2.5. ENSAYOS A 6 TEG.	26
3. ANEXO III: ENSAYOS EN BANCADA: CONFIGURACIÓN ORIGINAL.	29
3.1. ENSAYOS DÍA 17/06	29
3.2. ENSAYOS DÍA 27/06.	34
3.3. ENSAYOS DÍA 28/06.	37
3.4. ENSAYOS DÍA 30/06.	41
3.5. ENSAYOS DÍA 01/07.	44
4. ANEXO IV: ENSAYOS EN BANCADA: NUEVA CONFIGURACIÓN.	48
4.1. ENSAYO 1.	48
4.2. ENSAYO 2.	52
4.3. ENSAYO 3.	53
4.4. ENSAYO 4.	57
4.5. ENSAYO 5.	58
4.6. ENSAYO 6	62
5. ANEXO V: CIRCUITO HIDRÁULICO.	65
5.1. CIRCUITO HIDRÁULICO INICIAL.	66
5.2. CIRCUITO HIDRÁULICO TRAS MODIFICACIÓN	67
6. ANEXO VI: SIMULACIONES EN TRNSYS	68



INDICES

6.1. SIMULACIÓN SISTEMA COLECTORES FOTOVOLTAICOS.	68
6.2. SIMULACIÓN SISTEMA COLECTORES TÉRMICOS.....	70
6.3. SIMULACIÓN SISTEMA COLECTORES PVT.	72
6.4. SIMULACIÓN SISTEMA COLECTORES PVT+TEG.	74
6.5. RESULTADOS.	75
7. BIBLIOGRAFÍA	77

INDICE DE ECUACIONES

1	51
2	57
3	62
4	64

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Potencia para cada resistencia conectada con un ΔT de 20°C.....	21
Tabla 2:Potencia para cada resistencia conectada con un ΔT de 25°C.....	21
Tabla 3: Potencia de 2 TEG para cada resistencia conectada con un ΔT de 25°C.....	24
Tabla 4: Potencias generadas según su posición.....	27
Tabla 5: Potencia de 6 TEG en serie.	28
Tabla 6: Variación de resistencia conectada y sus efectos en Ensayo 2 con la nueva configuración TEG.....	52
Tabla 7: Características de las disposiciones eléctricas.	58
Tabla 8: Resultados simulación Trnsys Solar Fotovoltaico.	75



Tabla 9: Resultados simulación Trnsys Solar Térmico.	75
Tabla 10: Resultados simulación Trnsys PVT	75
Tabla 11: Resultados simulación Trnsys PVT+TEG.	76
Tabla 12: Resultados simulación TEG Trnsys PVT+TEG.	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Rendimiento del panel solar híbrido [3].....	2
Figura 2: Esquema del panel [4].....	3
Figura 3: Esquema distintas capas del panel [5].	3
Figura 4: Bancada de ensayos de la Universidad de Zaragoza [2].	4
Figura 5: Imagen del TEG [2].....	4
Figura 6: Disposición de las tuberías [2].	5
Figura 7: Detalle de la instalación de los módulos TEG [1].	5
Figura 8: Vista general del interior del panel con la modificación realizada [1]... 6	6
Figura 9: Detalle apertura para módulos TEG [1].....	6
Figura 10: Tablas de datos en Ubidots [7].	7
Figura 11: Detalle del equipo de bombeo [1].....	7
Figura 12: Paneles + Acumulador [1].....	8
Figura 13: Detalle del aerotermo.	9
Figura 14: Detalle de caudalímetro, sondas de presión y temperatura [1]..... 9	9
Figura 15: Detalle de la situación de las sondas [1].	10
Figura 16: Detalle de situación de las sondas [1].	10
Figura 17: Detalle de protecciones y dispositivo de monitorización [1].....11	11
Figura 18: Detalle válvulas 5 y 6 [1].	11
Figura 19: Detalle válvulas 5 y 6 [1].	12
Figura 20: Esquema funcionamiento radiador TEG en bancada.13	13



INDICES

Figura 21: Detalle del funcionamiento del radiador TEG en bancada.....	13
Figura 22: Detalle del radiador con la entrada de agua de red.....	14
Figura 23: Depósito caliente junto con termo-resistencia y bomba hidráulica ..	16
Figura 24: a la izquierda, el interior del radiador; a la derecha, el exterior.....	16
Figura 25: Etapa de monitorización	17
Figura 26: Base de datos en el servidor web	17
Figura 27: Esquema general configuración ensayos.	18
Figura 28: Ensayo en vacío de 1 TEG.	18
Figura 29: Corriente durante el ensayo en carga de 1 TEG.....	19
Figura 30: Tensión durante el ensayo en carga de 1 TEG.....	19
Figura 31: Potencia durante el ensayo en carga de 1 TEG.....	20
Figura 32: Corriente durante el ensayo en cortocircuito.....	20
Figura 33: Potencia vs. Resistencia para un ΔT de 20ºC.....	21
Figura 34: Potencia vs. Resistencia para un ΔT de 25ºC.....	22
Figura 35: Potencia mientras se varía el apriete.	22
Figura 36: Potencia de 2 TEG variando presión/apriete.....	23
Figura 37: Potencia 2 TEG vs. Resistencia para un ΔT de 25ºC.....	24
Figura 38: Ensayo en cortocircuito de 2 TEG.	25
Figura 39: Ensayo en vacío (circuito abierto) de 2 TEG.....	25
Figura 40: Potencia de 6 TEG variando presión/apriete.....	26
Figura 41: Posición de cada TEG.	27
Figura 42: Potencias generadas según su posición.	27
Figura 43: Detalle de la concavidad en el radiador.	28
Figura 44: Evolución temperaturas del 17/06.	29
Figura 45: Potencia PV del 17/06.....	30
Figura 46: Potencia del TEG e Irradiancia del 17/06.	31
Figura 47: Potencia de TEG y Caudal del 17/06.	31
Figura 48: Potencia de TEG y diferencia de temperatura del 17/06.	32



Figura 49: Potencia de TEG frente a diferencia de temperatura del 17/06.	33
Figura 50: Temperaturas e Irradiancia del 27/06.	34
Figura 51: Potencias PV e Irradiancia del 27/06.	35
Figura 52: Potencia de TEG e Irradiancia del 27/06.	35
Figura 53: Potencia TEG y Caudal del 27/06.	36
Figura 54: Potencia TEG y diferencia de temperaturas del 27/06.	36
Figura 55: Temperaturas e Irradiancia del 28/06.	37
Figura 56: Potencias PV e Irradiancia del 28/06.	38
Figura 57: Potencia TEG e Irradiancia del 28/06.	38
Figura 58: Potencia TEG y Caudal del 28/06.	39
Figura 59: Potencia TEG y diferencia de temperaturas del 28/06.	39
Figura 60: Potencia TEG vs. Diferencia de Temperaturas del 28/06.	40
Figura 61: Temperaturas e Irradiancia del 30/06.	41
Figura 62: Potencia PV e Irradiancia del 30/06.	41
Figura 63: Potencia TEG e Irradiancia del 30/06.	42
Figura 64: Potencia TEG y Caudal del 30/06.	42
Figura 65: Potencia TEG y diferencia de temperaturas del 30/06.	43
Figura 66: Temperaturas e Irradiancia de 01/07.	44
Figura 67: Potencia PV e Irradiancia del 01/07.	44
Figura 68: Potencia TEG e Irradiancia del 01/07.	45
Figura 69: Potencia TEG y Caudal del 01/07.	45
Figura 70: Potencia de TEG y diferencia de temperaturas del 01/07.	46
Figura 71: Potencia de TEG vs. Diferencia de temperatura del 01/07.	47
Figura 72: Temperaturas e Irradiancia del Ensayo 1 con la nueva configuración TEG.	48
Figura 73: Potencias PV e Irradiancia del Ensayo 1 con la nueva configuración TEG.	49



Figura 74: Potencia TEG e Irradiancia del Ensayo 1 con la nueva configuración TEG.....	49
Figura 75: Potencia TEG y diferencia de temperatura del Ensayo 1 con la nueva configuración TEG.....	50
Figura 76: Potencia TEG y Caudal del Ensayo 1 con la nueva configuración TEG.....	50
Figura 77: Potencia vs diferencia de temperatura del Ensayo 1 con la nueva configuración TEG.....	51
Figura 78:Potencia TEG vs Resistencia en Ensayo 2 con la nueva configuración TEG.....	52
Figura 79: Variación de la diferencia de temperatura en el Ensayo 2 con la nueva configuración TEG.....	53
Figura 80: Temperaturas e Irradiancia del Ensayo 3 con la nueva configuración TEG.....	54
Figura 81: Potencias PV e Irradiancia del Ensayo 3 con la nueva configuración TEG.....	54
Figura 82: Potencia TEG e Irradiancia del Ensayo 3 con la nueva configuración TEG.....	55
Figura 83: Potencia TEG y diferencia de temperatura del Ensayo 3 con la nueva configuración TEG.....	55
Figura 84: Potencia TEG y Caudal del Ensayo 3 con la nueva configuración TEG.....	56
Figura 85: Potencia TEG vs. Diferencia de Temperaturas del Ensayo 3 con la nueva configuración TEG.....	56
Figura 86:Potencia TEG y Diferencia de Temperaturas del Ensayo 4 con la nueva configuración TEG.....	57
Figura 87: Detalle del aislamiento en el radiador.....	58
Figura 88: Detalle del aislamiento del radiador.....	59
Figura 89: Temperatura e Irradiancia del Ensayo 5 con la nueva configuración TEG.....	59



Figura 90: Potencias PV e Irradiancia del Ensayo 5 con la nueva configuración TEG.	60
Figura 91: Potencia TEG e Irradiancia del Ensayo 5 con la nueva configuración TEG.	60
Figura 92: Potencia TEG y Diferencia de Temperatura del Ensayo 5 con la nueva configuración TEG.	61
Figura 93: Potencia TEG y Caudal del Ensayo 5 con la nueva configuración TEG.	61
Figura 94: Potencia TEG vs. Diferencia de Temperatura del Ensayo 5 con la nueva configuración TEG.	62
Figura 95: Potencia TEG y Diferencia de Temperaturas del Ensayo 6 con la nueva configuración TEG.	63
Figura 96: Potencia TEG vs. Diferencia de Temperatura del Ensayo 6 con la nueva configuración TEG.	63
Figura 97: Circuito hidráulico inicial [20].	66
Figura 98: Circuito hidráulico tras la modificación.	67
Figura 99: Trnsys del sistema fotovoltaico.	69
Figura 100: Trnsys del sistema térmico	70
Figura 101: Detalle del Trnsys de sistema térmico.	71
Figura 102: Trnsys del sistema PVT.	72
Figura 103: Detalle parte eléctrica del Trnsys del sistema PVT.	73
Figura 104: Detalle parte térmica del Trnsys del sistema PVT.	73
Figura 105: Detalle del sistema PVT+TEG.	74



1. ANEXO I: DESCRIPCIÓN DE LA BANCADA DE ENSAYOS.

1.1. INTRODUCCIÓN.

En el siguiente anexo se procede a describir la bancada de ensayos presente en la universidad y que ya ha sido usada previamente en otros trabajos ([1] y [2]).

Además, se describirán las modificaciones realizadas en este trabajo, se detallarán los componentes y se precisa su control y monitorización.

1.2. BANCADA DE ENSAYOS INICIAL Y FUNCIONAMIENTO.

La bancada está compuesta por dos paneles híbridos (PVT¹) del fabricante Zaragozano Abora Solar, el aH60 [3]. Este panel cuenta con un área de apertura de 1'65 m², 260 Wp y 60 células fotovoltaicas. En cuanto a las características térmicas: un rendimiento óptico de 0'59, coeficientes de pérdidas a_1 y a_2 de 3'3 [W/m² K] y 0'018 [W/m² K²] respectivamente.

Para una vista más detallada de las características del aH60, se remite al lector a la Ficha Técnica [3].

¹ PVT: Photovoltaic-Thermal. Abreviación empleada en el sector para los paneles híbridos

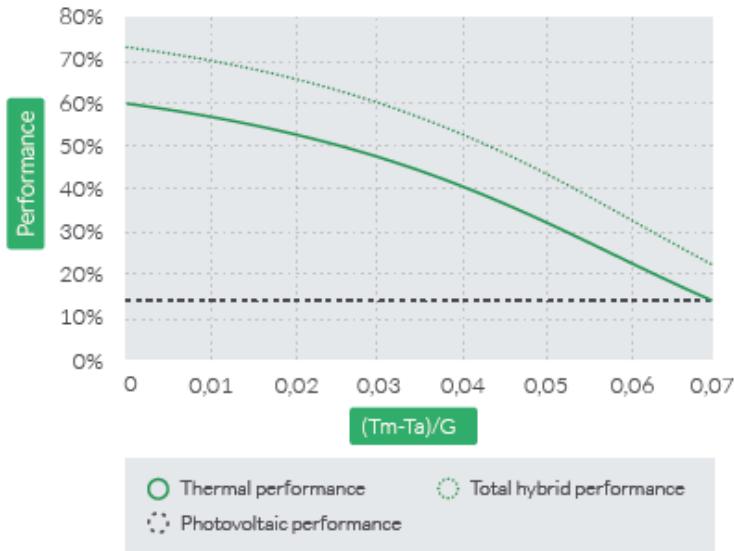


Figura 1: Rendimiento del panel solar híbrido [3].

El aH60 está compuesto por distintas capas: por la parte frontal cuanta con un primer vidrio seguido de una cámara de Argón que se cierra de nuevo con otro vidrio. El objetivo de esta cámara de Argón es reducir las pérdidas por convección, en virtud de su reducida conductividad térmica, y así servir como aislamiento por la parte frontal del panel. Además, estos vidrios cuentan con tratamientos que permiten una mayor captación de energía.

Tras esto, se encuentra las células fotovoltaicas encapsuladas entre dos capas de EVA², y posteriormente se encuentra el absorbedor o recuperador, compuesto por chapas rectangulares de aluminio soldadas sobre los tubos de cobre por los que circula el agua.

Por último, posterior al recuperador existe una capa aislante para evitar pérdidas y todo se cierra con una carcasa.

² EVA: Etil Vinil Acetato.

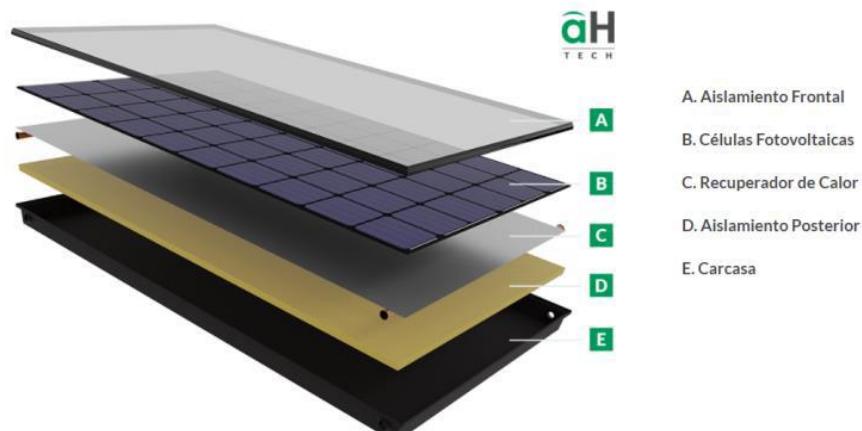


Figura 2: Esquema del panel [4].

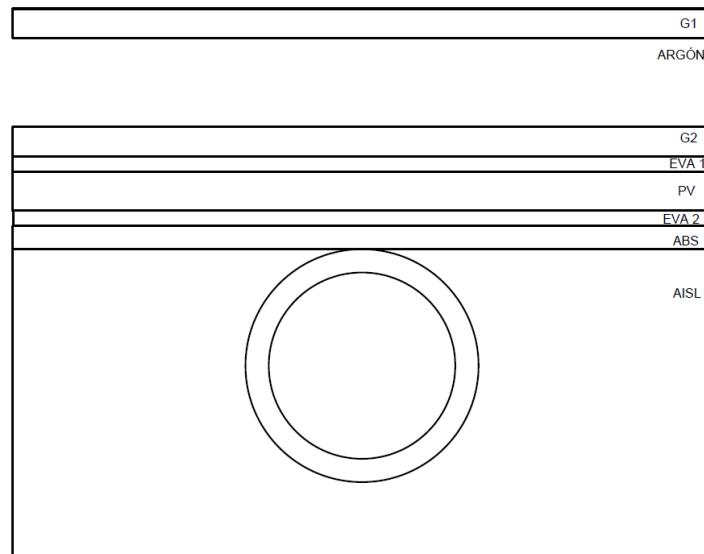


Figura 3: Esquema distintas capas del panel [5].

Estos paneles PVT, los aH60, fueron adquiridos y montados en una bancada de ensayos para la Universidad de Zaragoza (Figura 4).



Figura 4: Bancada de ensayos de la Universidad de Zaragoza [2].

Los generadores termoeléctricos que se escogieron para ser implementados fueron los TEG2-07025HT-SS, del fabricante TEC-Solidstate Power Generation [6]. Este fue el modelo que más se adecuaba debido a su baja temperatura de trabajo.



Figura 5: Imagen del TEG [2].

A la hora de incorporar la tecnología TEG en el panel PVT, se escogieron los dos focos de temperatura: la entrada de agua al panel como foco frío y la salida de agua del panel como foco caliente. Como estas tuberías se encuentran distanciadas, se debe crear una modificación en la disposición de las tuberías y la tubería de entrada de agua fría se va a derivar, haciéndola pasar al lado de la de agua caliente de salida. De esta manera, el agua fría, antes de entrar en el panel, actúa como foco frío en los TEG, y una vez ha pasado por el panel y se ha calentado, actúa como foco caliente.

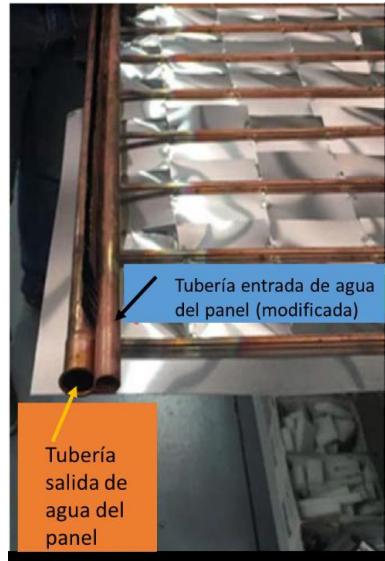


Figura 6: Disposición de las tuberías [2].

Para una buena transferencia de calor de la tubería al TEG, en el tubo de agua caliente se dispusieron unas aletas de cobre sobre los propios tubos, sobre las cuales irán los módulos, que serán sujetados con grapas.



Figura 7: Detalle de la instalación de los módulos TEG [1].

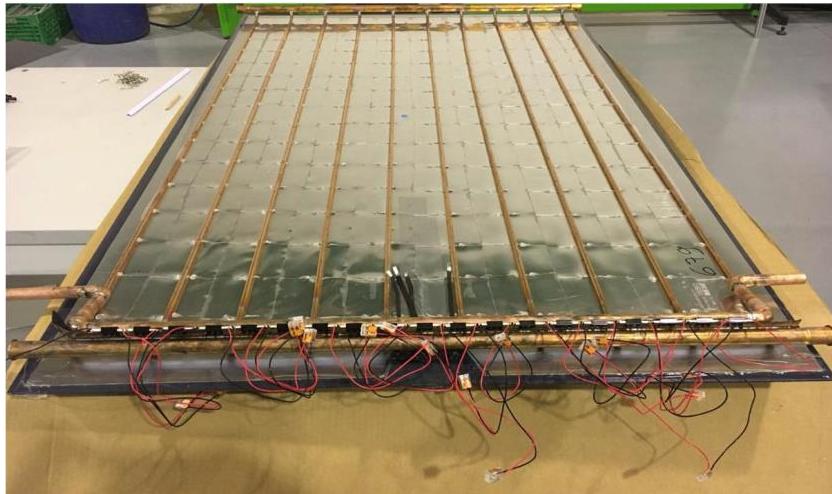


Figura 8: Vista general del interior del panel con la modificación realizada [1].

En esa disposición fueron implementados 19 módulos conectados eléctricamente en serie. Posteriormente se añadió el aislante y se cerró todo con la carcasa. En esta se practicó una apertura para poder acceder a los módulos de ser necesario.



Figura 9: Detalle apertura para módulos TEG [1].

Ambos paneles, el modificado y el que está sin modificar pueden funcionar de manera simultánea. De esta manera se puede apreciar las diferencias de funcionamiento en las mismas condiciones de trabajo.

La bancada cuenta con unas ruedas que permiten moverla y orientarla. Dispone de una estructura metálica que no permite orientarla a 35º, 40º o 45º.

Anexo I: Descripción de la bancada de ensayos.

Existe un sistema de monitorización que permite recopilar datos meteorológicos como la irradiancia y temperatura ambiente, junto con los datos del panel PVT, como temperaturas de entrada y salida de agua, caudal, presión, datos del fotovoltaico... Estos datos son subidos a un servidor y se pueden consultar en el portal web Ubidots [7].

Values Table										IRR LAST VA
FECHA	T_INLET LAST VALUE	T_OUTLET_1 LAST VALUE	T_OUTLET_2 LAST VALUE	PRESSURE LAST VALUE	FLOW LAST VALUE	DC1 LAST VALUE	DC2 LAST VALUE	V1 LAST VALUE	V2 LAST VALUE	IRR LAST VA
05/28/2020 13:39	43.00	63.31	59.06	1.46	0.00	6.71	6.41	25.20	24.79	0
05/28/2020 13:37	44.00	60.38	56.38	1.46	0.00	6.72	6.39	25.17	24.78	0
05/28/2020 13:36	45.50	57.44	55.25	1.47	1.76	6.76	6.41	25.36	25.02	0
05/28/2020 13:35	46.00	54.94	54.69	1.47	1.76	6.82	6.19	25.34	25.27	0
05/28/2020 13:34	46.19	54.06	54.50	1.46	1.76	6.77	6.28	25.62	25.29	0
05/28/2020 13:33	43.13	52.13	54.94	1.45	3.85	6.77	6.40	25.45	25.34	0

Figura 10: Tablas de datos en Ubidots [7].

En cuanto a la monitorización de los módulos TEG, esta anteriormente se realizaba *in-situ*, mediante el uso de un polímetro. Posteriormente, Abora Solar proporcionó una solución para monitorizar la producción de los módulos mediante un ordenador con el portal MobaXTerm y una conexión serial.

Al tratarse de un circuito por el que circula un fluido, se necesitan de más componentes hidráulicos, como el grupo de bombeo. Este se ha incorporado dentro de un equipo compacto que incluye una bomba de circulación de caudal variable, válvula de seguridad, manómetros, llave de llenado y vaciado y dos termómetros que se emplearán para el control por histéresis.



Figura 11: Detalle del equipo de bombeo [1].



La energía captada por los paneles PVT es transferida al circuito primario, y desde este se transfiere al circuito secundario gracias a un intercambiador de tipo serpentín situado dentro del propio acumulador o depósito. Se trata de un depósito de 197 litros.



Figura 12: Paneles + Acumulador [1].

La bancada cuenta con un sistema de control por histéresis que activa la bomba cuando se establece una diferencia de temperatura de 5°C entre la entrada de agua a paneles y la salida de paneles. Además, la bancada cuenta con sistemas de protección como depósito de expansión y aerotermo. Cuando el control de la bancada detecta que las condiciones de trabajo pueden ser perjudiciales para la bancada (si se alcanzan alrededor de 150°C) deriva la salida de los paneles hacia el aerotermo para disipar este exceso de energía.

Además, el aerotermo cumple una doble función. Al tratarse de una instalación experimental, no tiene un consumo, por lo que el agua se calienta y se almacena en el depósito, pero no tiene salida. Esto provoca que el agua que entra a paneles y que debería servir como foco frío, no sea tan frío como debería realmente y de este modo falseamos la medida. Es por ello por lo que se decidió derivar una salida del depósito hacia el aerotermo para poder reducir la temperatura y simular de tal manera una instalación real. Para consultar el circuito hidráulico, se remite al lector al Anexo V.



Figura 13: Detalle del aerotermo.

Los equipos de medida que incorpora la instalación para su monitorización y control son:

- Caudalímetro.
- Sensor de presión.
- Sondas de temperaturas: existen 2 para el control (T^a de salida de paneles Tsolar y T^a de entrada a paneles Tdepósito) y 3 para la monitorización (T^a de entrada a paneles Tinlet, T^a salida panel 1 Toutlet1 y T^a salida panel 2 Toutlet2).

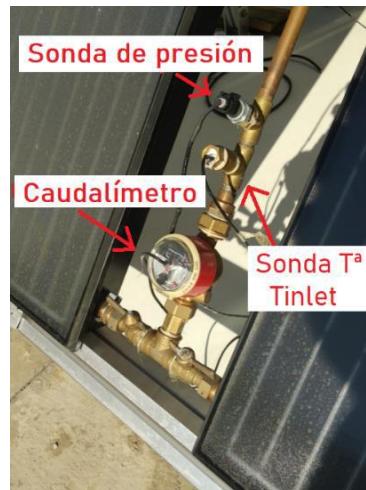


Figura 14: Detalle de caudalímetro, sondas de presión y temperatura [1].



Figura 15: Detalle de la situación de las sondas [1].



Figura 16: Detalle de situación de las sondas [1].

En cuanto a los componentes eléctricos de la parte fotovoltaica, tenemos microinversor y protecciones. El microinversor es un modelo YC500I de APSystems. Cuenta con dos sistemas MPPT³, uno para cada panel. En cuanto a las protecciones, se cuenta con fusibles, interruptor diferencial e interruptor magnetotérmico.

³ MPPT: Maximum Power Point Tracker. Seguidor de Punto de Máxima Potencia.



Figura 17: Detalle de protecciones y dispositivo de monitorización [1].

1.3. FUNCIONAMIENTO DE LA BANCADA

Si se desea que la bancada trabaje solo en su variante PVT, se debe tener las válvulas de entradas a paneles, V1 y V2 abiertas (se puede individualizar el panel que se quiere tener en funcionamiento). Por otro lado, a la salida, se deben tener abierta la válvula 5 y la válvula 6 debe estar cerrada, como en la imagen.

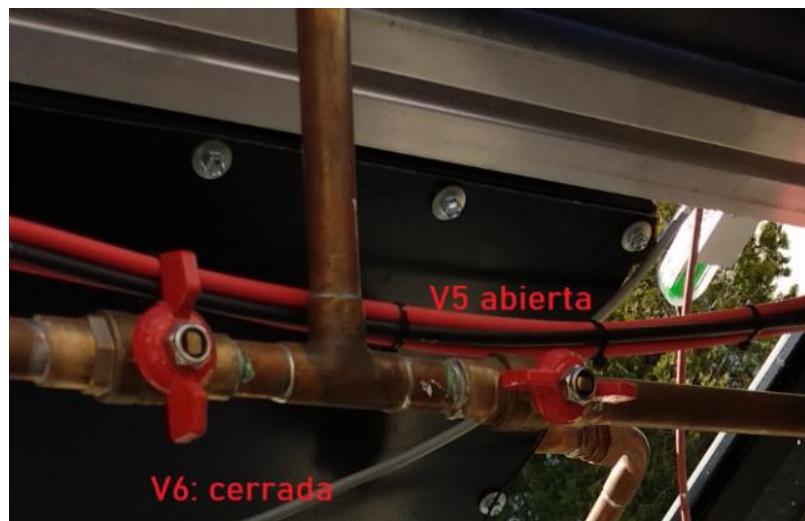


Figura 18: Detalle válvulas 5 y 6 [1].

Si se desea operar la bancada en su modo PVT+TEG, las válvulas de corte 5 y 6 deben estar abiertas al paso del fluido.



Figura 19: Detalle válvulas 5 y 6 [1].

1.4. MODIFICACIÓN REALIZADA EN LA BANCADA

A la vista de algunos de los resultados obtenidos anteriormente, de los artículos consultados en la bibliografía y de los ensayos aislados a los TEG realizados en el Anexo II, se propuso a Abora Solar la implementación de un radiador externo al panel en el cual se alberguen los TEG y se recircule el agua hacia este.

Abora Solar recogió el radiador en cuestión para ensayarlo con presión y realizar modificaciones que ayuden a aguantar dicha presión. Tras realizar pruebas, Abora modificó la placa de aluminio, aumentando su grosor para evitar la concavidad que aparecía en el radiador, como se puede ver en la Figura 43 del Anexo II. Además, reforzó las juntas con un material más adecuado para ello, un formador de juntas mecánico.

Tras comprobar su funcionamiento, la empresa acudió a la Universidad de Zaragoza para realizar la instalación en la bancada original. El nuevo esquema hidráulico de la bancada se puede consultar en el Anexo V. En la Figura 20 se puede apreciar un esquema de su funcionamiento.

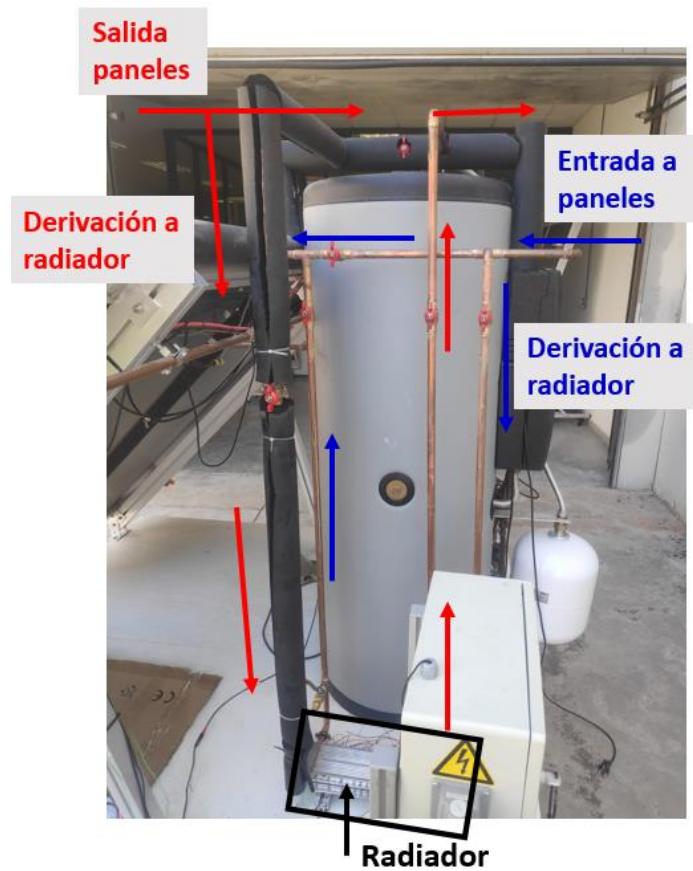


Figura 20: Esquema funcionamiento radiador TEG en bancada.

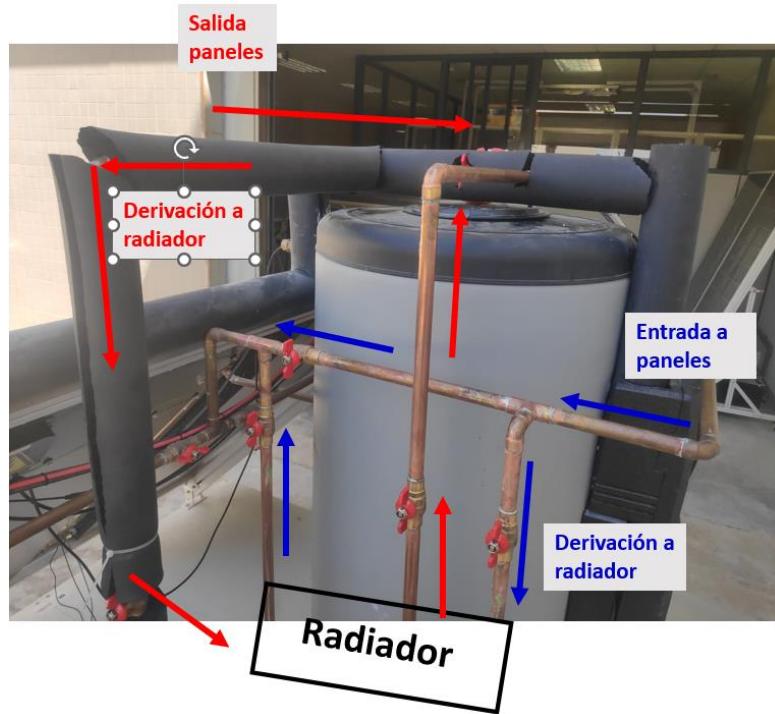


Figura 21: Detalle del funcionamiento del radiador TEG en bancada.



Además, Abora, al realizar la instalación, planteó y ejecutó la posibilidad de tener entradas de agua de red. De esta manera se puede simular el sistema con un foco frío similar al que existiría en una instalación real, pues en la bancada actual no existe consumo de ACS, y por lo tanto no disminuye la temperatura de fondo de depósito.



Figura 22: Detalle del radiador con la entrada de agua de red.



2. ANEXO II: ENSAYOS A LOS MÓDULOS TEG DE MANERA AISLADA.

2.1. INTRODUCCIÓN.

Unos de los primeros ensayos realizados a los módulos TEG fueron orientados a caracterizar el comportamiento de una manera más controlada. Los objetivos son poder realizar ensayos en cortocircuito, circuito abierto y en carga, variando el número de TEG's, variado la temperatura, el apriete del radiador y la configuración eléctrica.

En vez de probar directamente los módulos junto con el radiador en la bancada de paneles PVT, se crea un sistema en el que el radiador junto con los módulos TEG se incorpora en un circuito con un depósito de agua caliente y uno de agua fría. El depósito de agua caliente cuenta con una termo-resistencia la cual permite controlar la temperatura de este. Por otro lado, el depósito de agua fría consiste en un depósito intermedio por el cual circula agua de red. Dicho depósito no es realmente necesario, pero se necesita un punto donde poder medir temperaturas. Los módulos TEG son colocados entre los radiadores y su producción es monitorizada con una etapa de microcontroladores programada en Arduino.

En este anexo, se explican de forma detallada la configuración de estos ensayos y se muestran y comentan los resultados obtenidos.

2.2. CONFIGURACIÓN ENSAYOS.

El depósito de agua fría, como ya hemos comentado simplemente existe para poder monitorizar la temperatura de agua de red. En el circuito frío no es necesario instalar ninguna bomba, pues es la propia presión de la red la que vence la pérdida de carga del radiador y que hace circular el agua. Esta agua, una vez ha circulado por el radiador y por el depósito intermedio, es vertida a desagüe.

Por otro lado tenemos el circuito de agua caliente. Este consiste en un depósito junto con una termo-resistencia que permite modificar la temperatura del agua. Dicha termo-resistencia es accionada por un autotrafo eléctrico que nos permite modificar la potencia entregada a esta, de manera que podemos regular el flujo de calor entregado al agua y, de esa manera, la temperatura. Esta agua caliente va a circular hacia el radiador gracias a la acción de una bomba, la cual es alimentada eléctricamente con una fuente de tensión a 12 V.



Figura 23: Depósito caliente junto con termo-resistencia y bomba hidráulica .

Ambos circuitos de agua confluyen en el radiador que alberga los módulos TEG. Estos radiadores [8] están diseñados para crear un flujo turbulento y de tal manera proporcionar un buen coeficiente de intercambio de calor entre el agua y la placa del propio radiador. Esto se consigue mediante el diseño del interior del radiador, que crea dicho flujo turbulento y dirige el agua contra la superficie de intercambio.

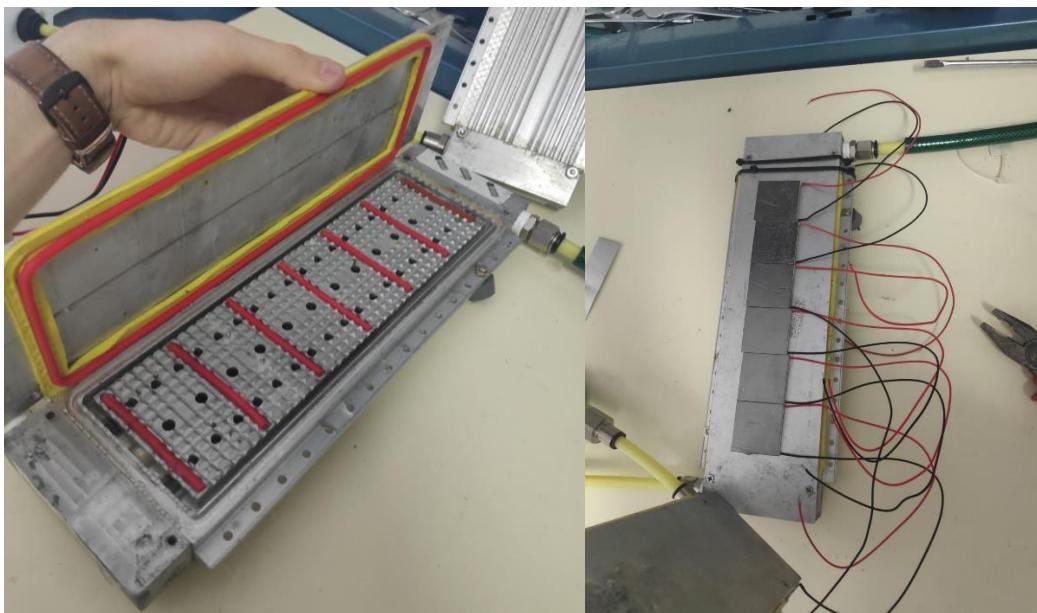


Figura 24: a la izquierda, el interior del radiador; a la derecha, el exterior.

Es entre estos dos radiadores que conducen agua fría/caliente entre los cuales se van a situar los módulos TEG. Se trata de los módulos TEG2-07025HT [6]. Aunque en la imagen se aprecien 6 módulos, el número va a ir variando en los distintos ensayos, de igual manera que la tipología de conexión.

La producción eléctrica que se genere va a ser monitorizada por una etapa digital programada en Arduino y constituida por un sensor LEM, un conversor analógico-digital, dos sondas de temperatura sumergibles, y un microcontrolador que recoge los datos y los sube y almacena en un servidor [7].

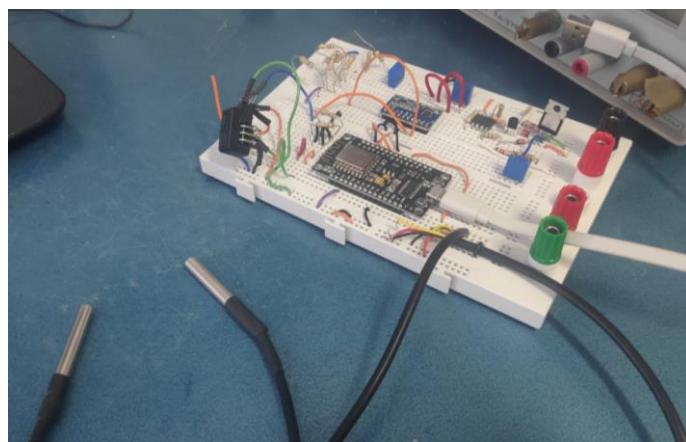


Figura 25: Etapa de monitorización .

Los datos son mandados al servidor cada 10 segundos y mostrados en tablas aptas para descargar y tratar.

phpMyAdmin

Reciente Favoritos

- Nueva
- baseados
- baseados1
- information_schema
- mysql
- nodemcu
- performance_schema
- phpmyadmin
- projeto1
- userlistdb

Examinar Estructura SQL Buscar Insertar Exportar Importar Privilegios Operaciones

Mostrando filas 0 - 24 (total de 8224. La consulta tardó 0.1274 segundos.) [fecha: 2022-06-20 12:49:43 - 2022-06-20 12:45:58]

```
SELECT * FROM `tablateg` ORDER BY `fecha` DESC
```

Perfiliendo [E]

Número de filas: 25 Filtrar filas Buscar en esta tabla

Ordenar según la clave: Ninguna

+ Opciones

	id	fecha	v1	valor1	valor2	valor3	valor4	valor5	valor6	valor7	valor8
<input type="checkbox"/>	8224	2022-06-20 12:49:43	4.68	0.00	28.56	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63
<input type="checkbox"/>	8223	2022-06-20 12:49:33	5.84	0.00	28.56	49.56	49.56	49.56	49.56	49.56	49.56
<input type="checkbox"/>	8222	2022-06-20 12:49:24	5.72	0.00	28.56	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63
<input type="checkbox"/>	8221	2022-06-20 12:49:14	6.01	0.00	28.56	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63
<input type="checkbox"/>	8220	2022-06-20 12:49:05	6.49	0.00	28.56	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63
<input type="checkbox"/>	8219	2022-06-20 12:48:56	5.72	0.00	28.56	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63
<input type="checkbox"/>	8218	2022-06-20 12:48:46	4.58	0.00	28.56	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63
<input type="checkbox"/>	8217	2022-06-20 12:48:37	4.87	0.00	28.56	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63
<input type="checkbox"/>	8216	2022-06-20 12:48:28	4.07	0.00	28.56	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63
<input type="checkbox"/>	8215	2022-06-20 12:48:18	4.61	0.00	28.56	49.56	49.56	49.56	49.56	49.56	49.56
<input type="checkbox"/>	8214	2022-06-20 12:48:09	4.61	0.00	28.56	49.56	49.56	49.56	49.56	49.56	49.56
<input type="checkbox"/>	8213	2022-06-20 12:47:59	4.50	0.00	28.56	49.56	49.56	49.56	49.56	49.56	49.56
<input type="checkbox"/>	8212	2022-06-20 12:47:50	4.48	0.00	28.56	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63
<input type="checkbox"/>	8211	2022-06-20 12:47:41	24.70	-0.01	28.56	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63	49.63

Figura 26: Base de datos en el servidor web .

Antes de pasar a mostrar los resultados, se muestra a continuación un esquema general de la instalación, para dar una vista de conjunto al lector.

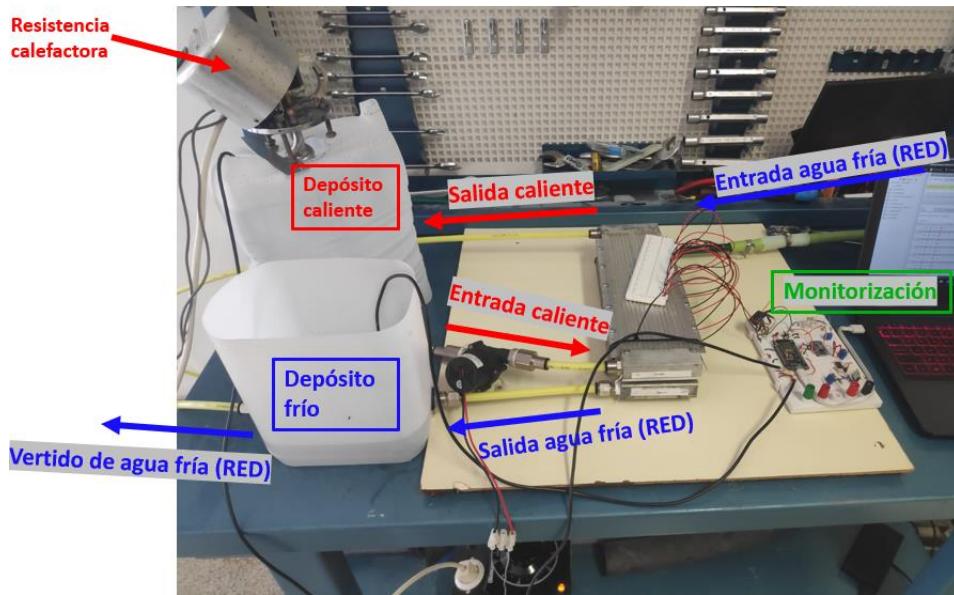


Figura 27: Esquema general configuración ensayos.

2.3. ENSAYOS A 1 TEG.

Los primeros ensayos se realizan con únicamente 1 TEG en el interior del radiador. La primera experiencia consiste en **un ensayo en vacío** (circuito abierto). Los resultados se muestran en la Figura 28.

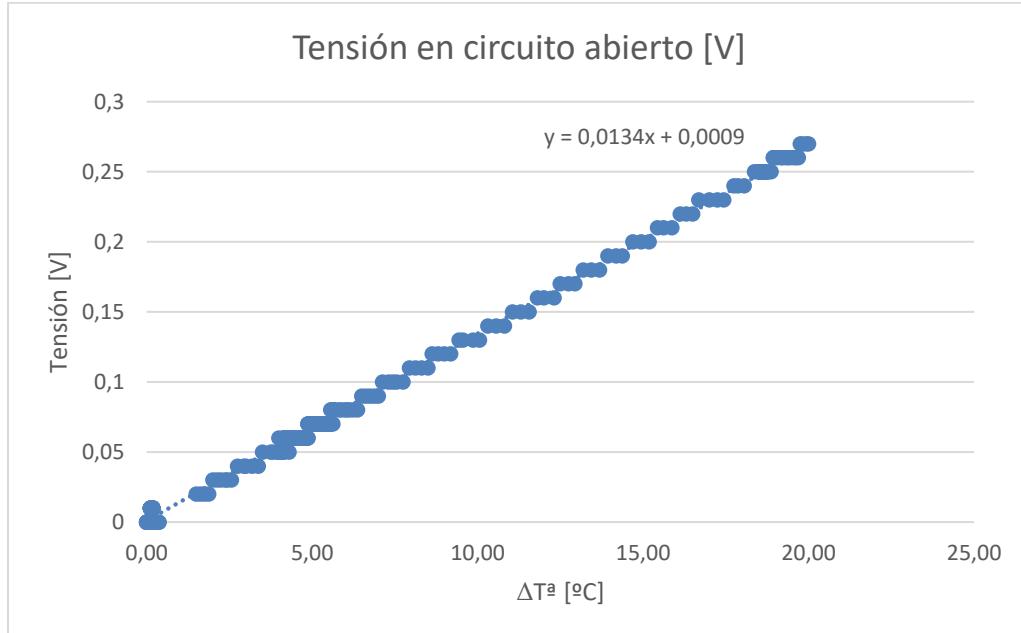


Figura 28: Ensayo en vacío de 1 TEG.

Como cabía esperar, la tensión aumenta linealmente con la temperatura. La corriente en todo momento es nula, pues se trata de un circuito abierto.

Tras este, se realiza un **ensayo en carga**, con una resistencia de 10 ohmios. Se muestran a continuación los resultados.

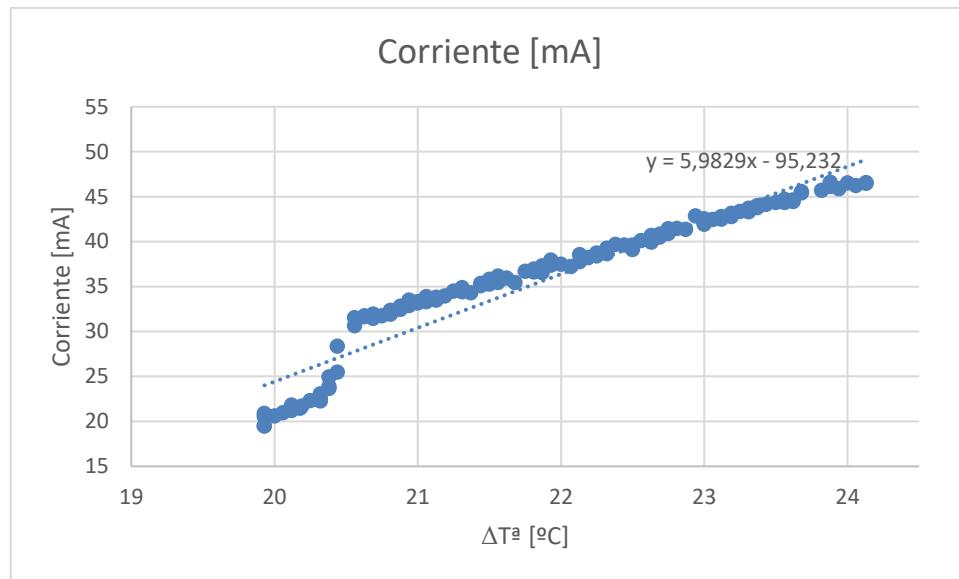


Figura 29: Corriente durante el ensayo en carga de 1 TEG.

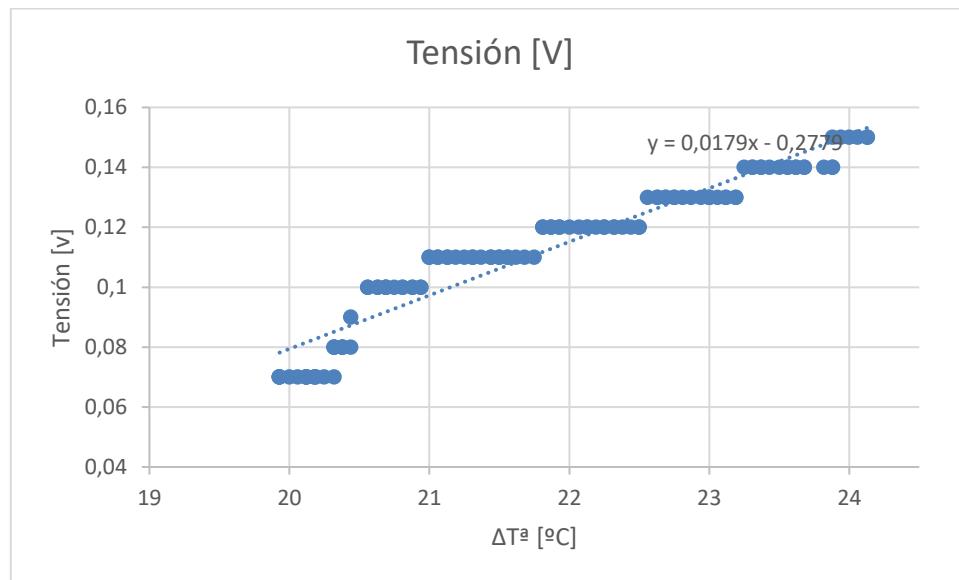


Figura 30: Tensión durante el ensayo en carga de 1 TEG.

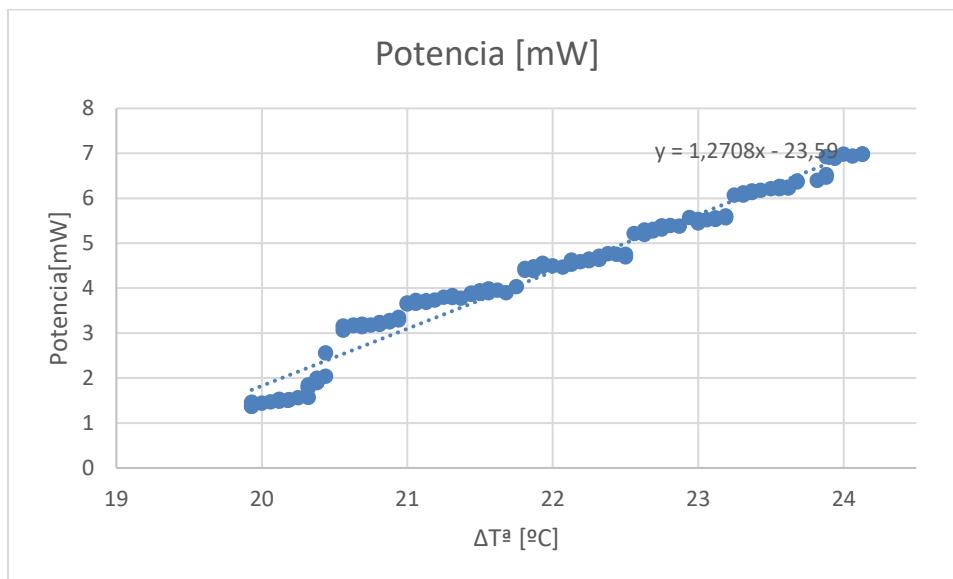


Figura 31: Potencia durante el ensayo en carga de 1 TEG.

Si apreciamos las figuras anteriores, podemos apreciar quizás un comportamiento no lineal con diferencias de temperaturas bajas (20-21°C). Esto bien puede deberse a errores de medición o puede deberse al hecho de que la eficiencia de transformación de los TEG no es lineal, como propone [9].

Se realiza en esta misma disposición un **ensayo en circuito cerrado o cortocircuito**. Se muestran los resultados a continuación.

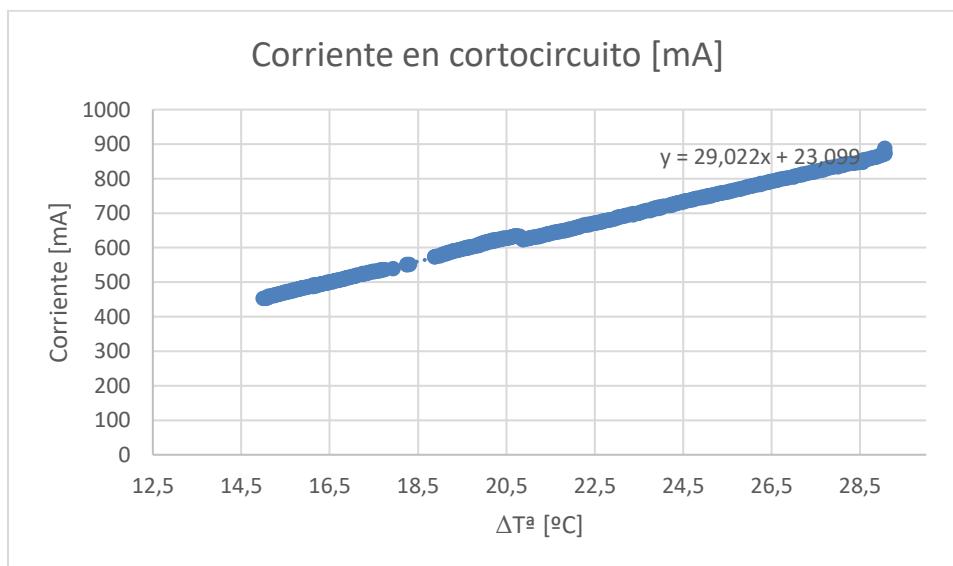


Figura 32: Corriente durante el ensayo en cortocircuito.

Posteriormente, se realiza un ensayo en el cual se varía la resistencia conectada al TEG que se encuentra entre los radiadores. De esta manera, el autor busca encontrar cual es el **punto de máxima potencia**. Para



ello, el *modus-operandi* consiste en buscar un $\Delta T(^{\circ}C)$ estable (dentro de nuestras capacidades) y entonces realizar las modificaciones pertinentes. Primeramente se busca un ΔT de $20^{\circ}C$.

Resistencia [Ω]	Potencia[mW]
5,60	9,81
1,00	33,04
0,84	33,47
0,50	37,08
0,33	36,80
0,10	30,42

Tabla 1: Potencia para cada resistencia conectada con un ΔT de $20^{\circ}C$.

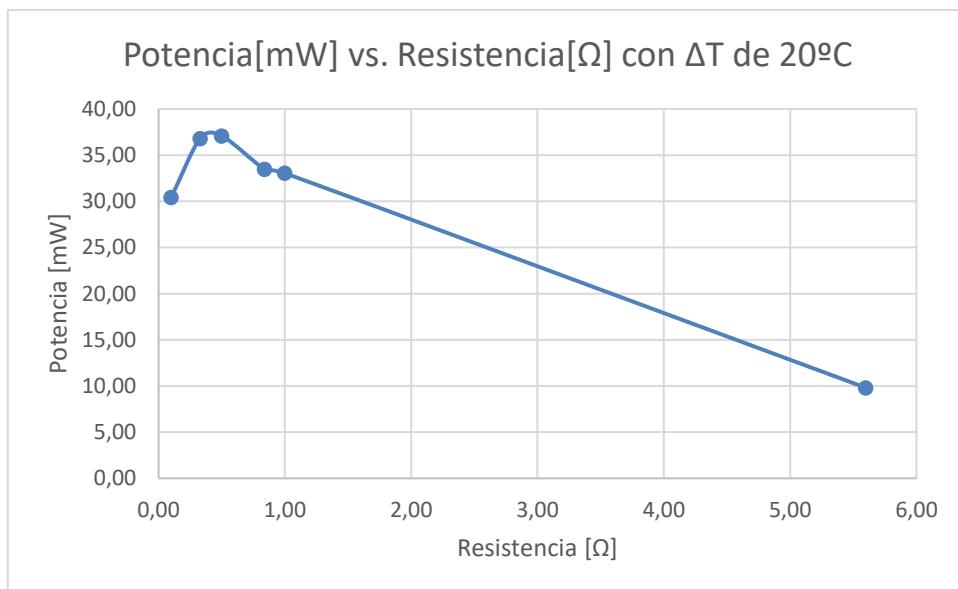


Figura 33: Potencia vs. Resistencia para un ΔT de $20^{\circ}C$.

Tras esto, se procede a **aumentar la temperatura hasta alcanzar un ΔT de $25^{\circ}C$ y se repiten las pruebas** para buscar el punto de máxima potencia o MPP⁴.

R[Ω]	Potencia[mW]
0,84	53,04
0,5	60,16
0,33	58,46

Tabla 2: Potencia para cada resistencia conectada con un ΔT de $25^{\circ}C$.

⁴ MPP: Maximum power point. Punto de máxima potencia.

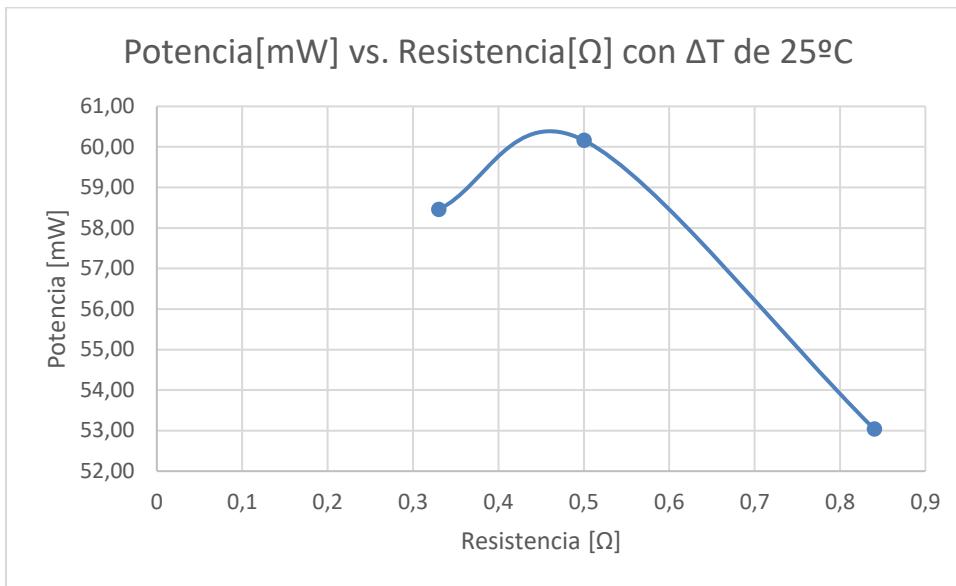


Figura 34: Potencia vs. Resistencia para un ΔT de 25°C.

Cabe mencionar que todos los ensayos comentados hasta ahora se realizan bajo unas condiciones de apriete constantes pero desconocidas, pues no se disponía (por entonces) de ningún método por el cual caracterizar la presión ejercida o contacto entre radiador y TEG.

Por último, antes de pasar a los ensayos con 2 módulos TEG, se muestran los resultados obtenidos **variando el apriete de los tornillos del radiador**, aunque este no fue cuantificado (con una resistencia constante e igual a 0,5 ohmios). A la vista de los resultados mostrados en la Figura 35, se puede apreciar como para una misma diferencia de temperatura, se pudo llegar a obtener casi el doble de potencia. Esto nos da idea de lo importante que es un buen contacto de cara a implementar los TEG's en la bancada de paneles y es algo que ya avisaban numerosos autores en la bibliografía [10] y [11].

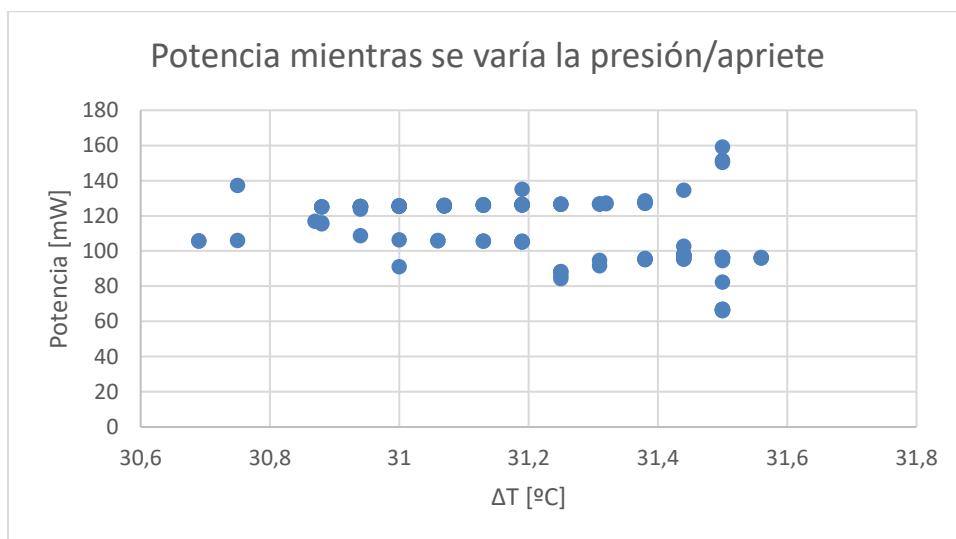


Figura 35: Potencia mientras se varía el apriete.

2.4. ENSAYOS A 2 TEG.

Tras ensayarse los radiadores con un único TEG situado entre sus dos caras, se procede a añadir un módulos más (conectado eléctricamente en paralelo) y realizar ensayos.

El primer ensayo consiste en buscar una diferencia de temperatura constante y variar la presión buscando el punto de máxima generación, pues al abrir los radiadores para introducir el nuevo módulo se pierden las condiciones anteriores de presión/apriete, y al no contar con un método para poder reproducirlas, se procede a buscar dicho punto de máxima generación y dejarlo constante. Durante este ensayo la resistencia conectada a los módulos es de 0,5 ohmios.

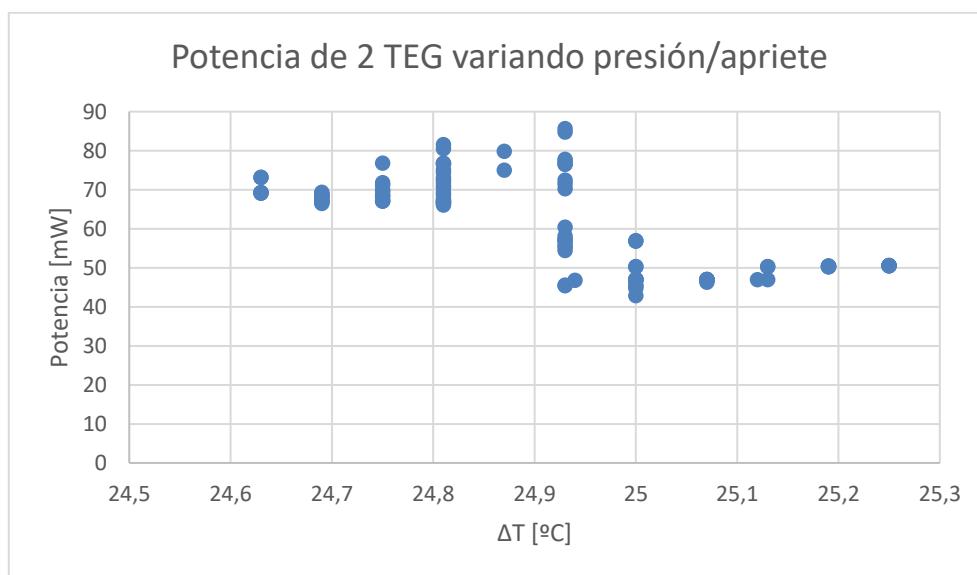


Figura 36: Potencia de 2 TEG variando presión/apriete.

Se puede apreciar como que, para diferencias de temperaturas mayores la potencia llega a ser incluso más pequeña, por lo que esto, de nuevo, nos da idea de la importancia del contacto y sus consecuencias en la transferencia de calor.

Posteriormente se procede a realizar una **búsqueda del MPP** de manera similar a la realizada anteriormente para el caso de 1 módulo.



Anexo II: Ensayos a los módulos TEG de manera aislada.

R[Ω]	Potencia [mW]
0,500	73,2
1,000	58,7
0,400	92,0
0,286	96,1
0,250	132,4
0,200	130,6
0,166	134,1
0,159	138,7
0,147	136,5

Tabla 3: Potencia de 2 TEG para cada resistencia conectada con un ΔT de 25°C.

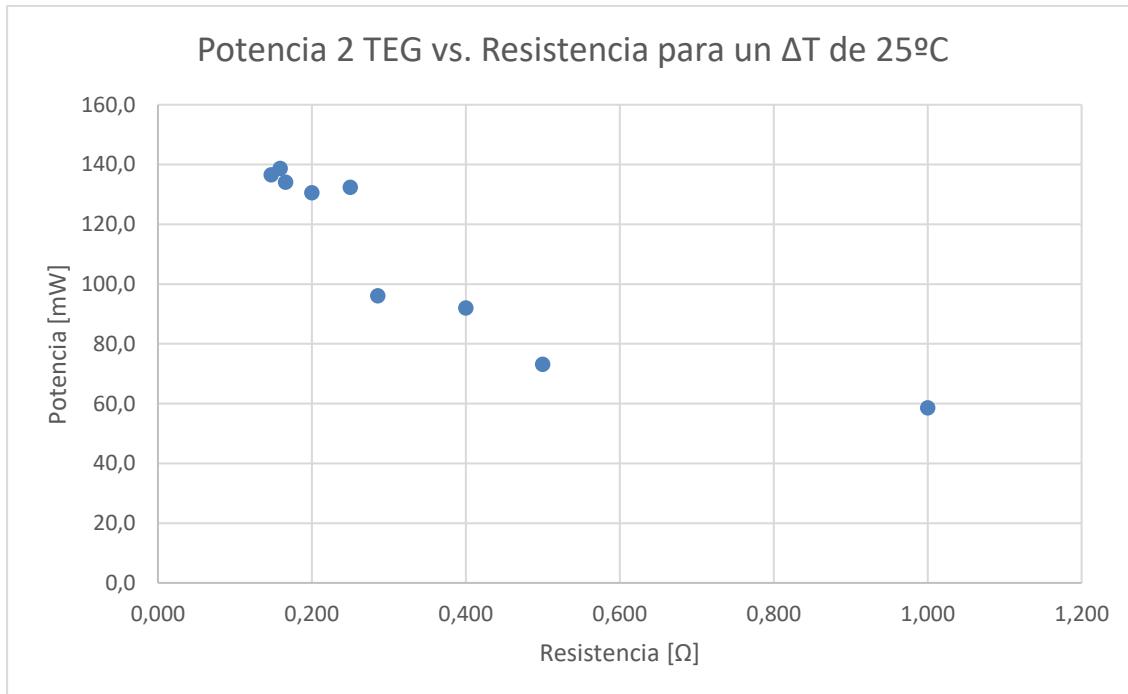


Figura 37: Potencia 2 TEG vs. Resistencia para un ΔT de 25°C.

Se puede apreciar como la potencia generada alcanza un máximo alrededor de los 0,2 ohmios. No se pudo disminuir más la resistencia por falta de resistencias de pequeño valor.

Tras esto se realizan los **ensayos de cortocircuito y circuito abierto**.

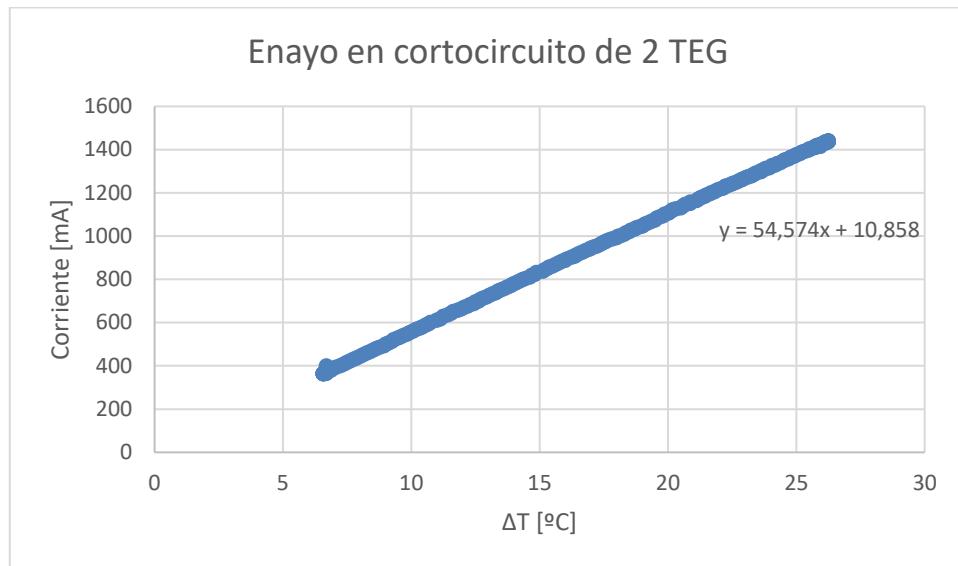


Figura 38: Ensayo en cortocircuito de 2 TEG.

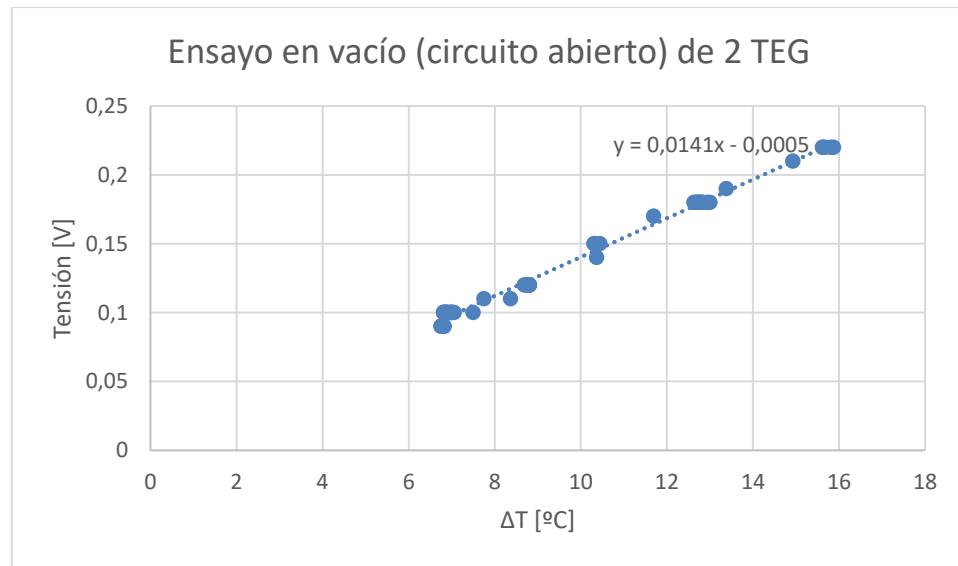


Figura 39: Ensayo en vacío (circuito abierto) de 2 TEG.



2.5. ENSAYOS A 6 TEG.

En estos ensayos, se abren los radiadores y se colocan 6 TEG como se aprecia en la Figura 41. Una vez más, al abrir el radiador para modificar el número de TEG se está modificando la presión/apriete, y por falta de medios para garantizar que este sea constante, se va a proceder, como anteriormente, a **modificar la presión/apriete** hasta encontrar el punto en el que más se genere.

Para hacer esto, se aumenta la temperatura hasta tener una diferencia de temperatura de 23 °C. Una vez alcanzada dicha diferencia de temperatura y con una resistencia fija de 0,5 ohmios, procedemos a variar la presión/apriete (de nuevo, no se tenía modo alguno de cuantificar este par de apriete).

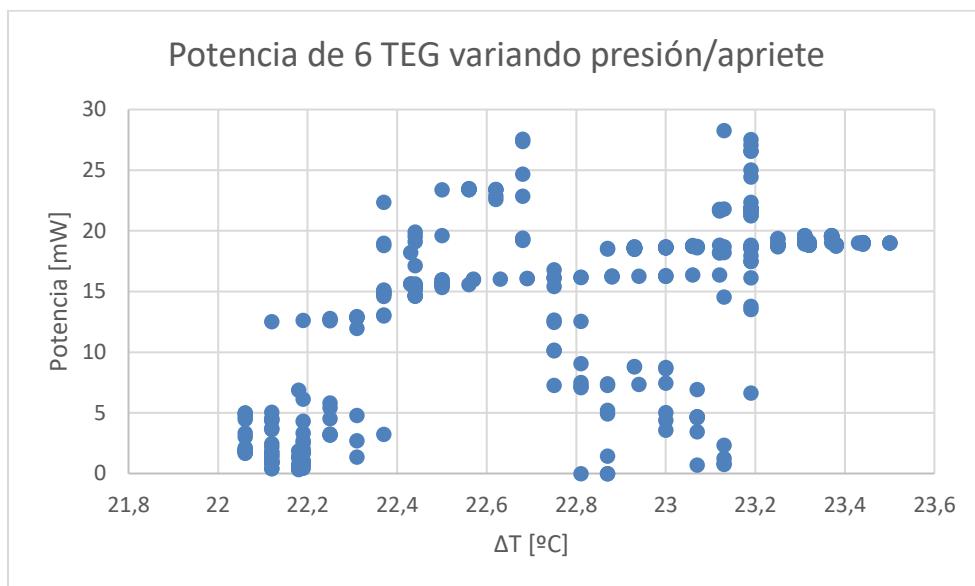


Figura 40: Potencia de 6 TEG variando presión/apriete.

De nuevo se puede apreciar el fenómeno que aparecía en los casos anteriores: el contacto es un factor crítico. Para diferencias de temperatura similares la potencia producida puede variar en más del triple.

Tras esto se procede a analizar la producción de cada TEG por separado, con intención de analizar la **producción de cada uno en función de su posición**. En la Figura 41 se puede apreciar la numeración de cada posición. Se toman las medidas a una diferencia de temperatura constante e igual a 23 °C.

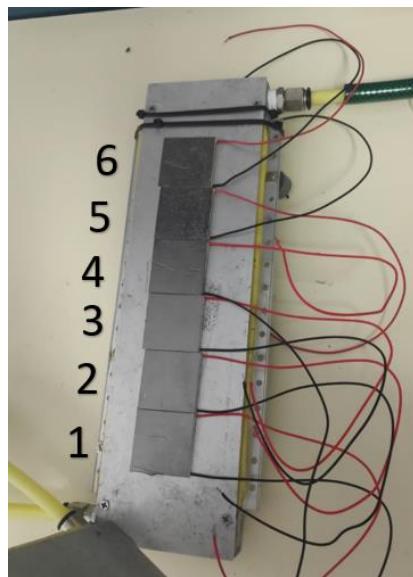


Figura 41: Posición de cada TEG.

Posición	Potencia [mW]
1	1,669
2	5,487
3	2,483
4	1,904
5	3,193
6	0,102

Tabla 4: Potencias generadas según su posición.

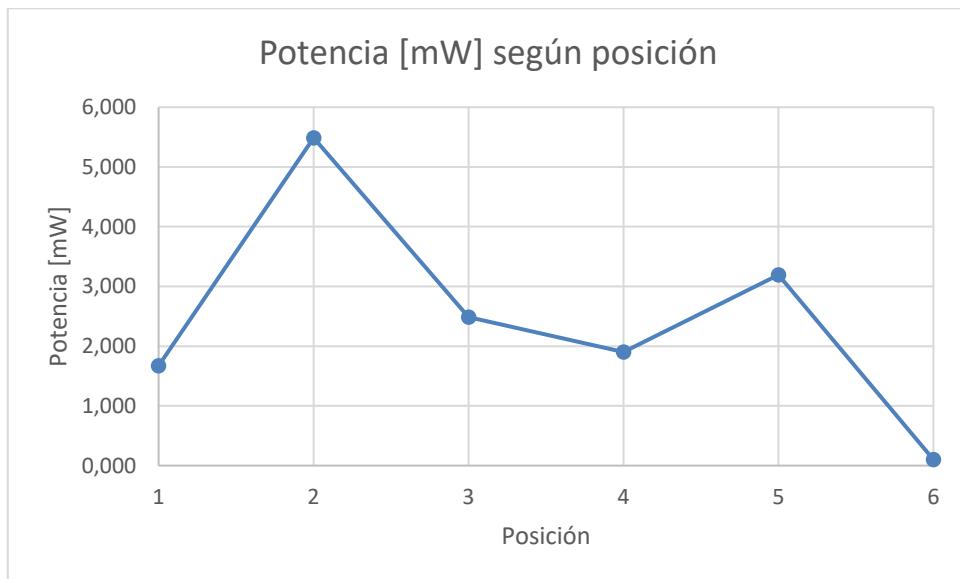


Figura 42: Potencias generadas según su posición.



Como se puede apreciar en la Figura 42, la producción de potencia no es constante en todos los TEG. Esto posiblemente se deba de nuevo al contacto realizado entre TEG's y placas, pues tras observar el radiador detalladamente se observa cierta concavidad en su superficie. Esto sería el causante, por ejemplo, de la poca producción en las posiciones laterales.

De cara a una posterior implementación de los radiadores en la bancada de paneles, este problema debe ser subsanado.

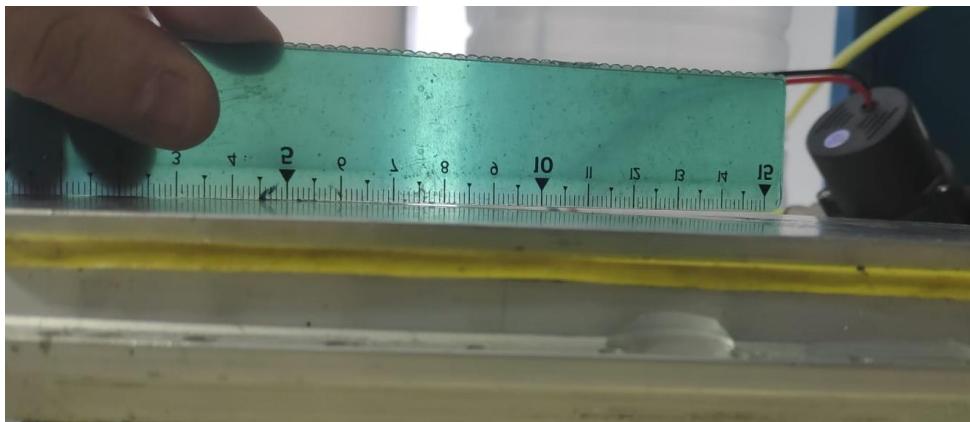


Figura 43: Detalle de la concavidad en el radiador.

Con todos los TEG conectados, y con el mejor contacto obtenido, se consiguen 28 mW de potencia con una diferencia de temperaturas de 23 °C, lo cual es una producción muy escasa, pero se debe tener en cuenta la baja diferencia de temperaturas, que no se trabaja en el MPP (resistencia fija)...

Otro ensayo interesante, a la vista de lo consultado en bibliografía ([9], [12] y [13]) y debido a la naturalidad eléctrica de los TEG es una comparación de la **disposición en serie vs. la disposición en paralelo**. Por ello, se procede a colocar los 6 TEG en serie y observar la producción (pues en paralelo ya tenemos los datos anteriores).

DT [°C]	Potencia[mW]
23,41291667	0,271520833

Tabla 5: Potencia de 6 TEG en serie.

Se puede comprobar como la potencia generada es notablemente inferior. Esto nos permite pensar que los módulos se comportan como generadores de corriente y que la disposición en paralelo es la mejor para generar potencia. Este ensayo se repetirá cuando el radiador se encuentre acoplado al sistema hidráulico de la bancada, para comprobar la veracidad de estos resultados.

3. ANEXO III: ENSAYOS EN BANCADA: CONFIGURACIÓN ORIGINAL.

En el siguiente anexo se procede a mostrar los resultados obtenidos en los ensayos realizados a bancada en su configuración original, con los módulos TEG integrados dentro del panel, empleando como foco caliente la tubería de salida de agua del colector y como foco frío la tubería de entrada de agua al colector, la cual se ha modificado. Se remite al lector al Anexo 1 Anexo I: Descripción de la bancada de ensayos para conocer más en profundidad la construcción y funcionamiento de la bancada.

Los ensayos fueron realizados en un total de 5 días, cada uno con unas condiciones meteorológicas distintas. Tras mostrar todos estos resultados, se procederá a comentar en un último apartado las conclusiones extraídas de estos ensayos.

3.1. ENSAYOS DÍA 17/06

Los ensayos realizados el día 17/06 comenzaron a las 10:04 y finalizaron a las 12:55. Se trató de un día despejado y soleado.

En la Figura 44 se puede apreciar la evolución de las distintas temperaturas a lo largo del ensayo. Se puede apreciar un salto en todas las trayectorias debido a un fallo en la monitorización, que dejó de tomar datos durante un periodo de tiempo de alrededor de 1 hora.

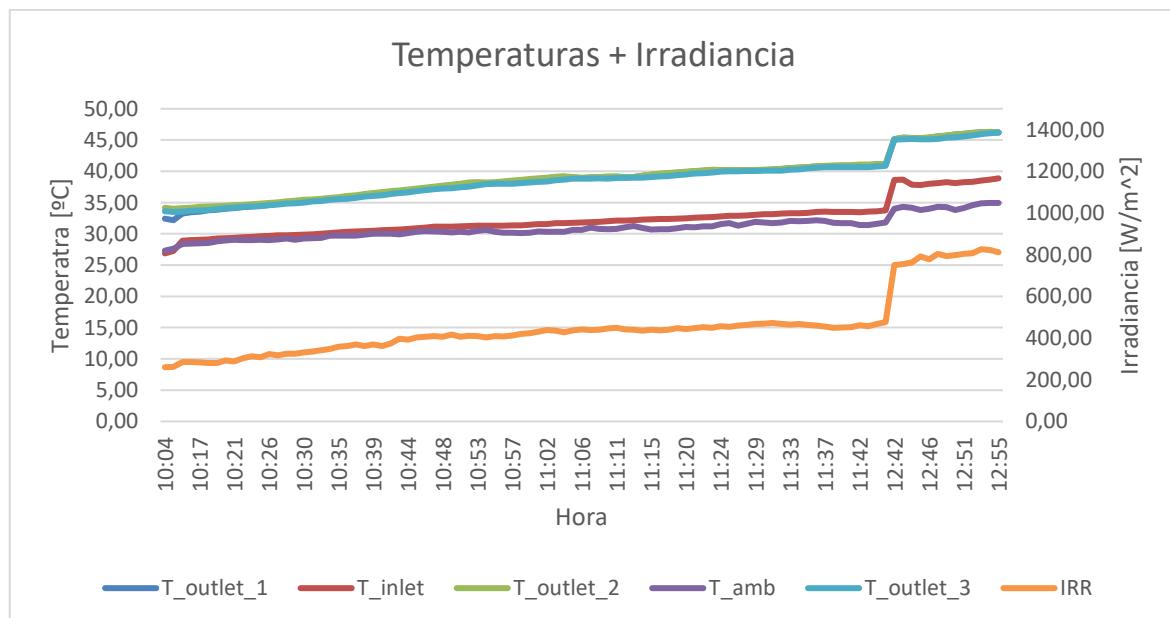


Figura 44: Evolución temperaturas del 17/06.



Se observa como la evolución es lineal (exceptuando el pico del fallo de monitorización). Además, se puede comprobar como la temperatura de salida del colector 1 y 2 son muy similares. También se observa como al principio la temperatura de salida del depósito es similar a la temperatura ambiente, pero a medida que avanza el ensayo, como consecuencia del calentamiento, la temperatura de salida del depósito comienza a aumentar respecto de la temperatura ambiente.

Los ensayos comienzan siempre con la temperatura de depósito similar a la ambiente debido a que por las noches el aerotermo enfriá el depósito, para de esta manera estar simulando el consumo de una instalación real.

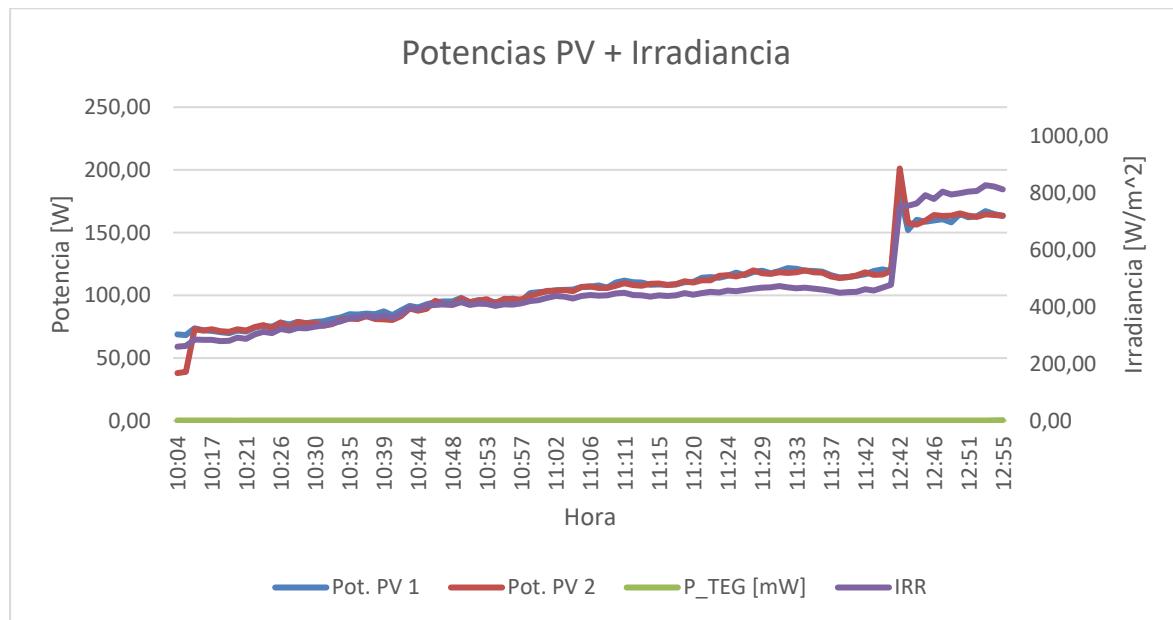


Figura 45: Potencia PV del 17/06.

En la Figura 45 se muestra la evolución de la potencia eléctrica que producen los paneles. Como se puede ver, de nuevo, se trata de un parámetro que sigue de manera fiel a la irradiancia, lo cual es lo que cabría esperar. También se puede ver que la potencia producida por los TEG es apenas inapreciable en comparación con la potencia de la parte fotovoltaica.

En las siguientes figuras se muestra la evolución de la potencia producida por los TEG junto con otros parámetros.

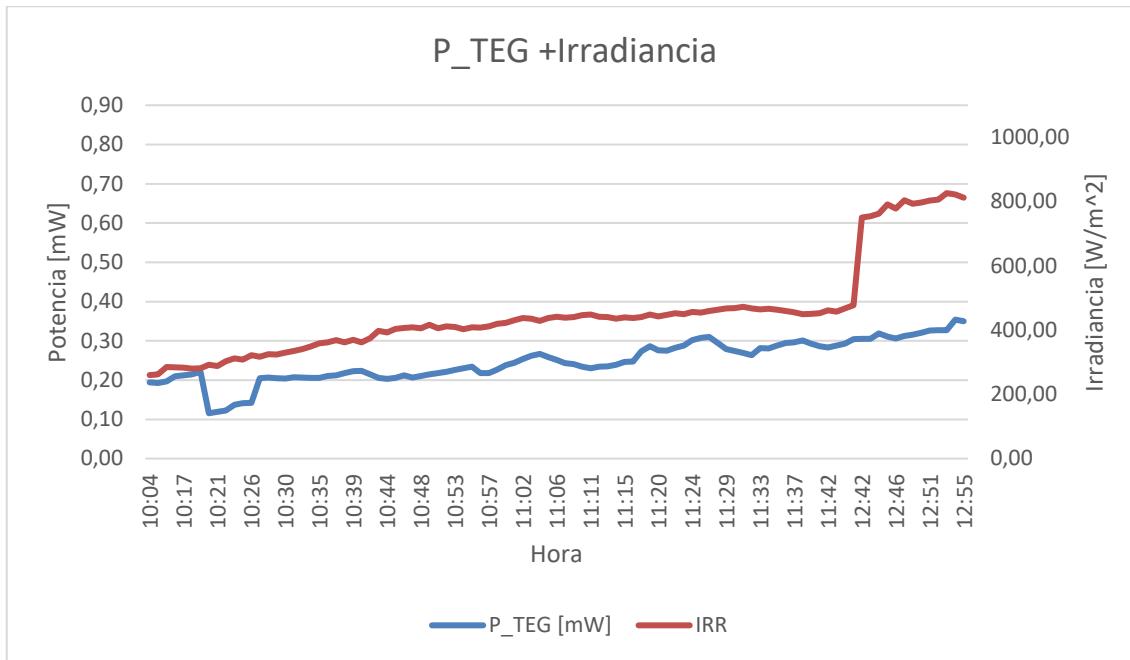


Figura 46: Potencia del TEG e Irradiancia del 17/06.

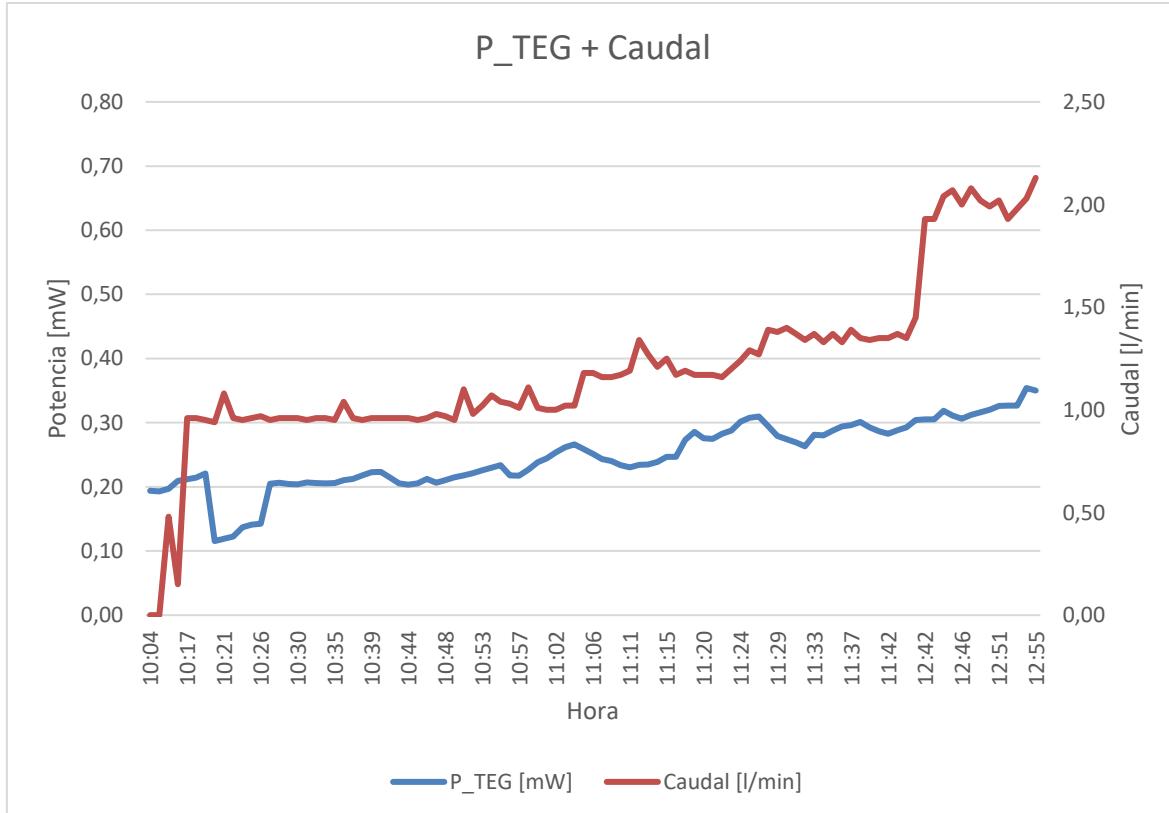


Figura 47: Potencia de TEG y Caudal del 17/06.

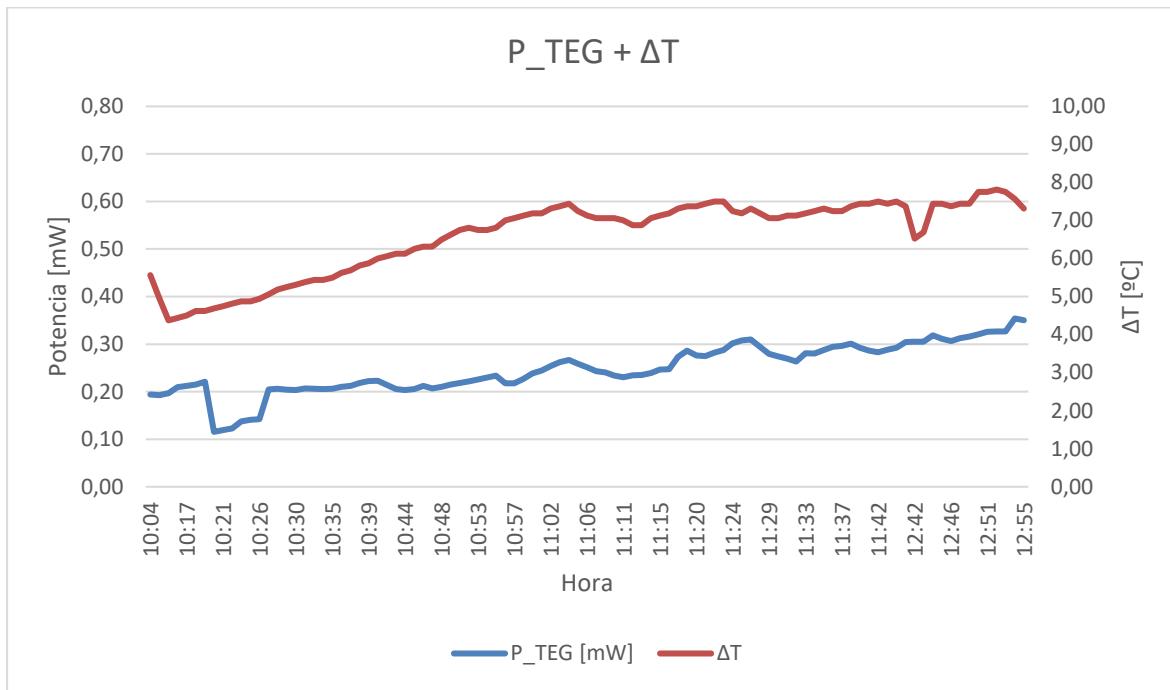


Figura 48: Potencia de TEG y diferencia de temperatura del 17/06.

Si analizamos la primera figura, podemos observar como la potencia de TEG tiene una tendencia creciente similar a la irradiación, pero con alguna irregularidad. Además, esta potencia también tiene una tendencia similar a la de la diferencia de temperatura (de manera más precisa), lo cual cabía esperar, pues es la irradiancia la que provoca el aumento de temperatura.

Además, se puede apreciar un pequeño pico inverso en la potencia de TEG que deriva de la puesta en marcha del panel, pues cuando por este no circula caudal, aumenta la temperatura, pero cuando comienza a circular agua, disminuye la temperatura de salida automáticamente, por lo que esto afecta a la diferencia de temperaturas y en consiguiente a la potencia de TEG.

Por último, se muestra una gráfica de a potencia TEG frente a diferencia de temperaturas.

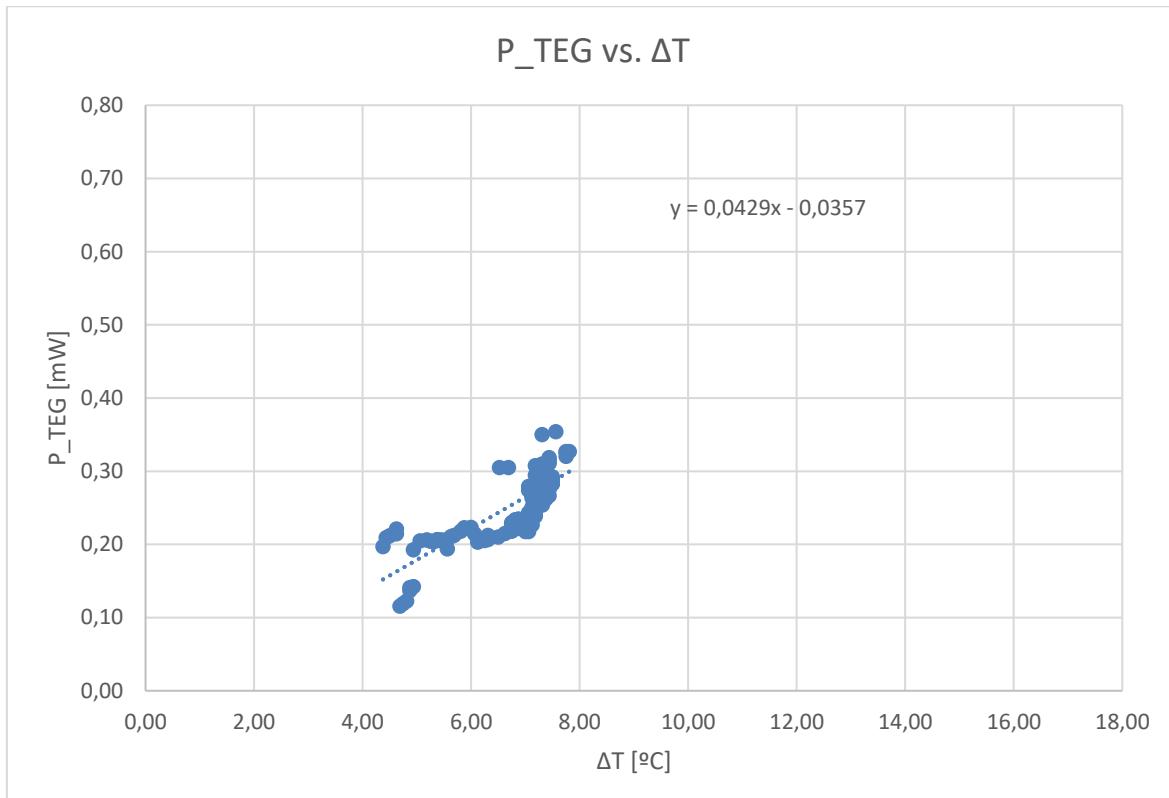


Figura 49: Potencia de TEG frente a diferencia de temperatura del 17/06.

En ella, se puede apreciar una cierta tendencia creciente de la potencia, que más que seguir una tendencia lineal, parece ser polinómica. Esto nos hace pensar en que el rendimiento de los TEG no es cte., si no que aumenta con la diferencia de temperatura, algo que constataban algunos autores de la bibliografía [9].



3.2. ENSAYOS DÍA 27/06.

Los ensayos realizados este día están caracterizados por ser un día con numerosas nubes, pero con una irradiación alta. Esto se puede apreciar en la Figura 50, ya que podemos ver una gran variación en la irradiación. Se realizó aproximadamente 3 horas de ensayo.

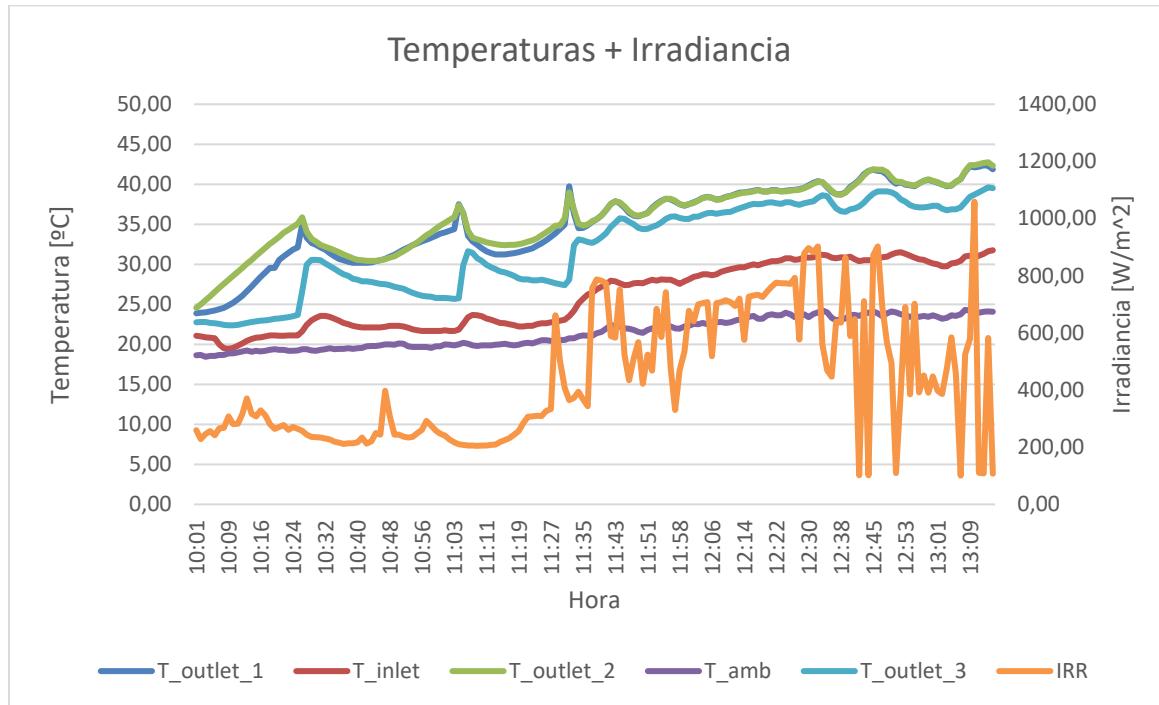


Figura 50: Temperaturas e Irradiancia del 27/06.

Podemos apreciar algunos picos en las distintas mediciones de temperatura, aunque estos son explicados al observar la Figura 53, puesto que la no circulación de agua hace que aumente la temperatura (no se evacúa el calor), y cuando esta vuelve a circular, la temperatura disminuye.

En cuanto a la potencia generada por el laminado fotovoltaico de cada panel, se muestra la Figura 51. Se puede apreciar cómo, de nuevo, la potencia sigue de manera fiel a la irradiación. Se pueden apreciar fallos en la monitorización del panel 1 a lo largo del ensayo.

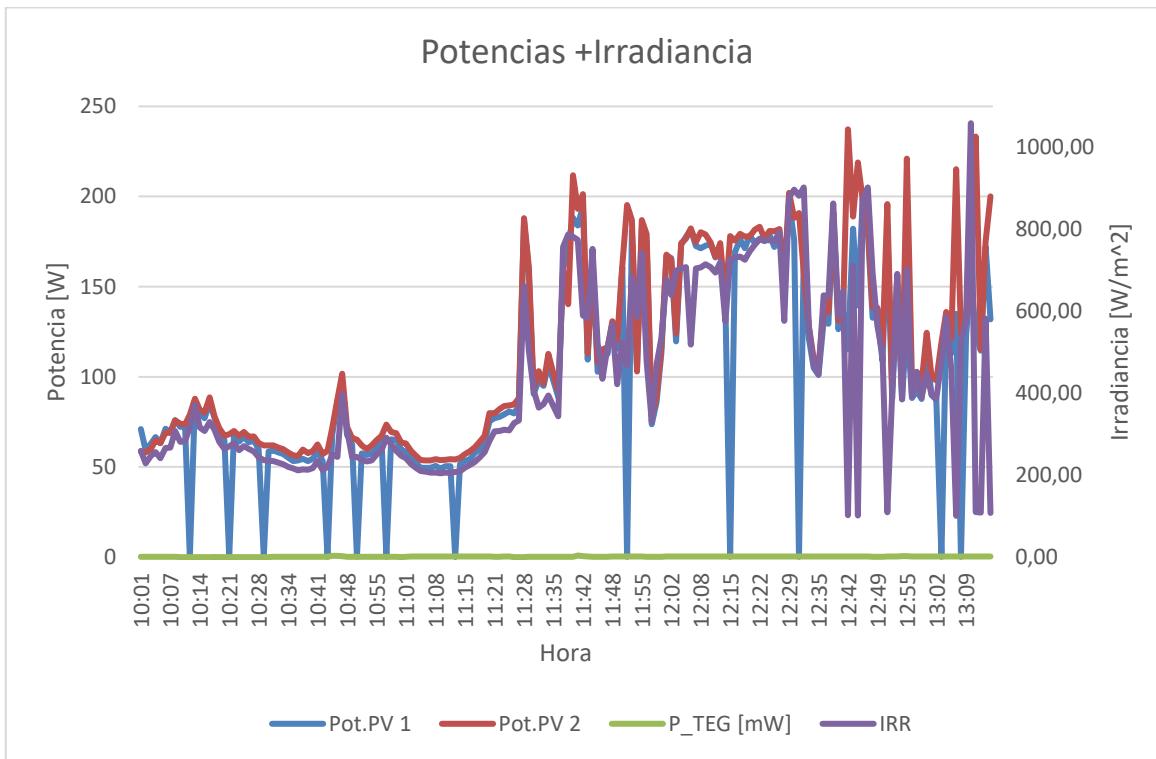


Figura 51: Potencias PV e Irradiancia del 27/06.

En cuanto a la producción de la parte TEG, debemos analizar las siguientes figuras.

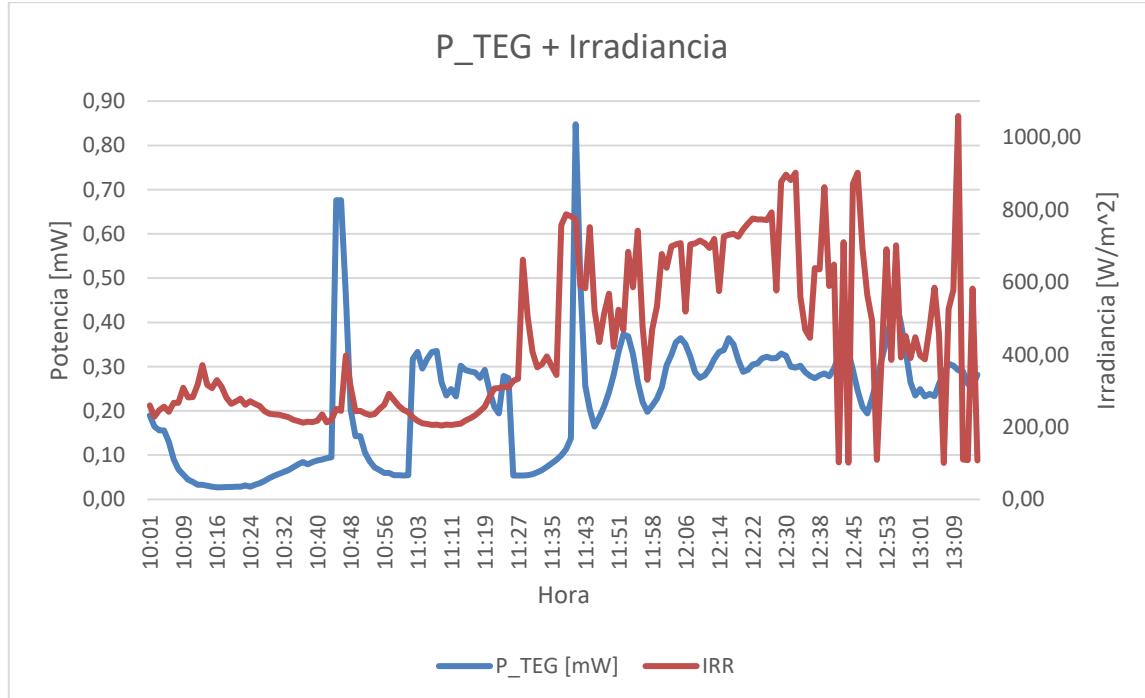
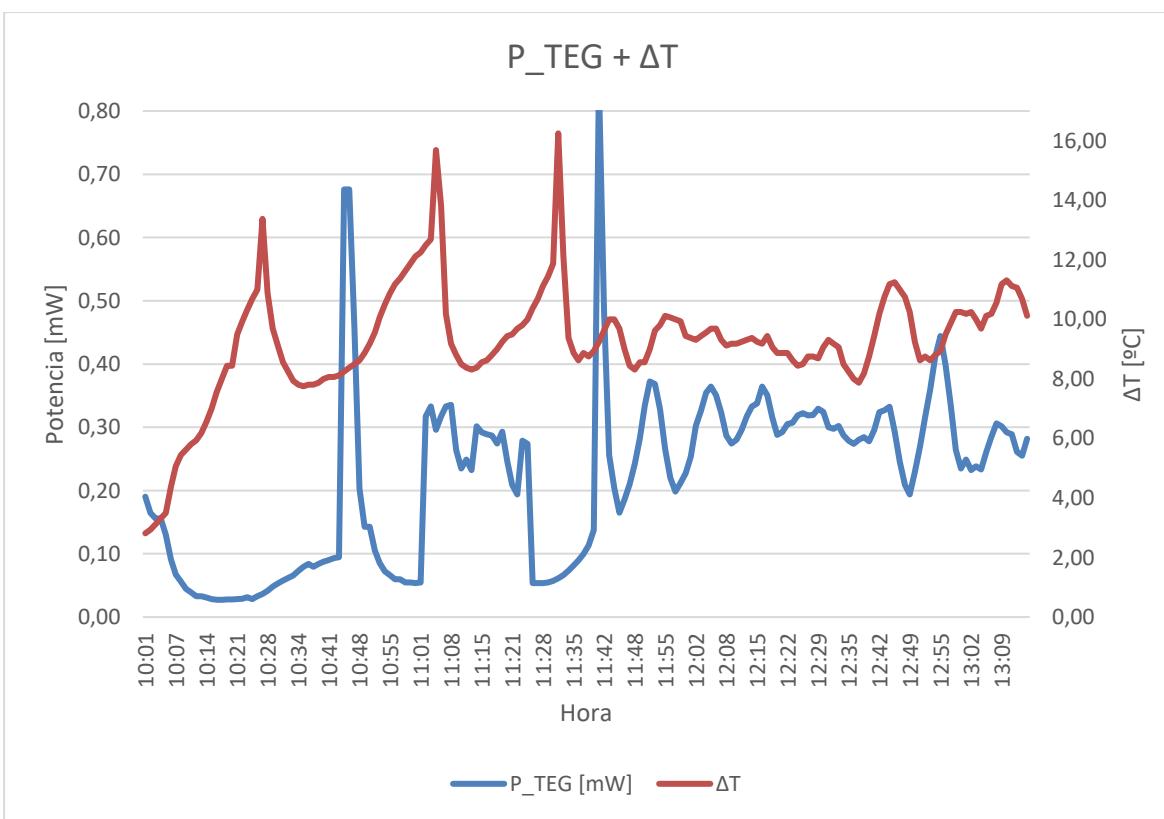
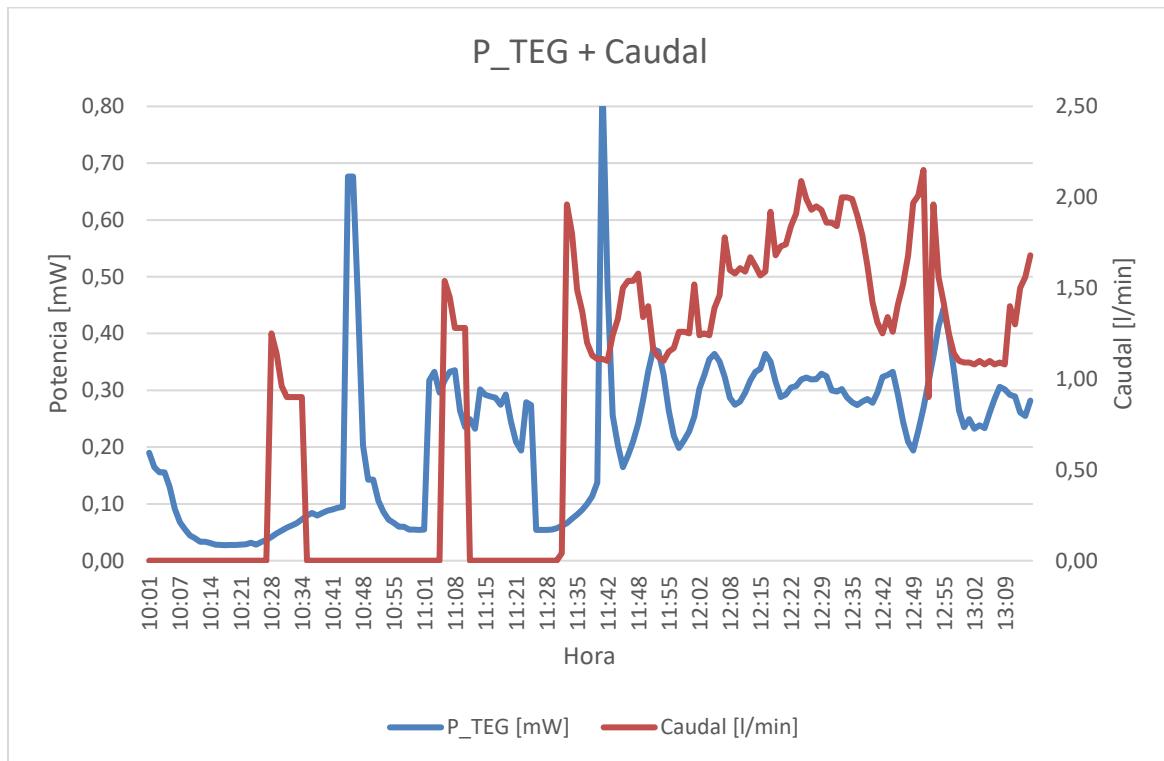


Figura 52: Potencia de TEG e Irradiancia del 27/06.



Si nos fijamos en la Figura 53, podemos ver como la potencia producida por el TEG es inversamente proporcional al caudal circulante. Esto, como ya hemos comentado, se debe a que mientras no circula agua, la temperatura del fluido dentro del panel aumenta. Vemos también una cierta relación con la irradiancia (Figura 52), aunque siendo esta menos clara.

En cuanto a la Figura 54, podemos ver un cierto desfase entre potencia producida y diferencia de temperaturas, esto se le achaca a un desfase en la monitorización.

Se obtuvo también una gráfica de potencia generada por los módulos TEG frente a diferencia de temperatura, pero esta no muestra ningún tipo de tendencia clara y carece de interés.

3.3. ENSAYOS DÍA 28/06.

Los ensayos de este día comenzaron alrededor de las 9:40 y finalizaron a las 12:27.

En la Figura 55 se muestran las temperaturas y la irradiancia.

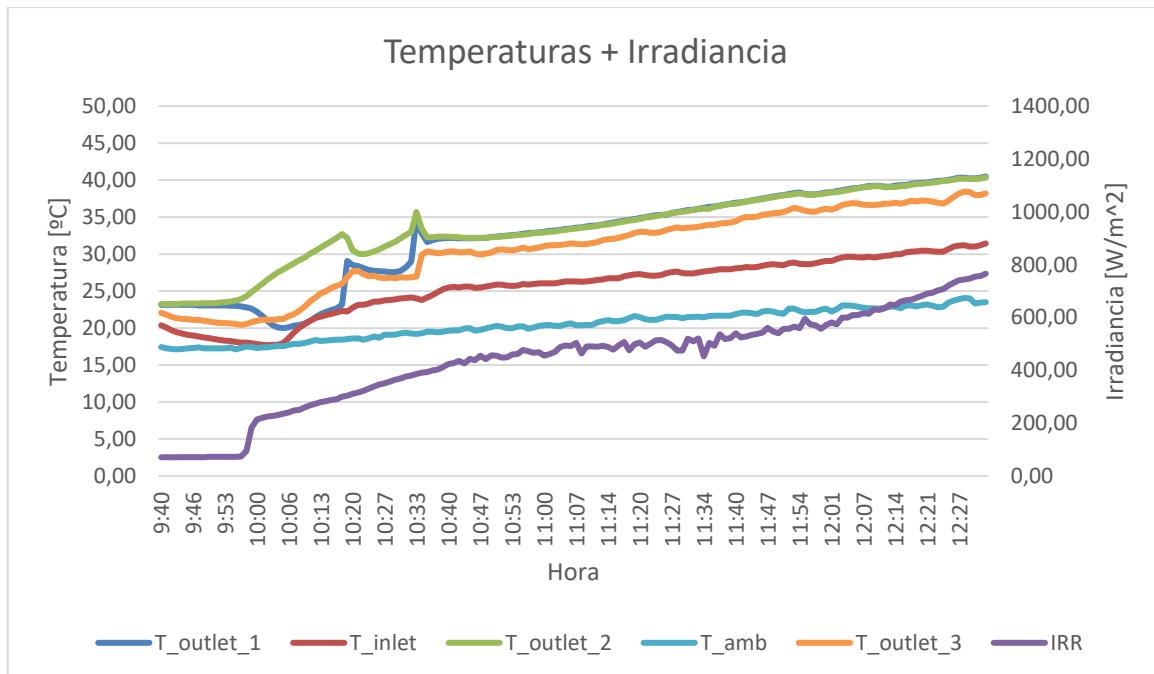


Figura 55: Temperaturas e Irradiancia del 28/06.

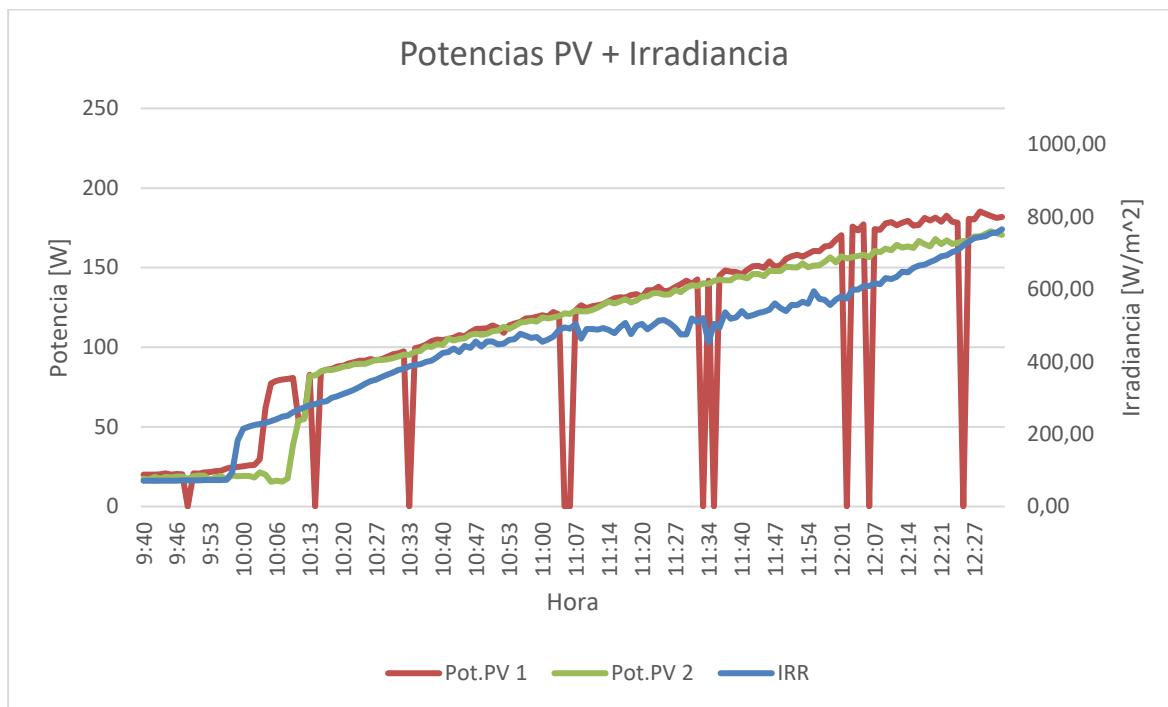


Figura 56: Potencias PV e Irradiancia del 28/06

En la Figura 57 se puede apreciar, de nuevo, una temperatura con una tendencia uniforme con algunos picos de temperatura producida por la circulación/no circulación de caudal.

Respecto a las potencias PV, vemos en este caso una ligera producción inferior del colector N.º 2, aunque se desconoce la causa.

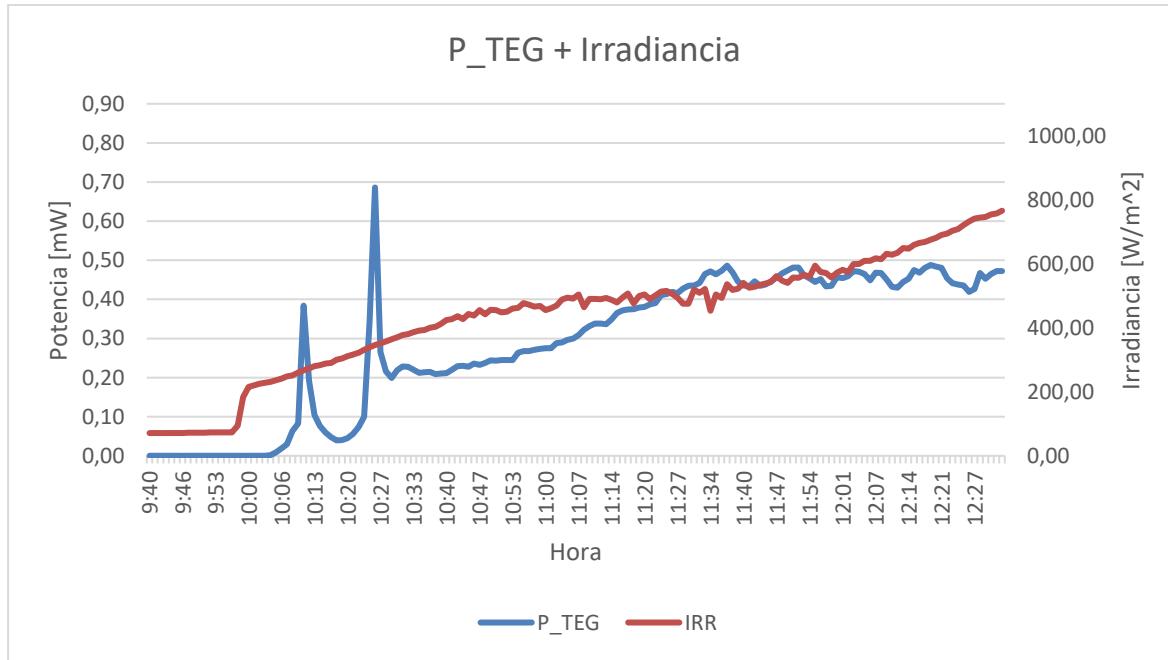


Figura 57: Potencia TEG e Irradiancia del 28/06.

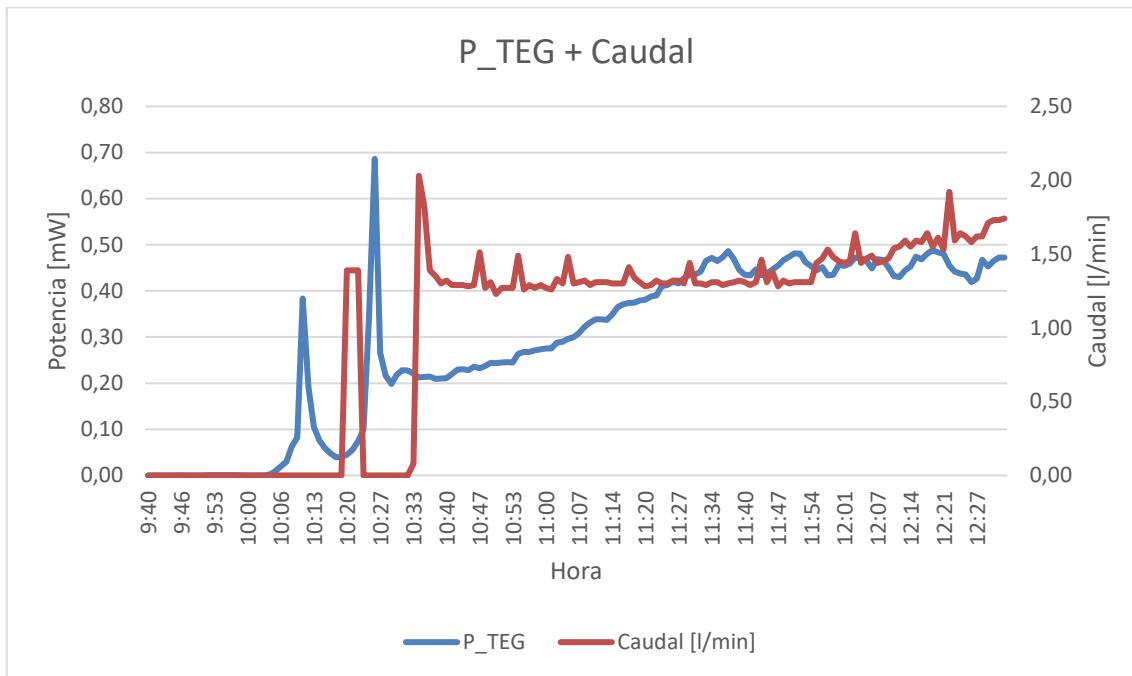


Figura 58: Potencia TEG y Caudal del 28/06.

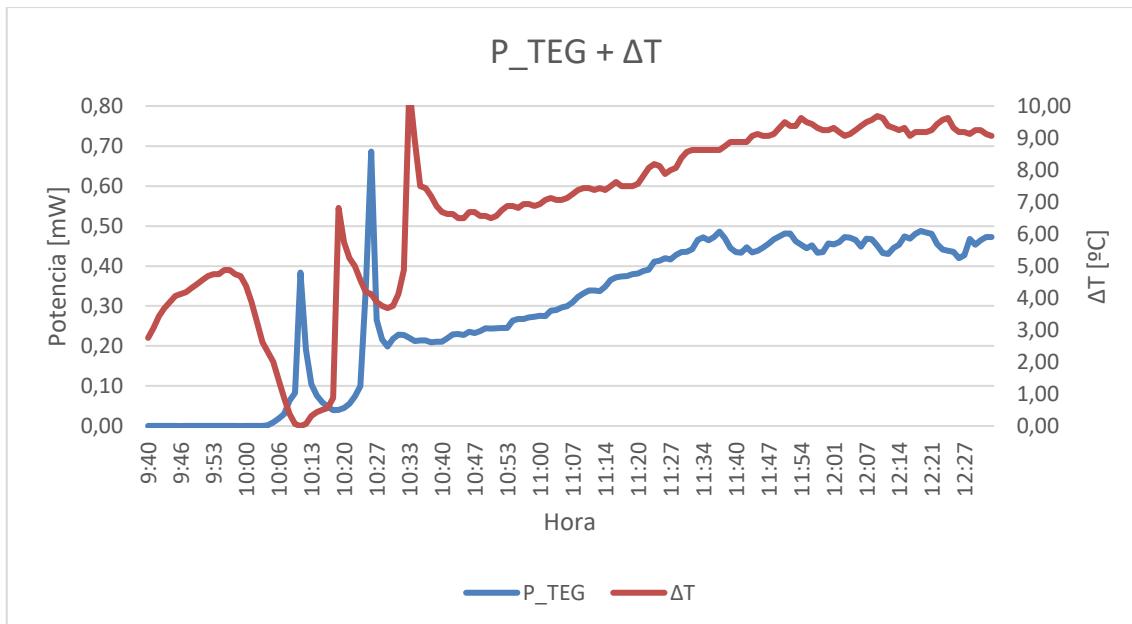


Figura 59: Potencia TEG y diferencia de temperaturas del 28/06.

En cuanto a la producción de los TEG, se presentan las anteriores tres figuras. En cuanto a la producción con la irradiancia, estas comparten una tendencia ascendente, pero se observan algunos picos en la producción que solo son explicables observando la Figura 58 y la Figura 59, estando esta última de nuevo desfasada. Este desfase entre ambas monitorizaciones viene provocado por ser distinto sistema de monitorización y no registrarse todo en una misma base de datos.



Por último, se presenta la Figura 60, en la cual se puede apreciar una cierta tendencia lineal cuando se comienza a tener cierto salto de temperaturas. Lo cual nos vuelve a dar una idea de que el comportamiento del rendimiento del TEG no es constante, si no que aumenta con el salto de temperatura.

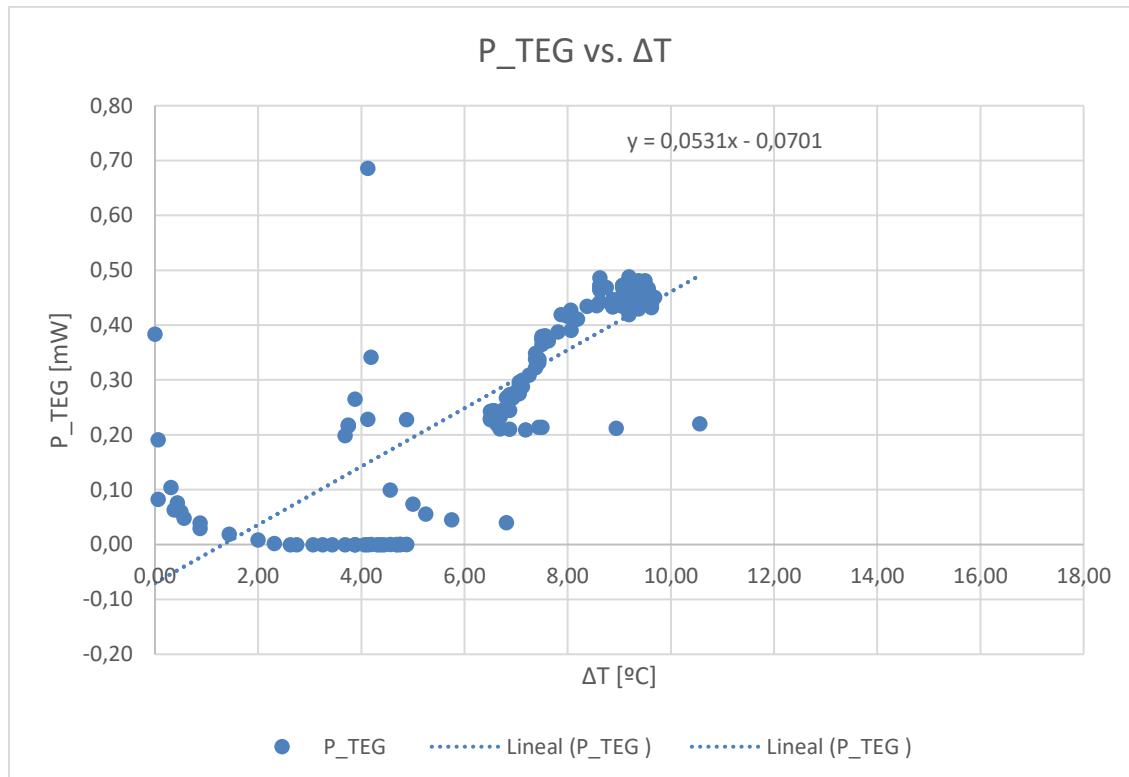


Figura 60: Potencia TEG vs. Diferencia de Temperaturas del 28/06.

3.4. ENSAYOS DÍA 30/06.

Los ensayos del día 30 de junio se caracterizaron por un día con mucha irradiación pero con nubes, como se puede ver en la Figura 61.

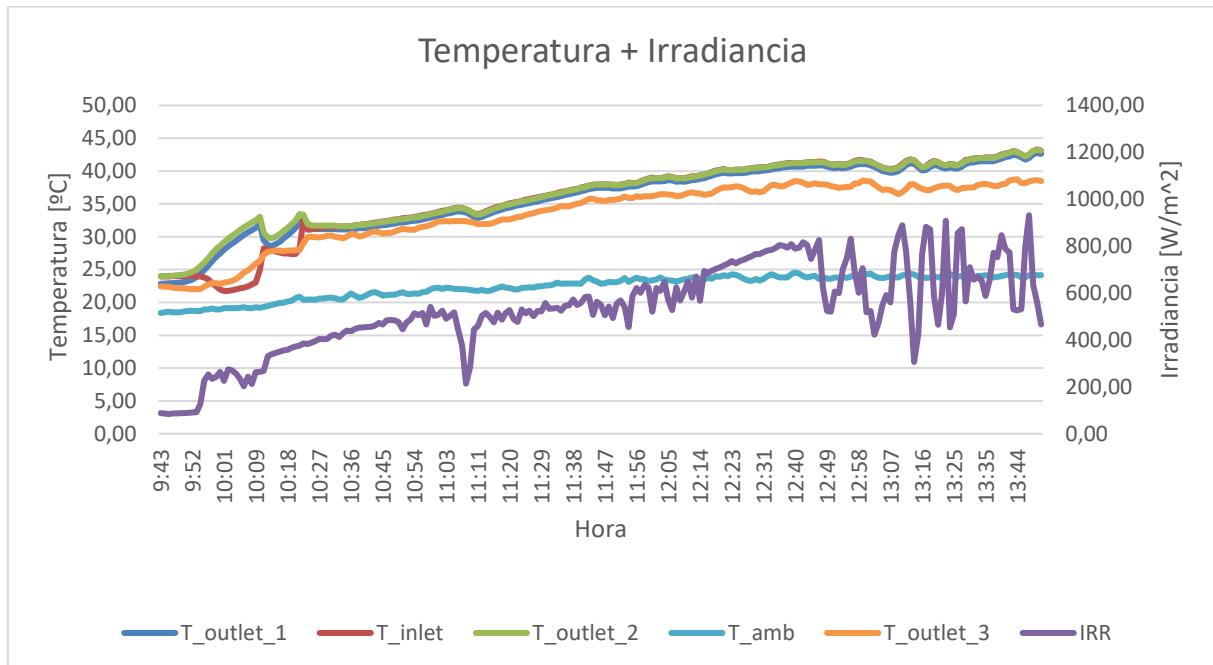


Figura 61: Temperaturas e Irradiancia del 30/06.

Se puede apreciar una tendencia de la temperatura uniforme, con algunos picos al inicio del día debido a variaciones del caudal.

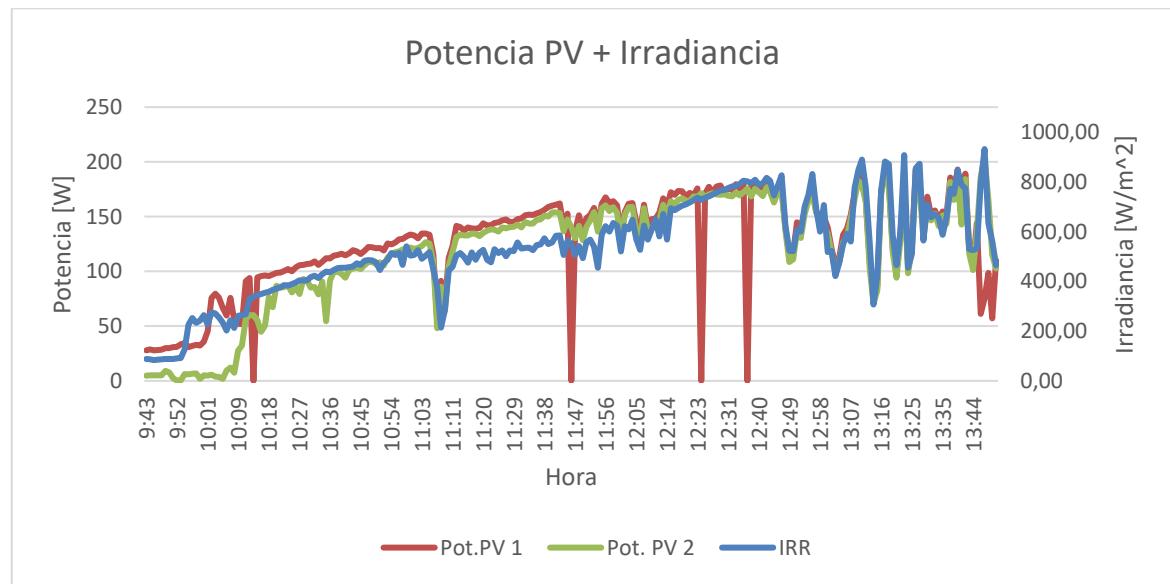
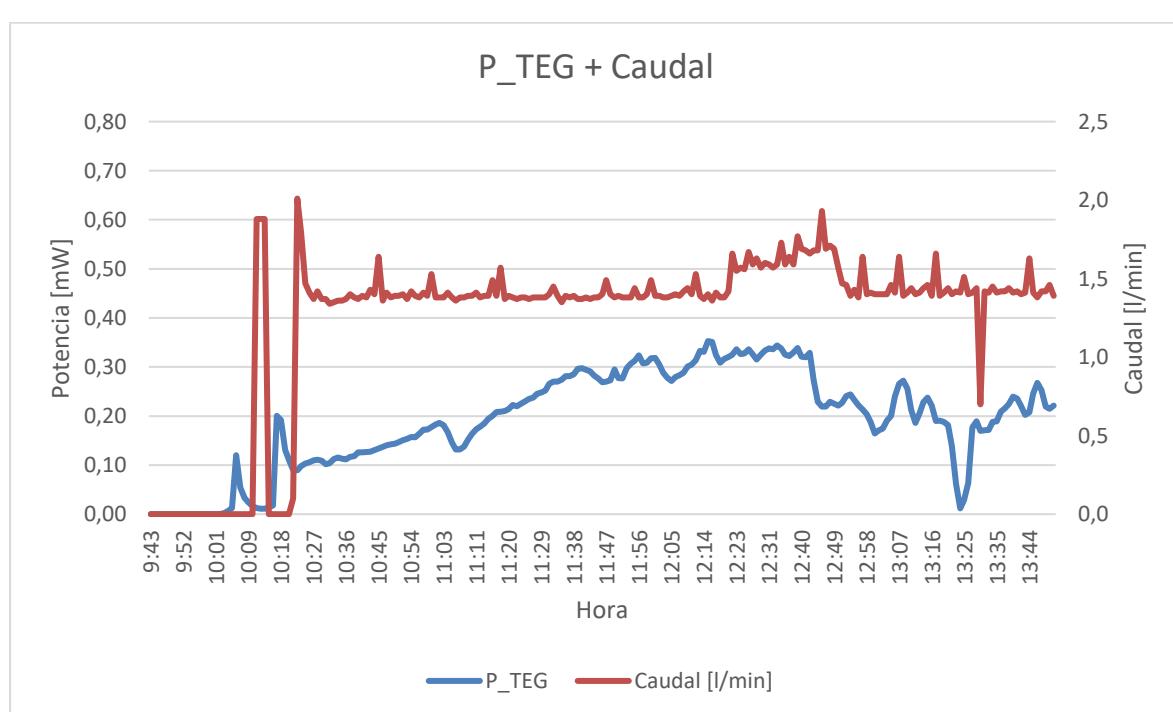
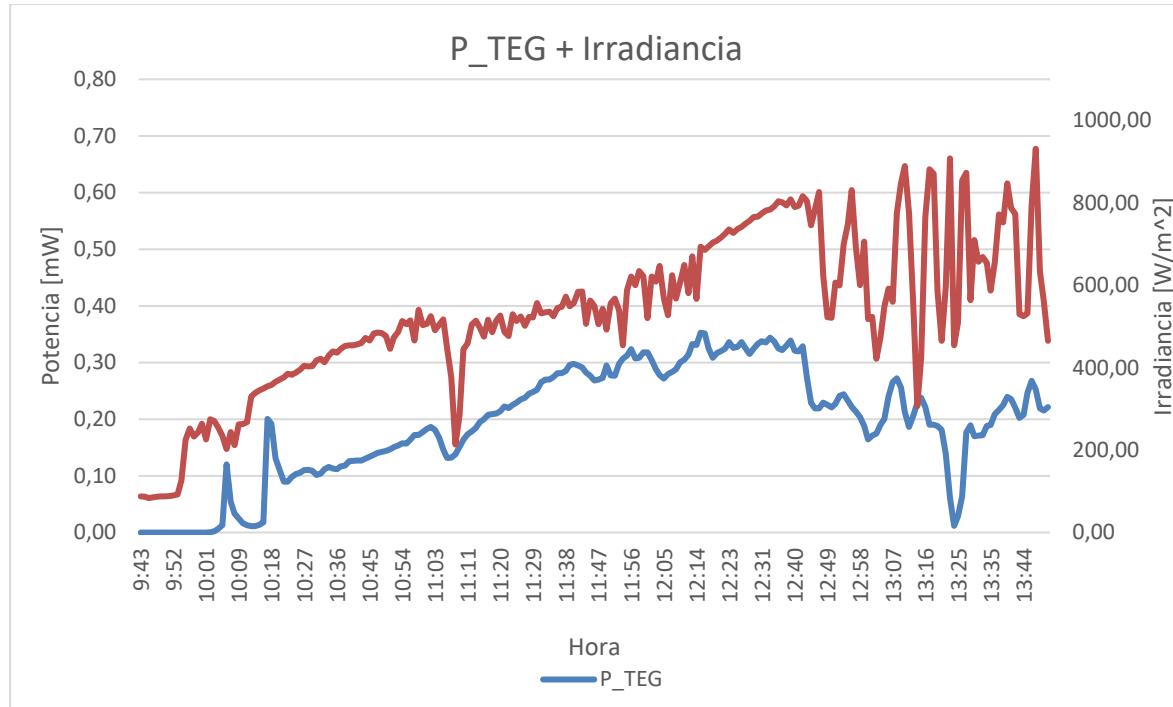


Figura 62: Potencia PV e Irradiancia del 30/06.



De nuevo, en la Figura 62, se aprecia la evolución de la potencia de los laminados fotovoltaicos en consonancia con la irradiación y observando también fallos en la monitorización del panel N.^o 1.



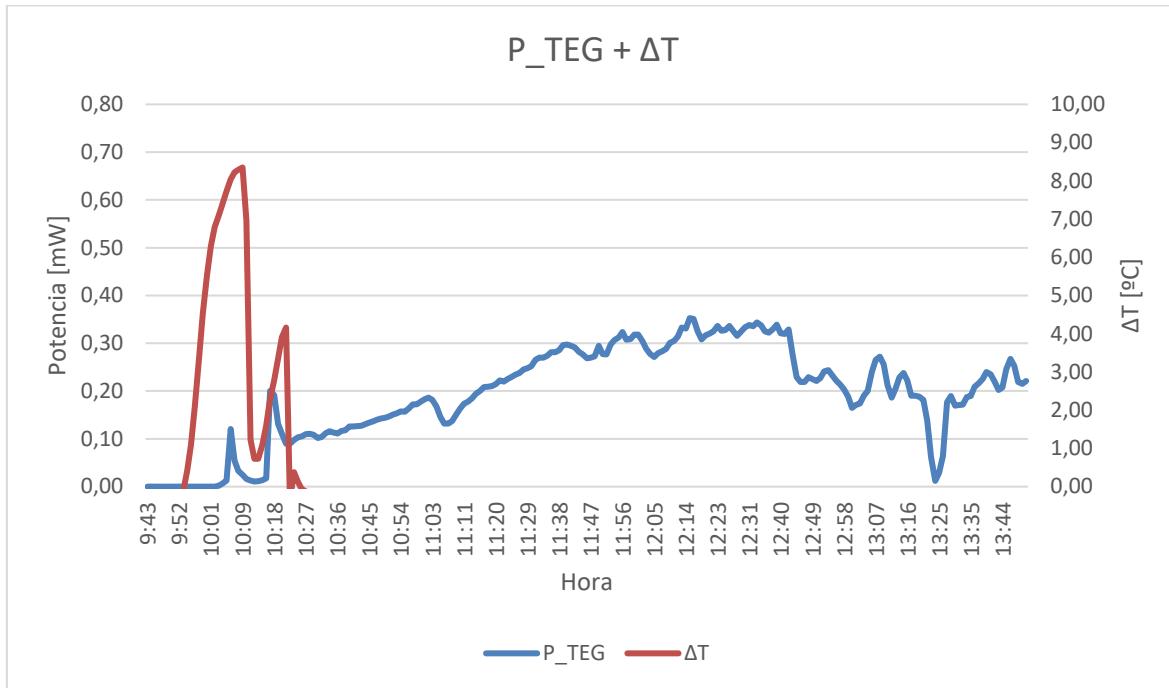


Figura 65: Potencia TEG y diferencia de temperaturas del 30/06.

En las figuras anteriores se puede apreciar el comportamiento de la potencia durante los ensayos de dicho día. Se puede apreciar como para este día la potencia generada por los módulos TEG guarda más relación con la irradiancia. Esto es posible que se deba a que durante casi la totalidad del ensayo el caudal se ha mantenido estable, como se puede comprobar en la Figura 64.

En cuanto a la diferencia de temperatura, se observa que esta es prácticamente nula, lo cual se debe a un fallo en la monitorización.

3.5. ENSAYOS DÍA 01/07.

En la Figura 66 se pueden observar las temperaturas y la irradiancia del día 01/07.

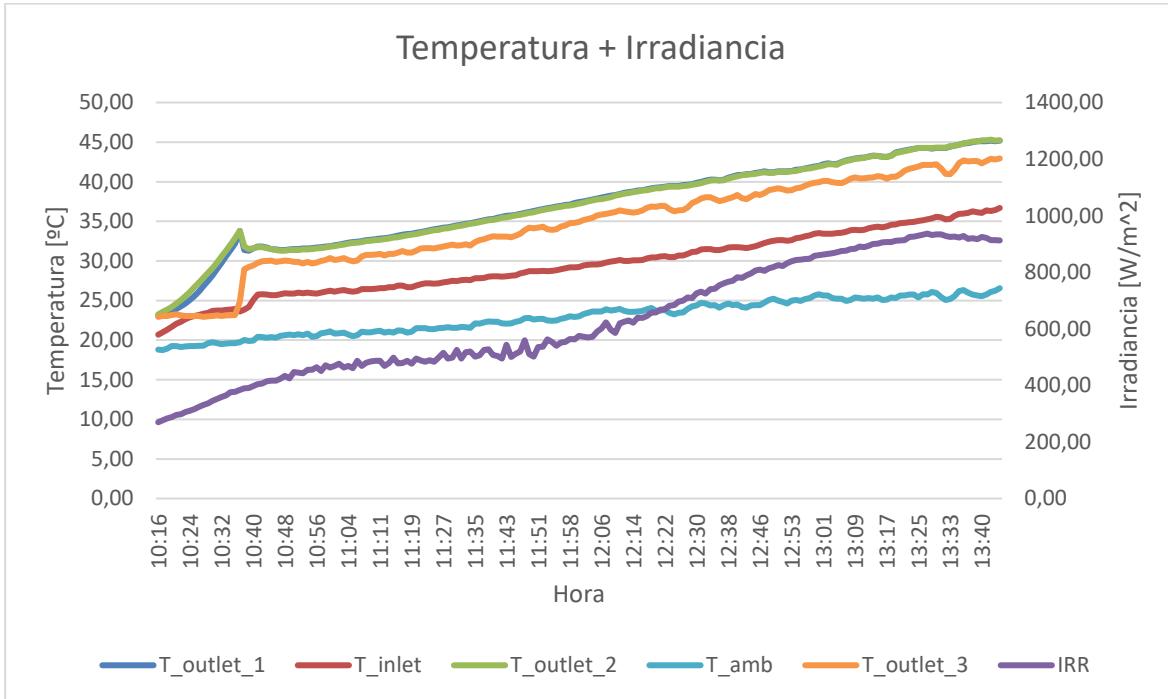


Figura 66: Temperaturas e Irradiancia de 01/07.

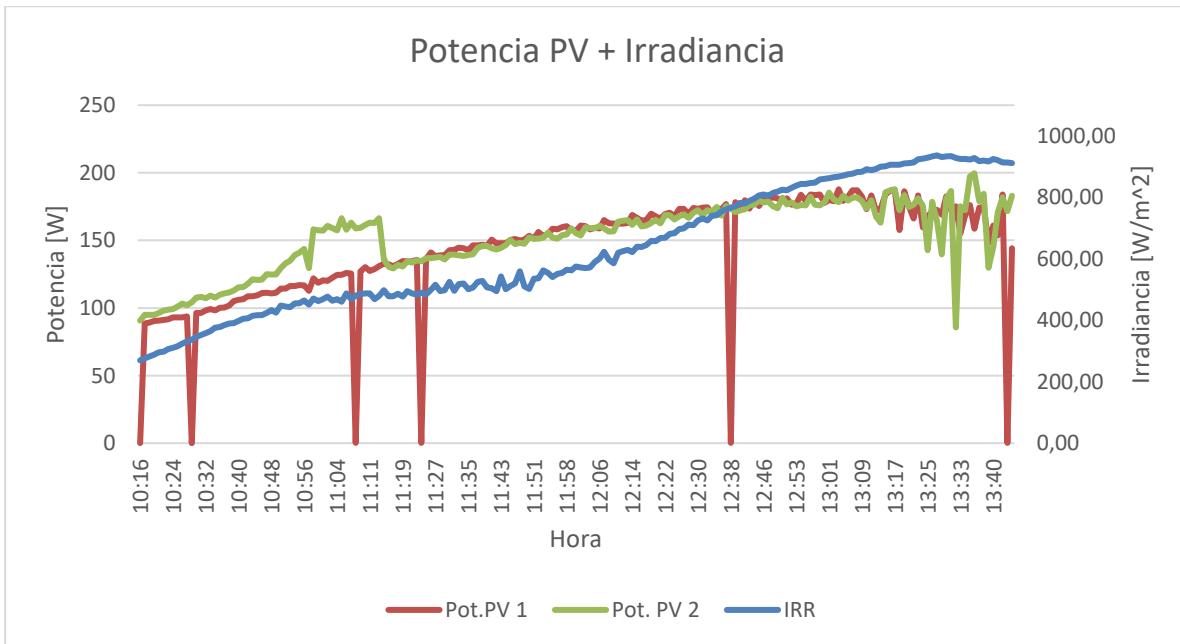


Figura 67: Potencia PV e Irradiancia del 01/07.

De nuevo las temperaturas se muestran con una tendencia uniforme. En cuanto a las potencias de los laminados fotovoltaicos, se aprecia algo de irregularidad en la del laminado del panel N.^o 2 (además del error sistemático en la monitorización del N.^o1).

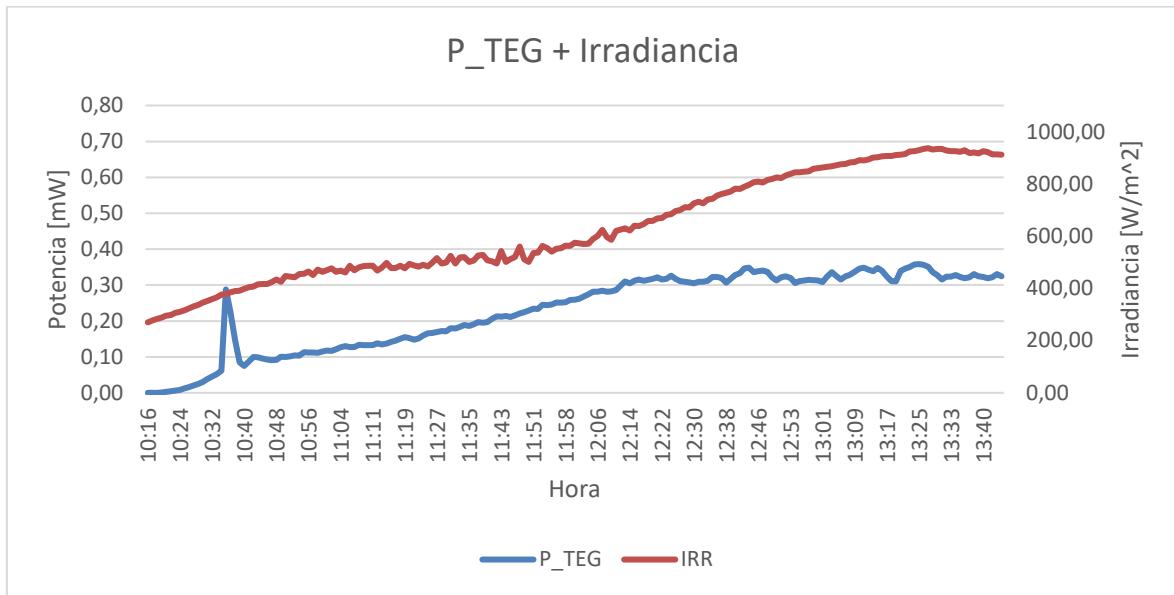


Figura 68: Potencia TEG e Irradiancia del 01/07.

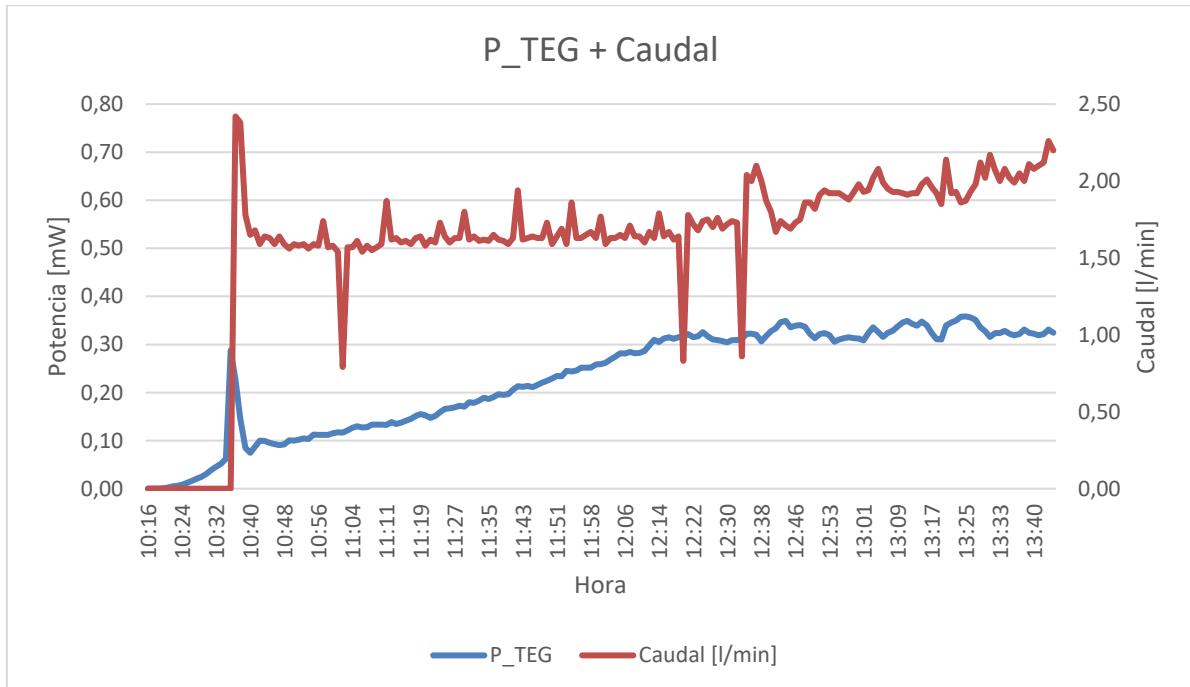


Figura 69: Potencia TEG y Caudal del 01/07.

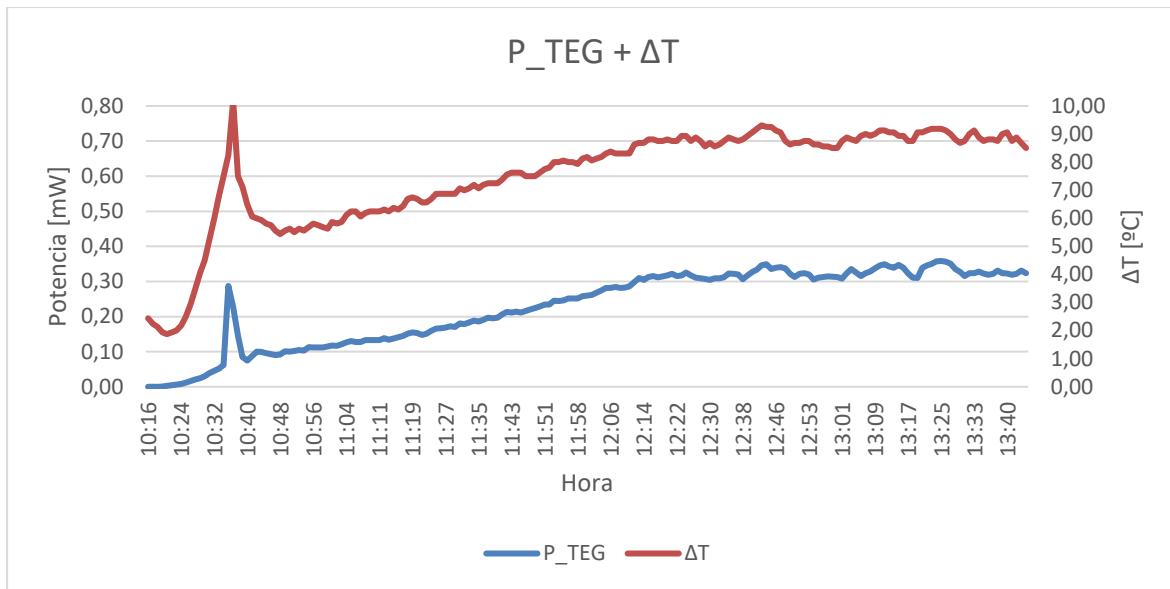


Figura 70: Potencia de TEG y diferencia de temperaturas del 01/07.

En cuanto a la potencia producida por el TEG, parece seguir la tendencia creciente de la irradiancia, pero se estanca entre los 0,03 y 0,04, un comportamiento que además ya hemos visto en algún otro día. El pico que se produce al principio del ensayo se debe a que es entonces cuando comienza a circular fluido por el colector.

Pero exceptuando el comentado pico de potencia producida, al tratarse de nuevo de un día en el que el caudal fue bastante constante, podemos ver que la potencia tiene una tendencia muy similar a la de la diferencias de temperaturas.

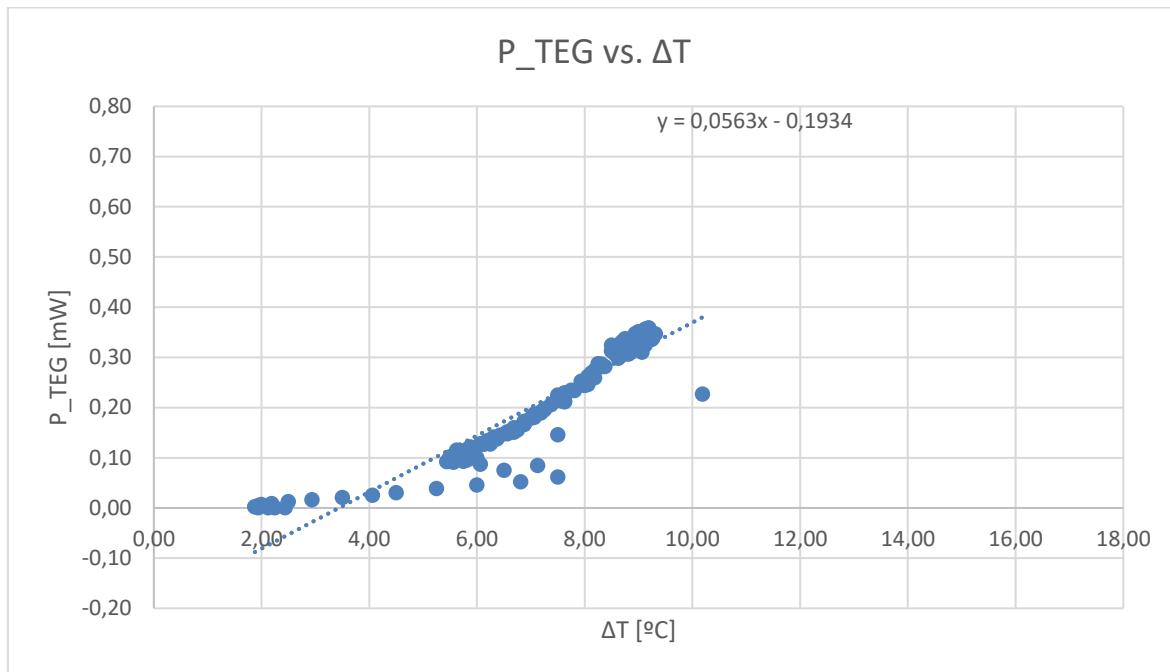


Figura 71: Potencia de TEG vs. Diferencia de temperatura del 01/07.

Por último, en la Figura 71, podemos observar una clara tendencia lineal de la potencia con la temperatura, pero que comienza a ser clara a partir de los 5 grados de diferencia de temperatura. Esto de nuevo refuerza la idea que algunos autores comentaban ya en la bibliografía estudiada, y es que el rendimiento de los módulos no es constante con todas las diferencia de temperaturas.



4. ANEXO IV: ENSAYOS EN BANCADA: NUEVA CONFIGURACIÓN.

Tras realizarse la instalación del radiador en el que irán alojados los módulos TEG en la bancada descrita en el Anexo I, se procede en este anexo a comentar los principales resultados.

4.1. ENSAYO 1.

El primer ensayo que se realizó fue con el radiador tal como se dejó tras la instalación por parte de Abora Solar, sin variar las condiciones de presión dentro de este. Con el depósito inicialmente frío, se expuso la bancada al sol y se procedió a conectar el sistema. A continuación se muestran los principales resultados.

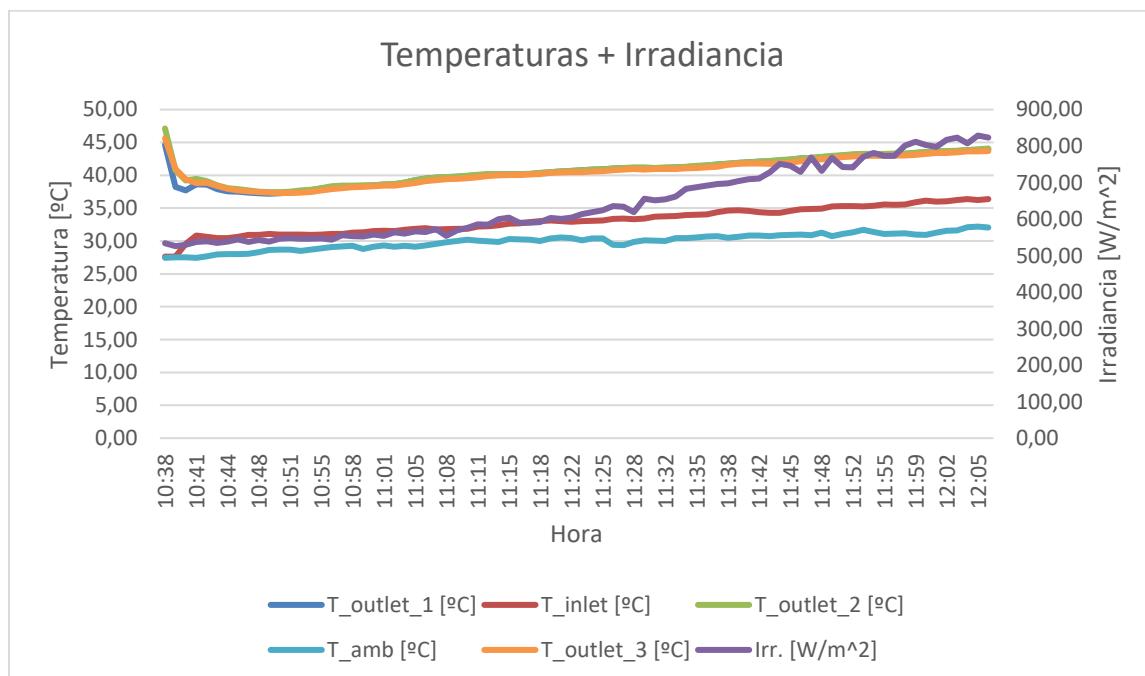
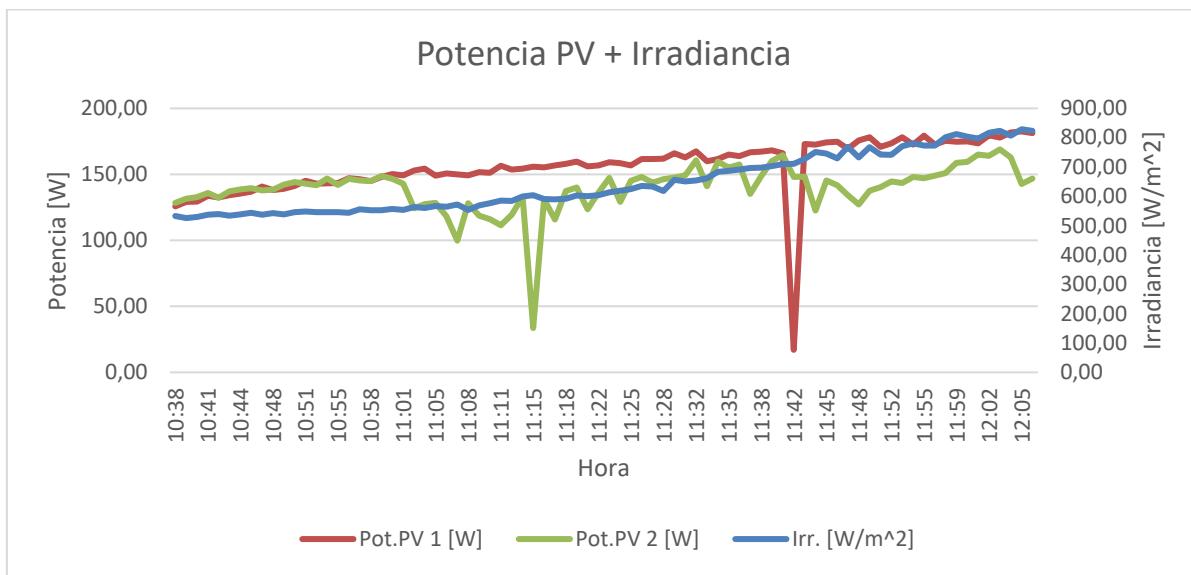


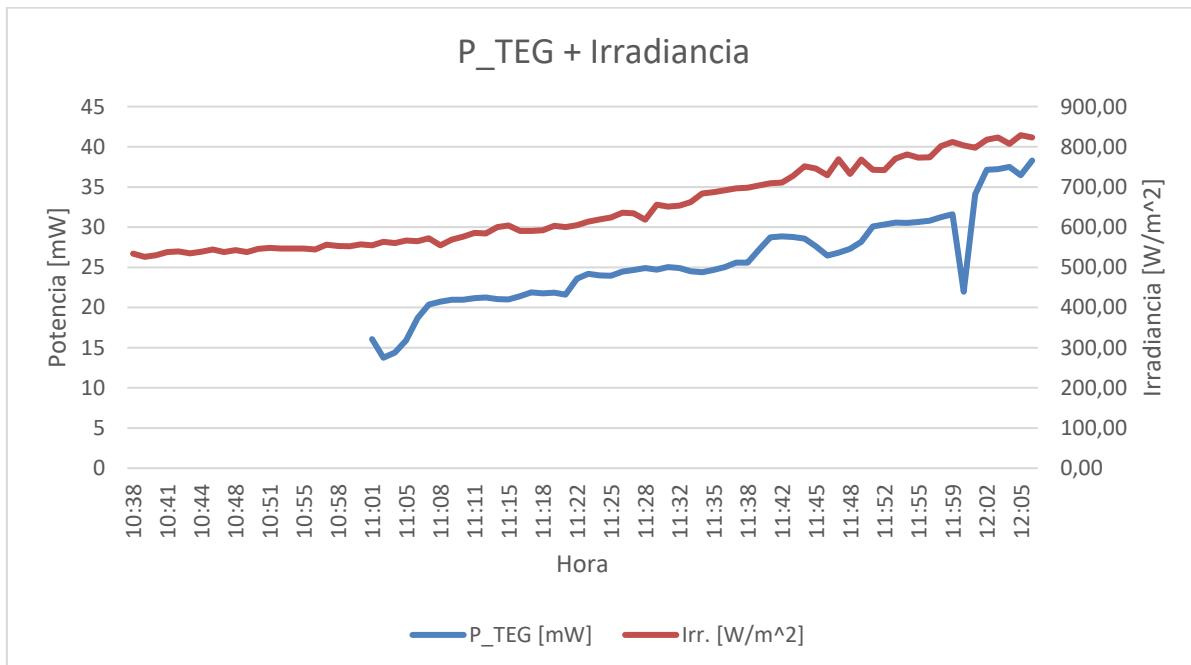
Figura 72: Temperaturas e Irradiancia del Ensayo 1 con la nueva configuración TEG.

Se puede apreciar un comportamiento lineal de las temperaturas y una irradiancia sin perturbaciones, ya se trataba de un día despejado.



En lo relativo a la potencia producida por los laminados fotovoltaicos, se puede observar un comportamiento algo extraño en el comportamiento de la potencia producida por el laminado fotovoltaicos N.º 2. Además se puede observar un error en la monitorización de la potencia PV 1, anteriormente visto en otros ensayos.

En lo relativo al comportamiento de los módulos TEG, se procede a mostrar las siguientes figuras que más tarde comentaremos.



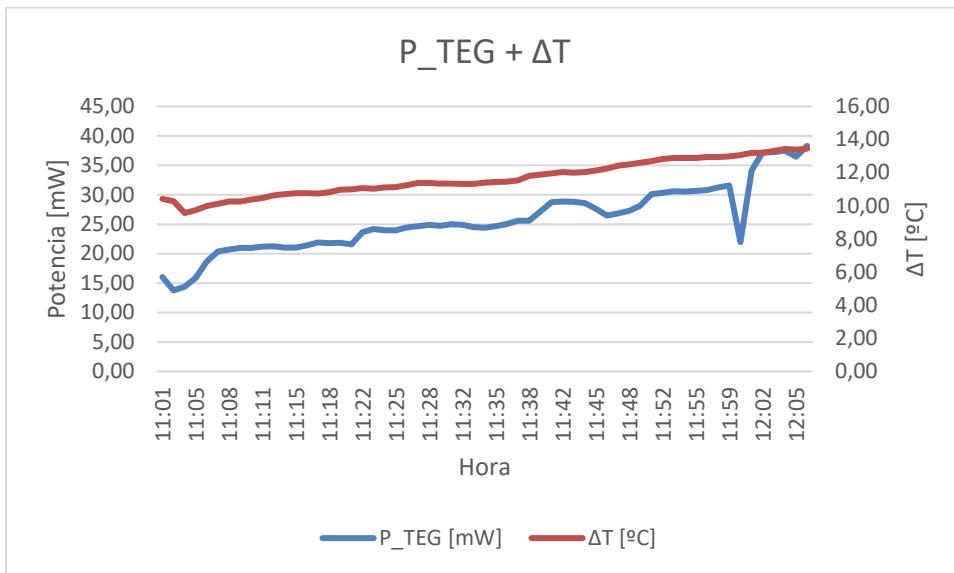


Figura 75: Potencia TEG y diferencia de temperatura del Ensayo 1 con la nueva configuración TEG.

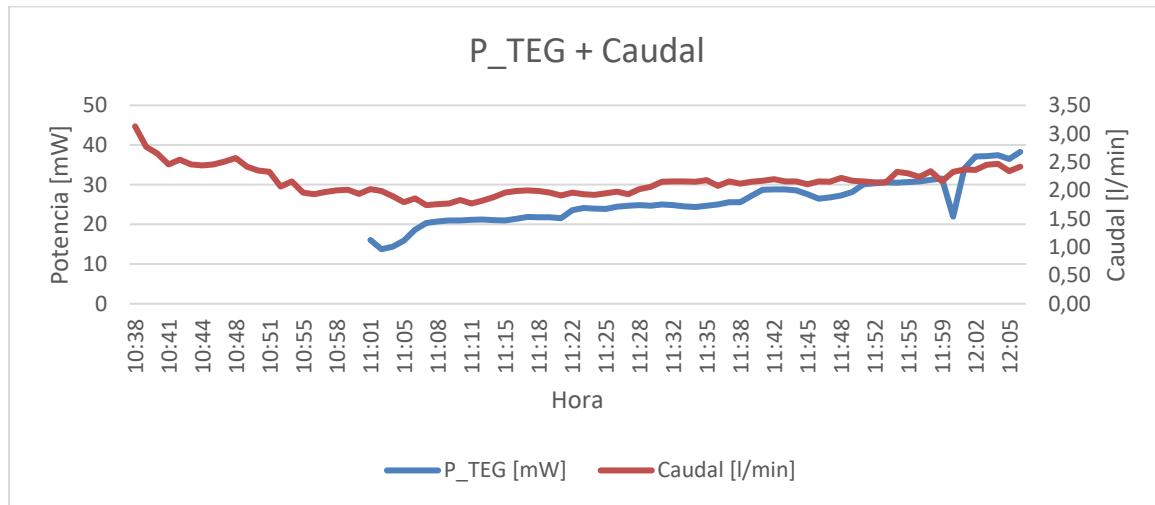


Figura 76: Potencia TEG y Caudal del Ensayo 1 con la nueva configuración TEG.

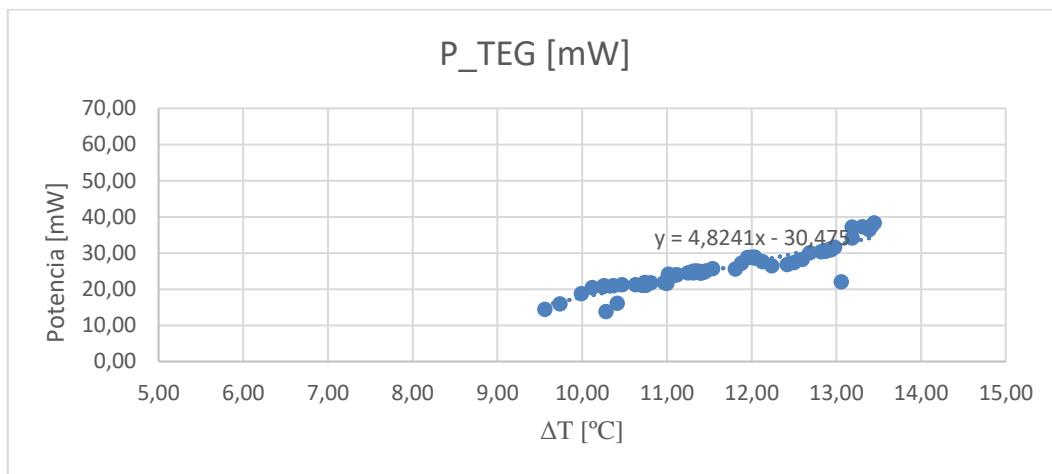


Figura 77: Potencia vs diferencia de temperatura del Ensayo 1 con la nueva configuración TEG.

Si se observan la figuras anteriores se puede ver un comportamiento bastante lineal de los módulos, con una potencia que presenta tendencia similar a las de la diferencia de temperaturas y a la de la irradiancia. Se observa un pequeño pico, pero no sabemos su origen.

Por último, cabe mencionar la Figura 77, en la cual se tiene potencia producida por los TEG frente a la diferencia de temperaturas. Se observa una tendencia bastante lineal. Si se añade una línea de tendencia de carácter lineal, obtenemos la siguiente ecuación:

$$y = 4,8241x - 30,475$$

[1](#)

Mediante la ecuación anterior, podremos comparar el comportamiento de los TEG en las distintas configuraciones estudiadas, pues la pendiente de la recta nos da idea del rendimiento de conversión energética (a mayor pendiente, mayor rendimiento y mejor ejecución de la solución).



4.2. ENSAYO 2.

En el siguiente ensayo, se procedió a variar la resistencia conectada en el circuito eléctrico desde 1 ohmio hasta los 0,0769 ohmios.

Resistencia [Ω]	Corriente [mA]	Tensión [V]	Potencia [mW]
1,000	210	0,24	50,40
0,500	320	0,21	67,20
0,330	395	0,20	79,00
0,250	440	0,19	83,60
0,200	465	0,17	79,05
0,160	500	0,17	85,00
0,140	555	0,16	88,80
0,125	620	0,16	99,20
0,110	650	0,15	97,50
0,100	690	0,14	96,60
0,090	730	0,13	94,90
0,083	760	0,13	98,80
0,077	830	0,14	116,20

Tabla 6: Variación de resistencia conectada y sus efectos en Ensayo 2 con la nueva configuración TEG.

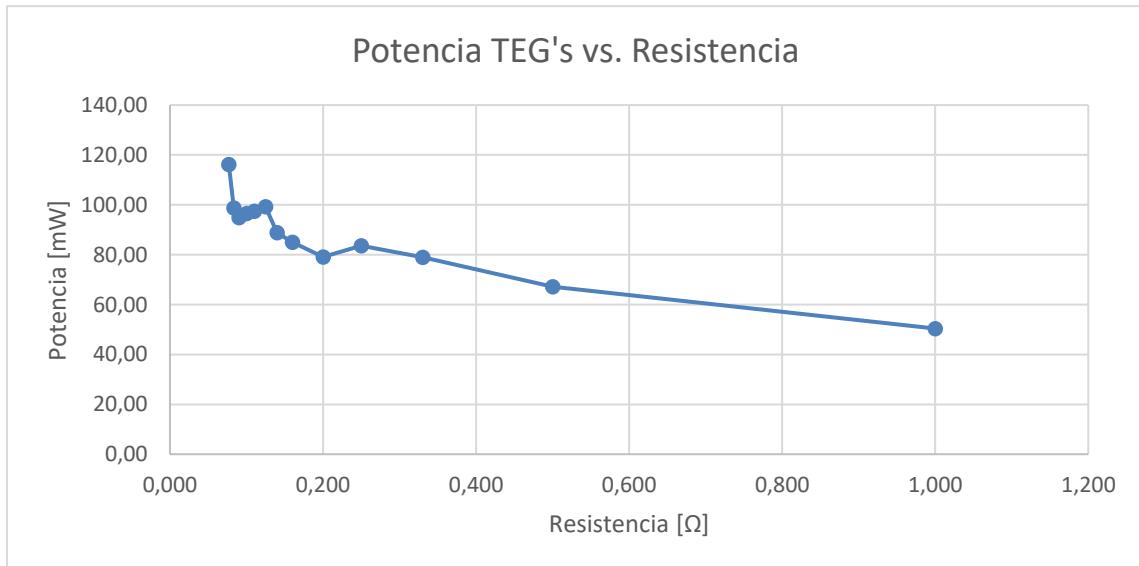


Figura 78:Potencia TEG vs Resistencia en Ensayo 2 con la nueva configuración TEG.

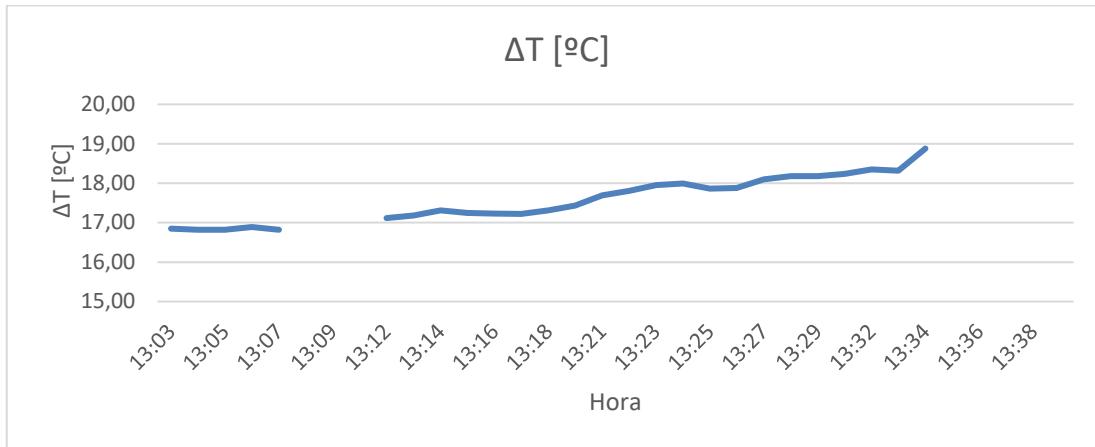


Figura 79: Variación de la diferencia de temperatura en el Ensayo 2 con la nueva configuración TEG.

El cambio en las resistencias se hizo mientras la bancada se encontraba en funcionamiento, es por ello por lo que se ha decidido mostrar también una figura con la evolución de la diferencia de temperatura durante este ensayo para dar cuenta de la poca variación que esta tiene (apenas 2º C) y justificar de esta manera que en este ensayo consideremos una diferencia de temperaturas ΔT constante.

En la Tabla 6 se muestran los resultados para todas las resistencias probadas. Para conseguir dicho valor de resistencia, se fueron añadiendo, una detrás de otra y en paralelo, resistencias de 1 ohmio. La representación de esa misma tabla se puede ver en la Figura 78. En ella observamos una mayor potencia a menor resistencia conectada existe. Con los medios disponibles, no se pudo disminuir más la resistencia, lo cual hace creer que se podría seguir aumentando la potencia a medida que se disminuye la resistencia.

4.3. ENSAYO 3.

Tras el ensayo anterior en el cual se comprobó que se produce una potencia mayor reduciendo la resistencia (aunque no se llegó a encontrar el MPP), se procedió a realizar un ensayo con el último nivel de resistencia conectado y que alcanzaba la mayor potencia. Se muestran a continuación los resultados.

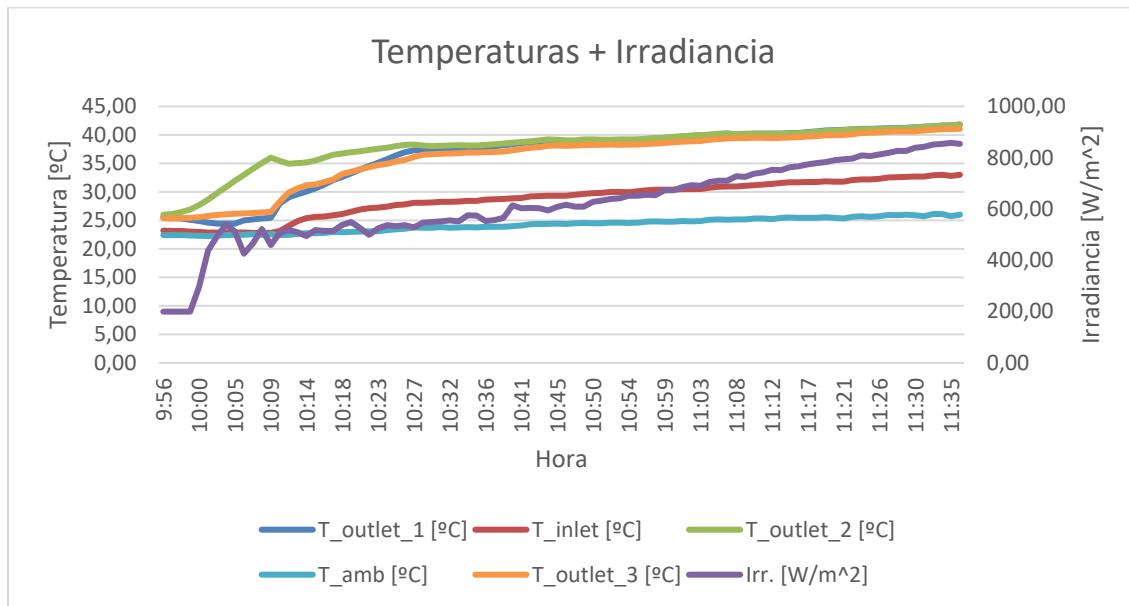


Figura 80: Temperaturas e Irradiancia del Ensayo 3 con la nueva configuración TEG.

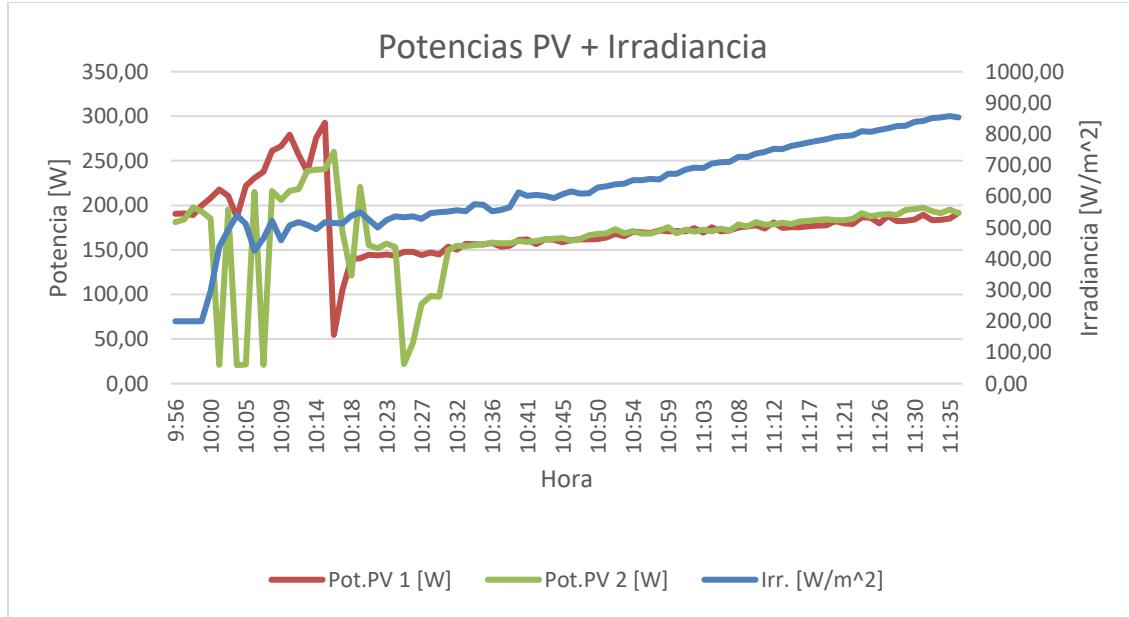


Figura 81: Potencias PV e Irradiancia del Ensayo 3 con la nueva configuración TEG.

En cuanto a la Figura 81 y la Figura 82, únicamente cabe mencionar un comportamiento errático en las potencias de los laminados fotovoltaicos, del cual desconocemos el origen. A continuación se muestran las figuras que describen el comportamiento de los módulos TEG.

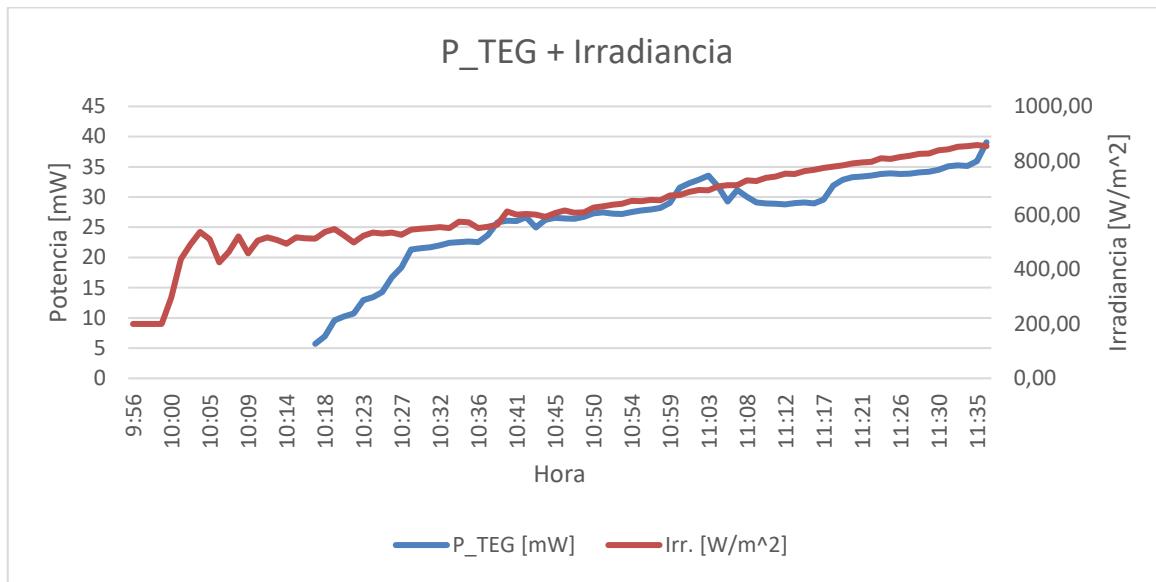


Figura 82: Potencia TEG e Irradiancia del Ensayo 3 con la nueva configuración TEG.

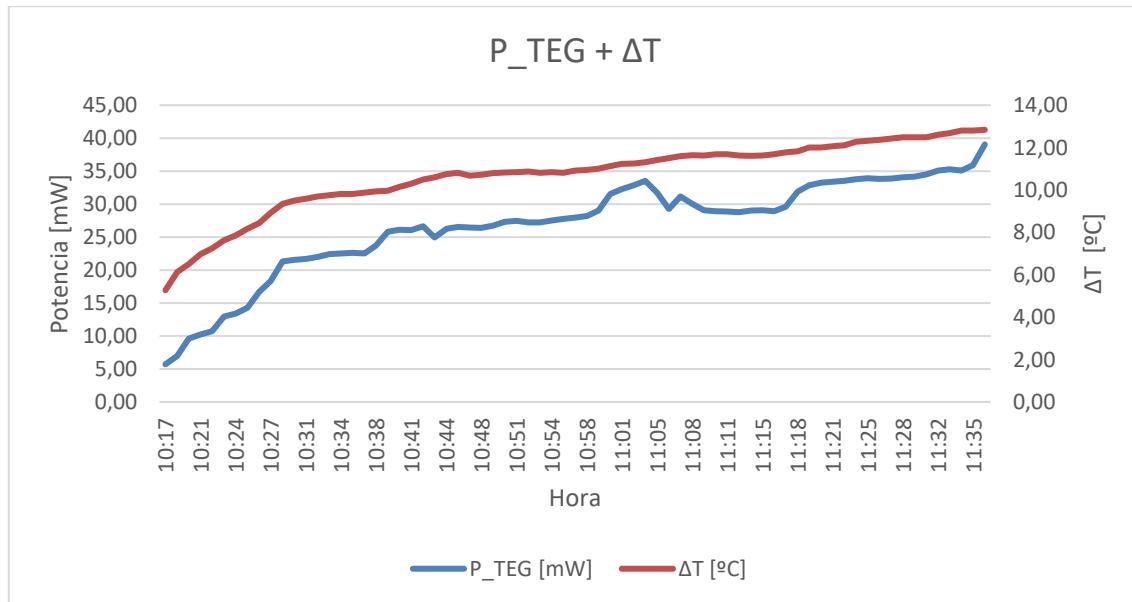


Figura 83: Potencia TEG y diferencia de temperatura del Ensayo 3 con la nueva configuración TEG.

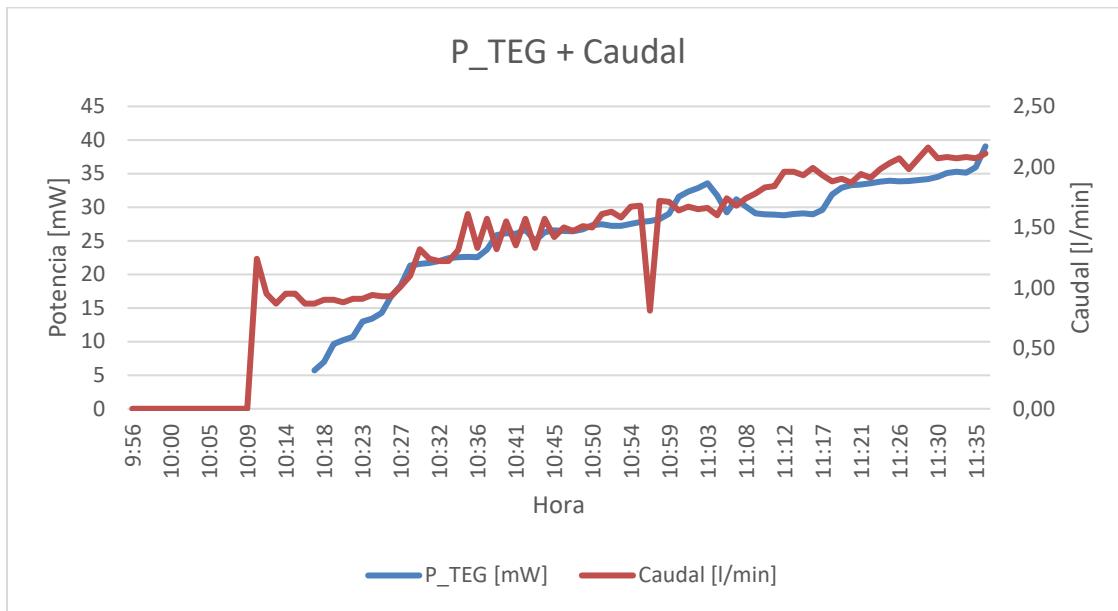


Figura 84: Potencia TEG y Caudal del Ensayo 3 con la nueva configuración TEG.

Si observamos las figuras anteriores podemos observar, como en el Ensayo 1, un comportamiento bastante uniforme, que sigue de manera fiel a la temperatura. Se puede observar un pico en el caudal pero este no afecta a la producción. Por último, se muestra potencia de TEG frente a diferencias de temperatura, junto con una regresión lineal acompañada de su ecuación.

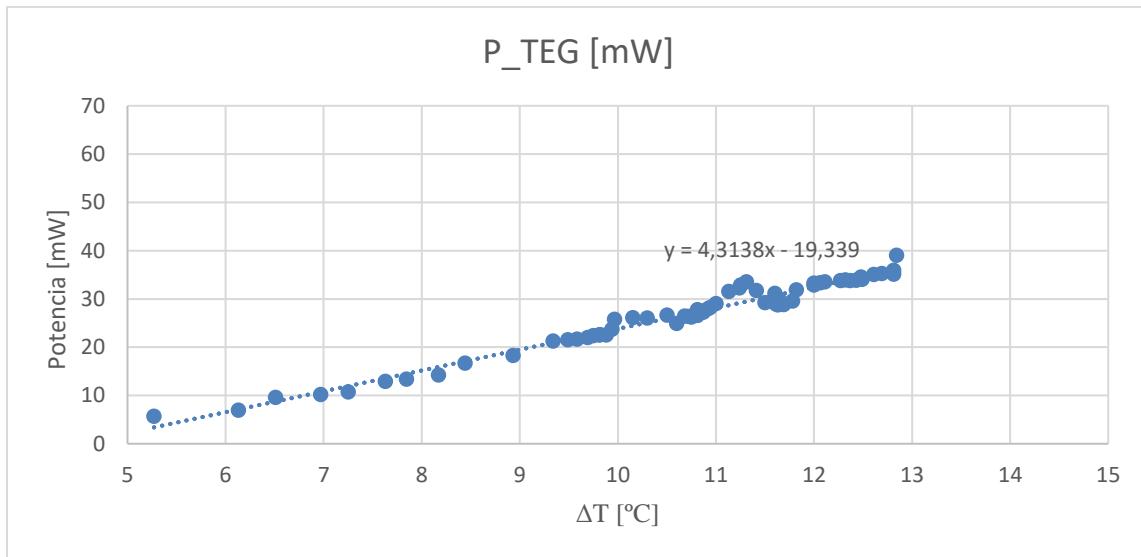


Figura 85: Potencia TEG vs. Diferencia de Temperaturas del Ensayo 3 con la nueva configuración TEG.



Observando la gráfica podemos obtener la ecuación de la recta:

$$y = 4,3138x - 19,339$$

Comparando esta ecuación con la Ecuación 1 se puede comprobar cómo se tiene un coeficiente de primero orden inferior, mientras que el término independiente ha aumentado en 10 unidades, lo cual viene a expresar una mejora en el rendimiento del sistema notable. El aumento en el coeficiente de primer orden se deba posiblemente a un censo de datos quizá algo escaso.

4.4. ENSAYO 4.

En el siguiente ensayo se va a comprobar las diferencias entre el comportamiento de la conexión eléctrica en serie o en paralelo. Este ensayo ya fue realizado en el Anexo II: Ensayo a los módulos TEG de manera aislada, obteniendo una mejor configuración en paralelo.

Para realizar este ensayo, simplemente se procedió a, en un momento dado, a cambiar el tipo de conexión. Debido a la lenta dinámica de la bancada, de nuevo en este ensayo consideraremos la diferencia de temperaturas en el radiador constante.

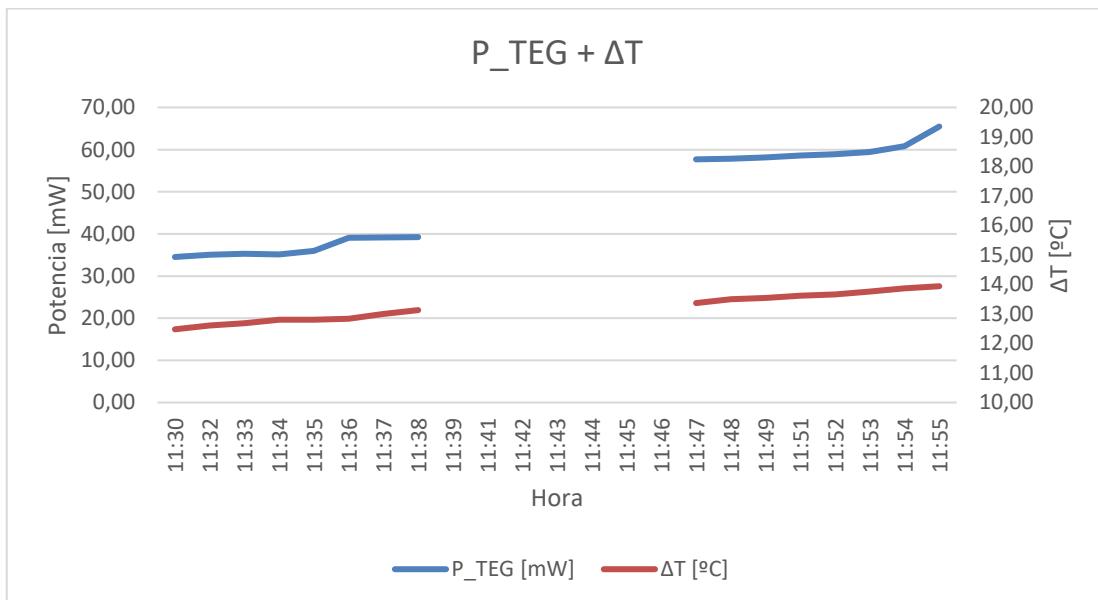


Figura 86: Potencia TEG y Diferencia de Temperaturas del Ensayo 4 con la nueva configuración TEG.



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

Tabla 7: Características de las disposiciones eléctricas.

A la vista de la Figura 86 y la Tabla 7, podemos comprobar como la configuración en serie produce una potencia notablemente superior. Además, se puede apreciar como la diferencia de temperaturas apenas presenta variación, por lo que podemos considerarla constante, como habíamos comentado anteriormente.

Comprobada la superioridad de la disposición eléctrica en serie, se procedió a dejar dicha conexión para el siguiente ensayo.

4.5. ENSAYO 5.

En este ensayo, se mantuvo la disposición eléctrica en serie, con una valor de resistencia conectada de 0,0769 ohmios. La principal característica de este ensayo consiste en la adición de aislamiento tal y como se muestra en las siguientes figuras.



Figura 87: Detalle del aislamiento en el radiador.

El objetivo de añadir este aislamiento no era tanto el evitar que el radiador perdiese su temperatura (lo cual no deja de ser importante para la eficiencia global del sistema), si no el aislar el foco frío del foco caliente, para de esa manera intentar generar una potencia mayor.

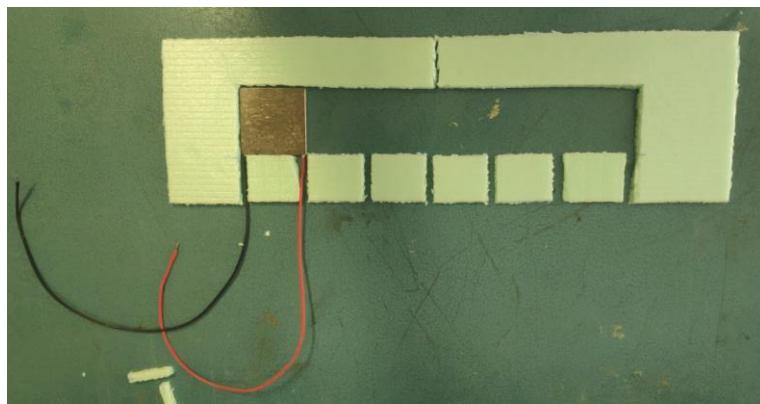


Figura 88: Detalle del aislamiento del radiador.

A continuación se presentan los resultados.

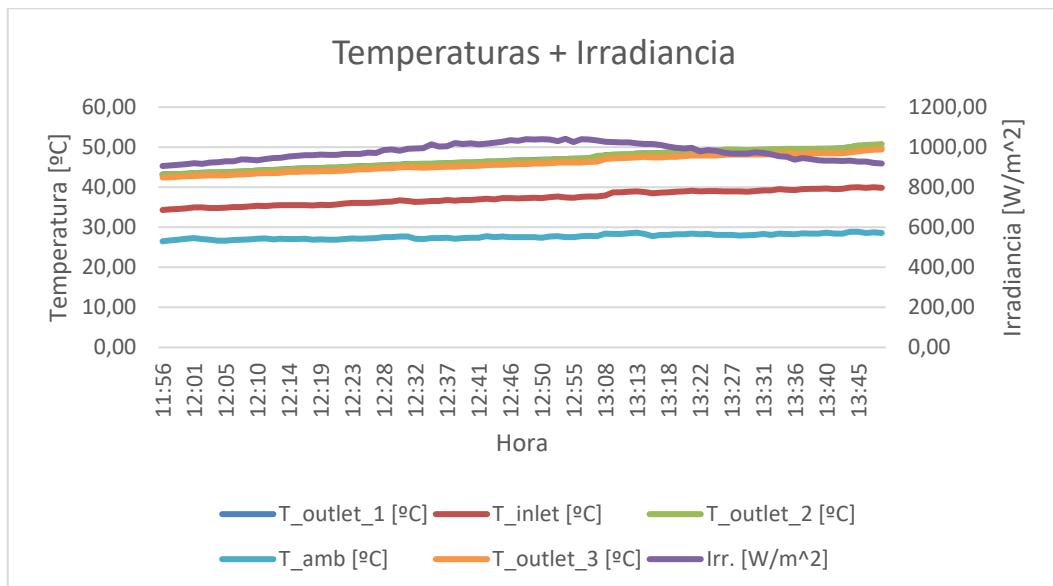
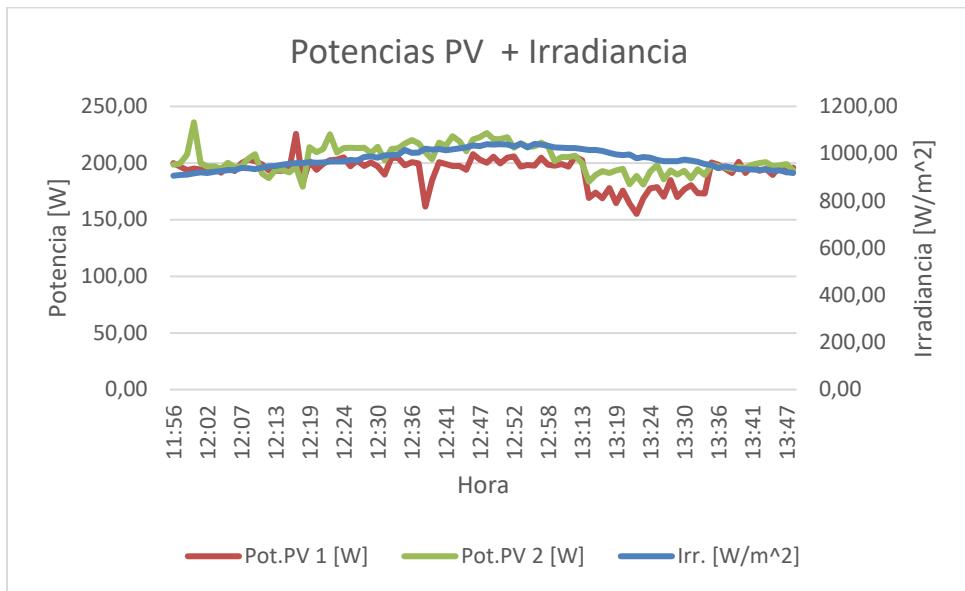
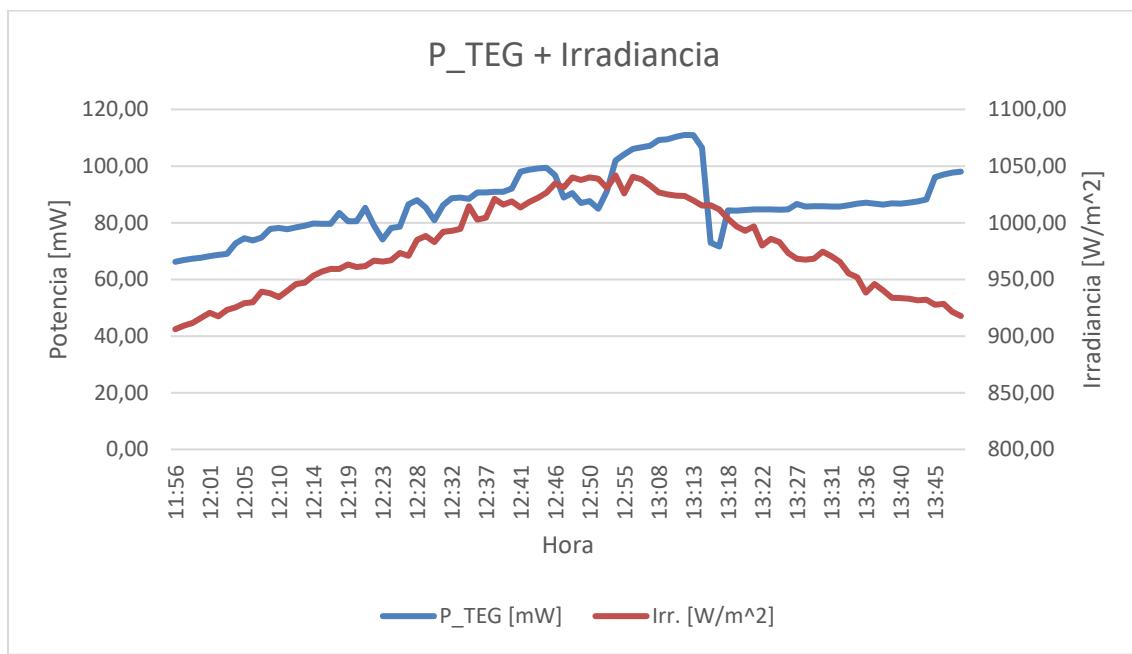


Figura 89: Temperatura e Irradiancia del Ensayo 5 con la nueva configuración TEG.



En lo relativo a la Figura 89 y la Figura 90, se observa un funcionamiento normal y sin nada destacable.



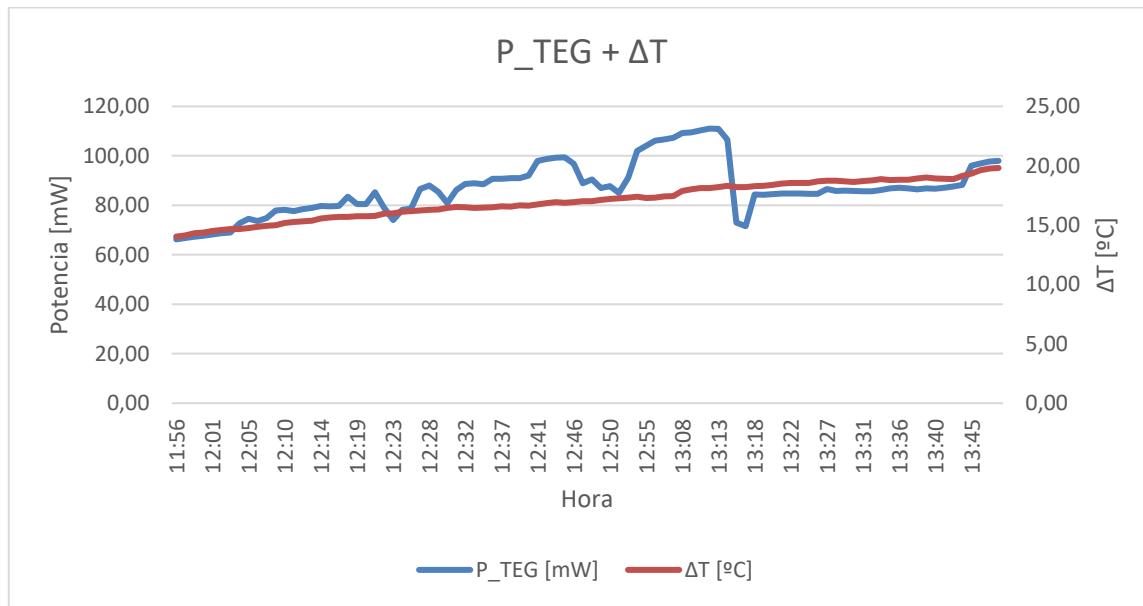


Figura 92: Potencia TEG y Diferencia de Temperatura del Ensayo 5 con la nueva configuración TEG.

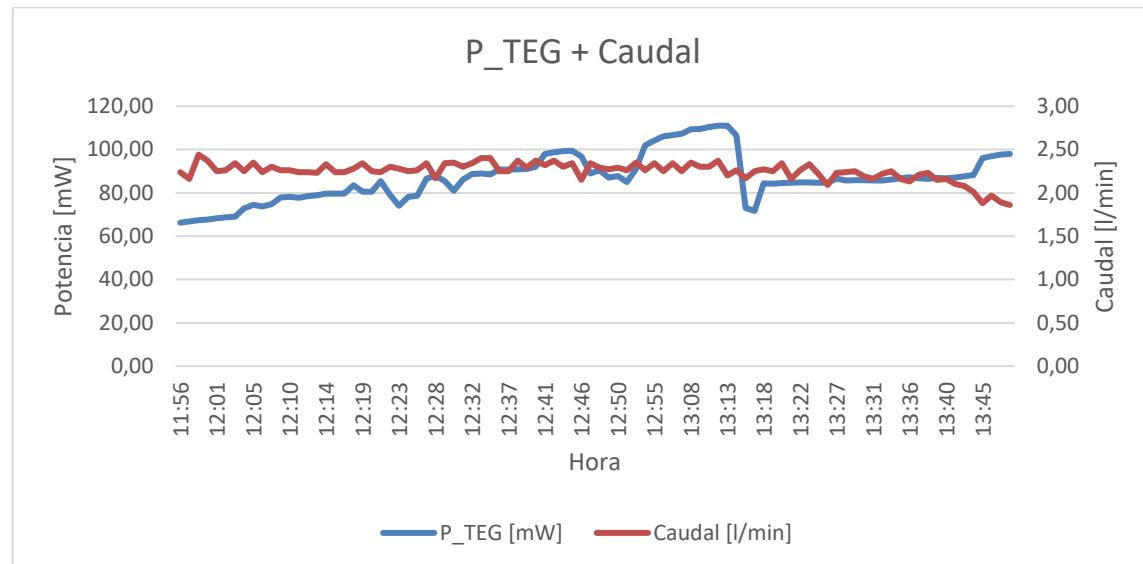


Figura 93: Potencia TEG y Caudal del Ensayo 5 con la nueva configuración TEG.

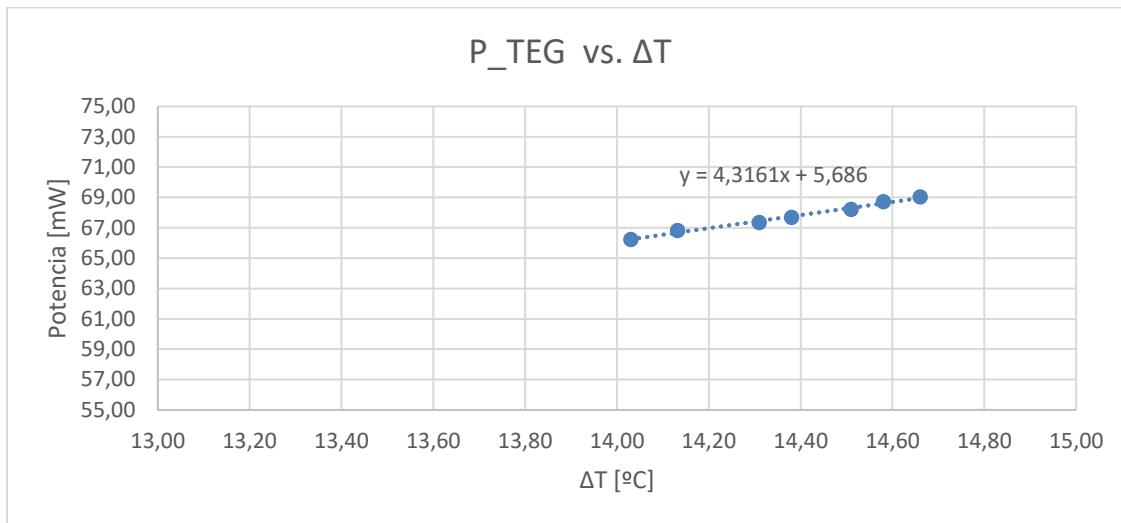


Figura 94: Potencia TEG vs. Diferencia de Temperatura del Ensayo 5 con la nueva configuración TEG.

Si observamos la Figura 91, Figura 92, y Figura 93, podemos observar un funcionamiento de los módulos TEG bastante normal, sin ningún elemento a destacar.

Por otro lado, es de especial interés la Figura 94, donde podemos ver la potencia producida por los módulos frente a la diferencia de temperaturas que se presentaba en el radiador. Además, de nuevo, se realizó una línea de tendencia de carácter lineal, obteniendo la siguiente ecuación:

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

3

Comparando de nuevo esta ecuación con las obtenidas en los ensayos 1 y 3 (Ecuaciones 1 y 2), podemos observar como el primer coeficiente es prácticamente similar, pero el término independiente aumenta notablemente, incluso pasando a ser positivo. Esto de nuevo demuestra una mejora en el rendimiento de conversión de energía del sistema.

4.6. ENSAYO 6

Por último, se realizó un ensayo en el cual se aumentó el par de apriete de todos los tornillos hasta tener en cada uno de ellos **un par de 5 N/m**. Esta operación se realizó mediante una llave dinamométrica adquirida exprofeso para esta labor, y se realizó a lo largo de la mañana, es decir, no fue inmediato. El motivo para la realización de este ensayo es la gran variación en la producción de potencia que se observó en anteriores ensayos a menor escala (Anexo II). A continuación se presentan los resultados más interesantes.

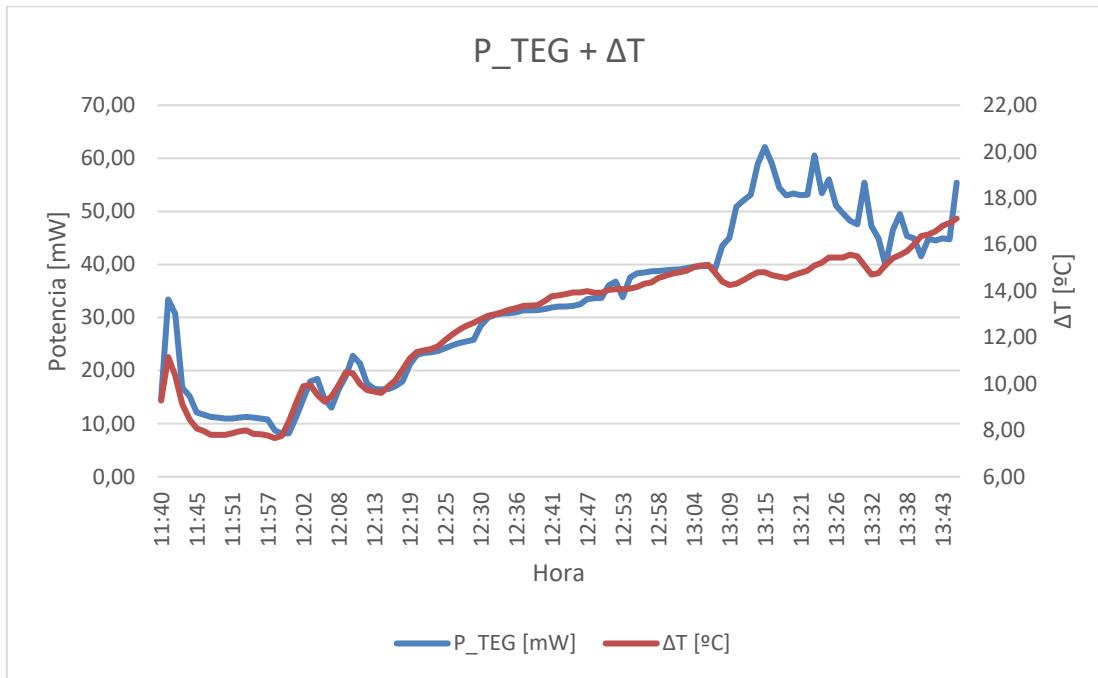


Figura 95: Potencia TEG y Diferencia de Temperaturas del Ensayo 6 con la nueva configuración TEG.

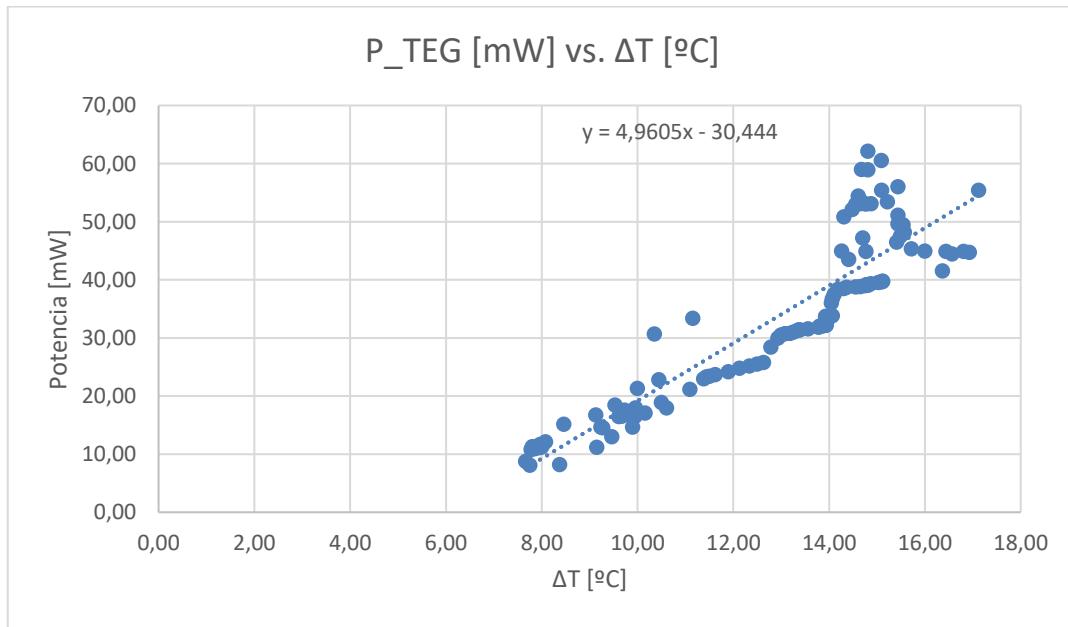


Figura 96: Potencia TEG vs. Diferencia de Temperatura del Ensayo 6 con la nueva configuración TEG.

A la vista de las figuras anteriores, se puede observar cómo, al no ser una operación instantánea, la diferencia de temperaturas varió a lo largo del ensayo, es por ello por lo que debemos fijarnos en ella también.



En la Figura 96 podemos observar como la producción de energía sigue de manera fiel a la diferencia de temperatura, aunque llega un momento en el que la producción se dispara. Esto puede ser debido a conseguir justo en ese momento el par de apriete ideal.

Además, se muestra la producción de potencia frente a la diferencia de temperaturas, con su regresión lineal como en anteriores ensayos. Se obtiene la siguiente ecuación de la regresión lineal:

$$y = 4,9605x - 30,44$$

4

Esta ecuación mejora el término de primer orden obtenido anteriormente, sin embargo disminuye notablemente el término independiente.



5. ANEXO V: CIRCUITO HIDRÁULICO.

En el presente anexo se adjuntan el circuito hidráulico de la bancada experimental presente en la Universidad de Zaragoza y objeto de este trabajo. Se presentan tanto el estado inicial como el estado después de la modificación.

5.1. CIRCUITO HIDRÁULICO INICIAL.

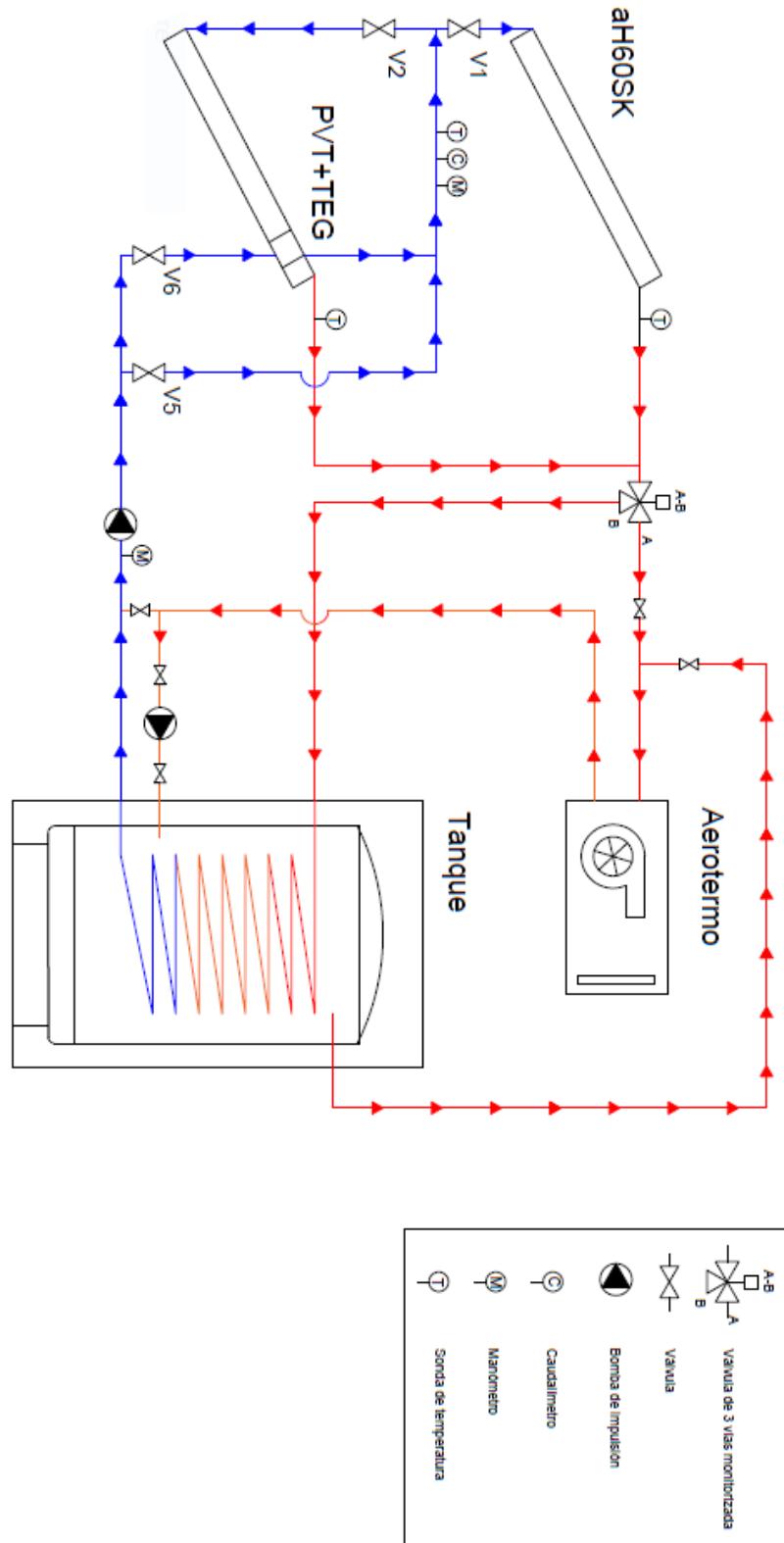


Figura 97: Circuito hidráulico inicial [20].

5.2. CIRCUITO HIDRÁULICO TRAS MODIFICACIÓN

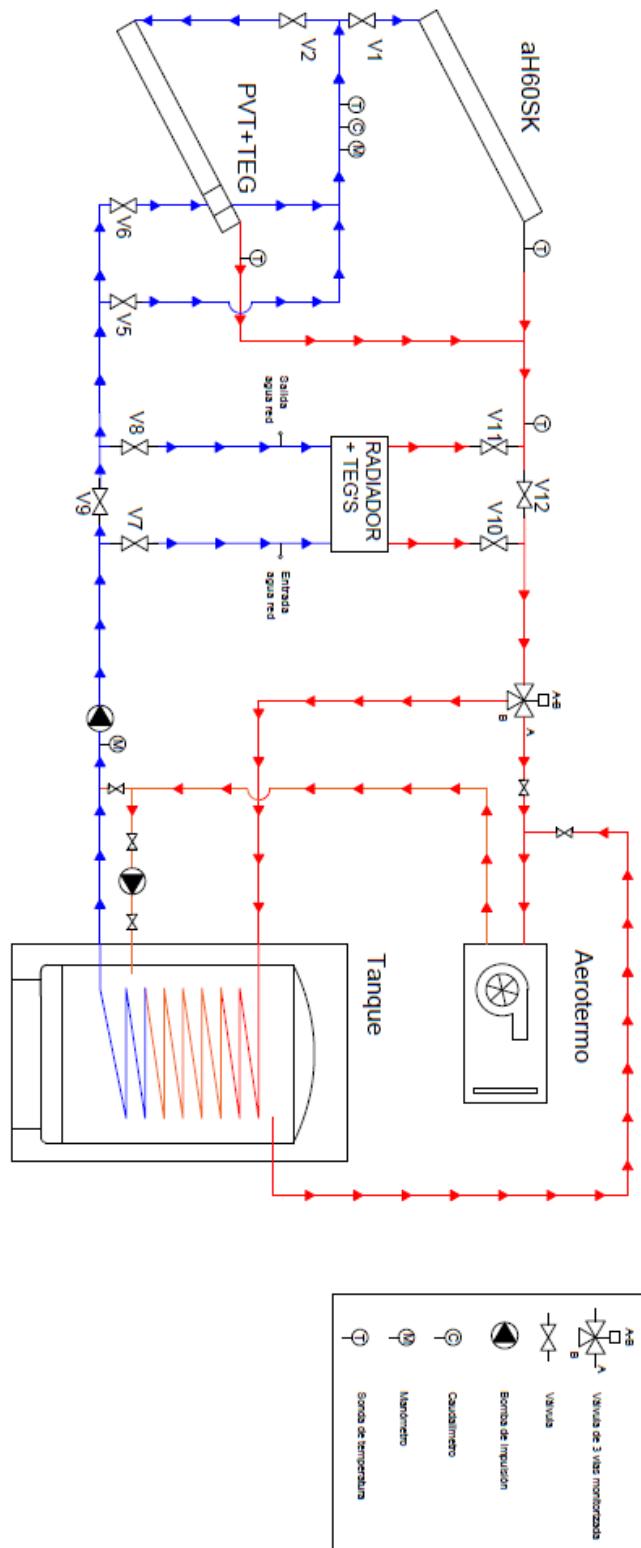


Figura 98: Circuito hidráulico tras la modificación.



6. ANEXO VI: SIMULACIONES EN TRNSYS.

En el siguiente anexo se proceden a dar idea al lector de las simulaciones llevadas a cabo en el software TRNSYS. Estas simulaciones han sido llevadas a cabo para extraer los resultados obtenidos en los ensayos a casos más extensos.

TRNSYS es un programa de simulación orientado a la simulación dinámica de sistemas de energías renovables. En él, se emplean los denominados Types: elementos que incorporan las ecuaciones que rigen el comportamiento del elemento al que tratan de simular. Estos types pueden ser relacionados entre ellos mediante sus *inputs* y *outputs*. Esto permite una escalabilidad en los sistemas a simular, con lo que se pueden llegar a simular sistemas con varios elementos de una manera gráfica, visual y sencilla.

De cara a poder realizar no solo comparaciones con un sistema convencional PVT, sino que también con sistemas puramente fotovoltaicos o térmicos, se han realizado distintos archivos de simulación:

- Simulación sistema fotovoltaico.
- Simulación sistema solar térmico.
- Simulación sistema PVT.
- Simulación sistema PVT+TEG.

A continuación se procede a describir los diversos archivos de simulación explicando su funcionamiento y al final se presentarán los resultados.

6.1. SIMULACIÓN SISTEMA COLECTORES FOTOVOLTAICOS.

El primer archivo de simulación que se creó (debido a su mayor simplicidad) fue el que representa una instalación fotovoltaica simple con la presencia de un inversor.

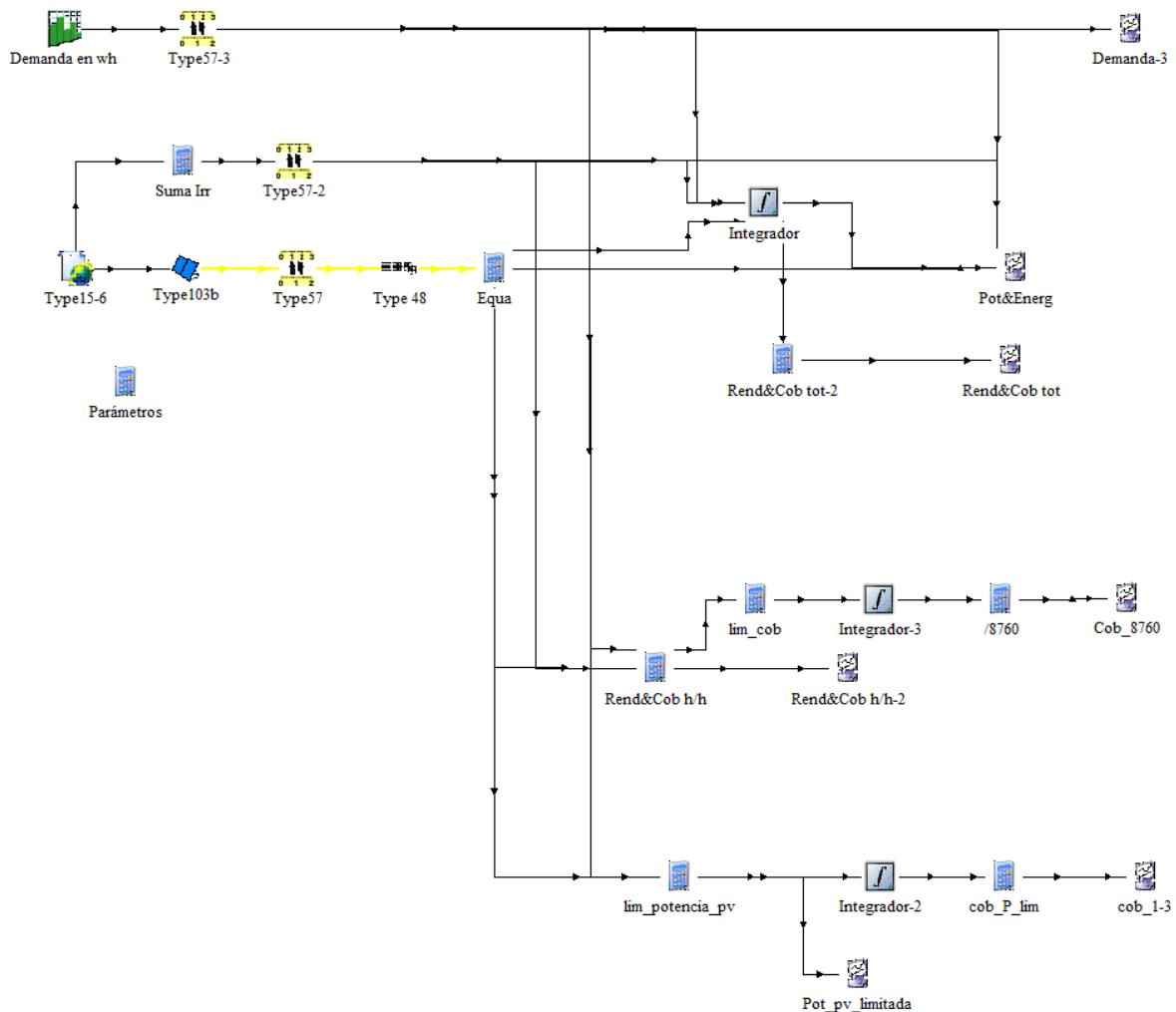


Figura 99: Trnsys del sistema fotovoltaico.

Para calcular parámetros como la cobertura, fue necesario introducir una demanda eléctrica. Dicha demanda eléctrica fue extraída del Trabajo de Fin de Grado de Antonio Carnicer Salvo [14].

Dentro del archivo de simulación creado, se puede observar una parte superior en la que se muestran, en una gráfica las potencias (de demanda, producida...) juntos con su sumatorio temporal (energía) y en otra la cobertura y el rendimiento obtenido.

Tras observar detenidamente el comportamiento del sistema, se constató que la cobertura eléctrica estaba siendo calculada de manera errónea, sin tener en cuenta el carácter temporal de la demanda. Es por ello por lo que se añadió al sistema la parte inferior, en la que se calculaba la cobertura de dos maneras distintas: una limitando la potencia producida a, como máximo, la potencia demandada (y una vez entonces integrando y operando); y otra en la cual se calcula la cobertura hora a hora, se limita a un máximo de 1, y entonces se integra y opera.

Estos dos últimos métodos parecen ser óptimos para describir el comportamiento real del sistema, pues arrojan los mismo resultados, siendo estos inferiores (pero realistas) a los que se obtienen simplemente haciendo una integración de demanda y producción y dividiendo. Más adelante en este mismo anexo se muestran ambos resultados, calculados de las dos formas.

6.2. SIMULACIÓN SISTEMA COLECTORES TÉRMICOS

Otro de los sistemas de los cuales se creó un archivo de simulación es del sistema de colectores térmicos, sistema al que se incluyó un aerotermo que deriva el circuito primario cuando se encuentra en situaciones de sobrecalentamiento, un depósito, tuberías para la canalización del agua y elementos de control.

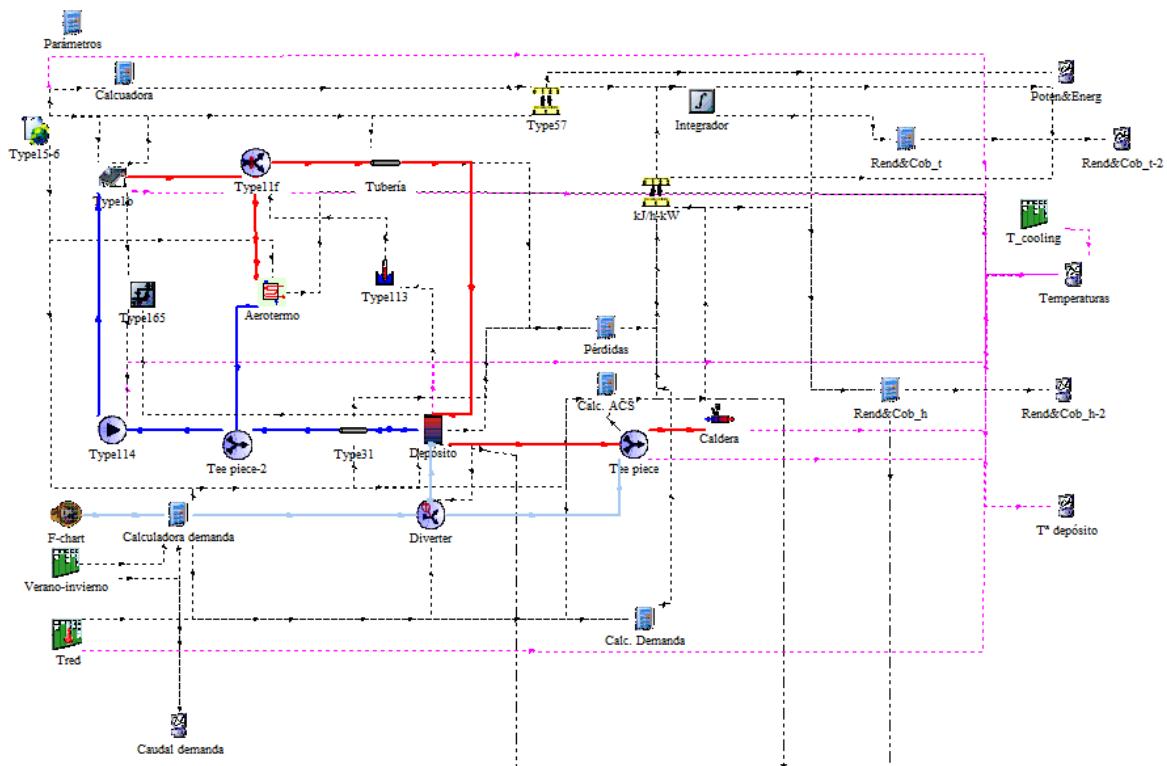


Figura 100: Trnsys del sistema térmico

En el esquema gráfico de la Figura 100 se puede apreciar en colores rojo/azul las tuberías que llevan el agua caliente/fría. Esta agua es bombeada por el type 114 que caracteriza una bomba, pasa por el type 1b (type de colector térmico). Posteriormente se encuentra un derivador del flujo (type11f) controlado por una señal de control, que es emitida por el type 113 (control que compara la temperatura de arriba del depósito con la máxima establecida). Los types "tubería" calculan las pérdidas de carga, térmicas... Tras llegar al depósito, el agua de la parte baja del depósito es bombeada de nuevo.

Por otro lado, en el type "f-chart" se ha introducido el perfil horario de demanda de agua, y en la posterior "calculadora de demanda", teniendo en cuenta el tipo de edificio, habitaciones, coeficientes de simultaneidad... Además, se añadió un coeficiente de ocupación verano-invierno, para representar la poca ocupación de los edificios en períodos estivales.

El caudal calculado pasa por un type "diverter", que comunica con el depósito y extrae la cantidad de agua (caliente) necesaria. En el caso de que el depósito supere la temperatura de demanda, las válvulas actúan de tal manera que se extrae el agua de depósito necesaria para alcanzar la temperatura, y el resto de demanda se aporta del agua de red. En el caso de que el depósito no alcanza la temperatura de demanda, todo el agua es extraída del depósito y la temperatura acaba de alcanzarse mediante un equipo auxiliar, en este caso, una caldera.

Con la información que dan los diversos type de temperaturas y caudal se puede calcular las demandas energéticas, y con ello, finalmente podemos obtener parámetros como coberturas, rendimientos...

Una vez realizados los cálculos se han incluido también representaciones del caudal de demanda, temperaturas de depósito (para comprobar la estratificación), coberturas y rendimientos horarios, coberturas y rendimientos totales...

Por otro lado, se ha añadido, como en el caso fotovoltaico anterior, otra manera de calcular la cobertura, así como una comprobación de la potencia de demanda para la verificación del funcionamiento de uno de los types.

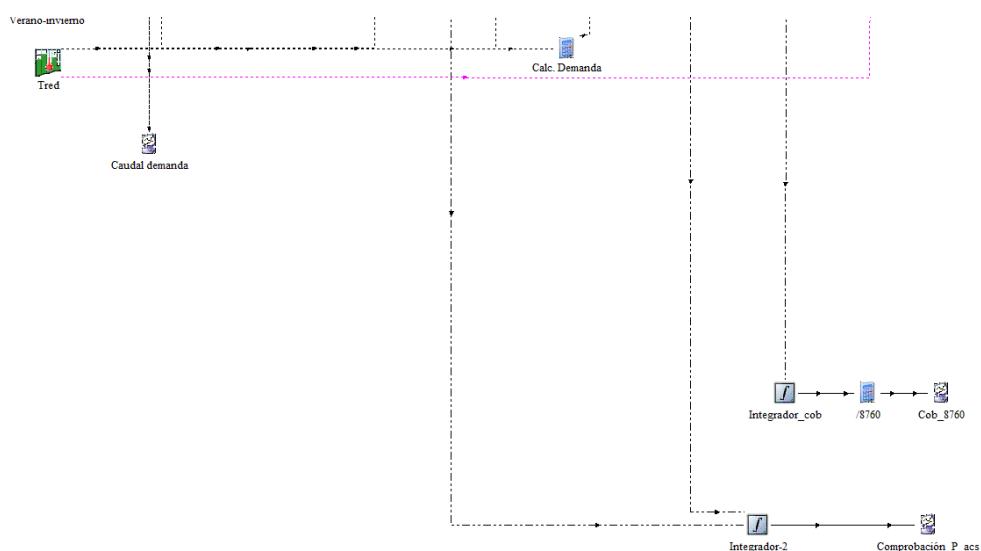


Figura 101: Detalle del Trnsys de sistema térmico.

En el caso del sistema Trnsys térmico, la cobertura no varía tanto si se calcula de manera total comparada con el cálculo en el que se calcula de cobertura, se limita, se integra y se divide (se puede comprobar más adelante en los resultados). Esto se debe al efecto del depósito, que consigue acabar con ese desfase entre demanda y oferta mediante el almacenamiento de energía, al contrario que en el caso fotovoltaico, en el cual no existía ningún tipo de almacenamiento y por lo tanto no se podía evitar el desfase entre demanda y oferta.

6.3. SIMULACIÓN SISTEMA COLECTORES PVT.

En el archivo de simulación de los colectores PVT se tiene un sistema más complejo, pues se unen los elementos térmicos con los eléctricos. En la Figura 102 se pueden diferenciar las dos grandes partes de archivo de simulación.

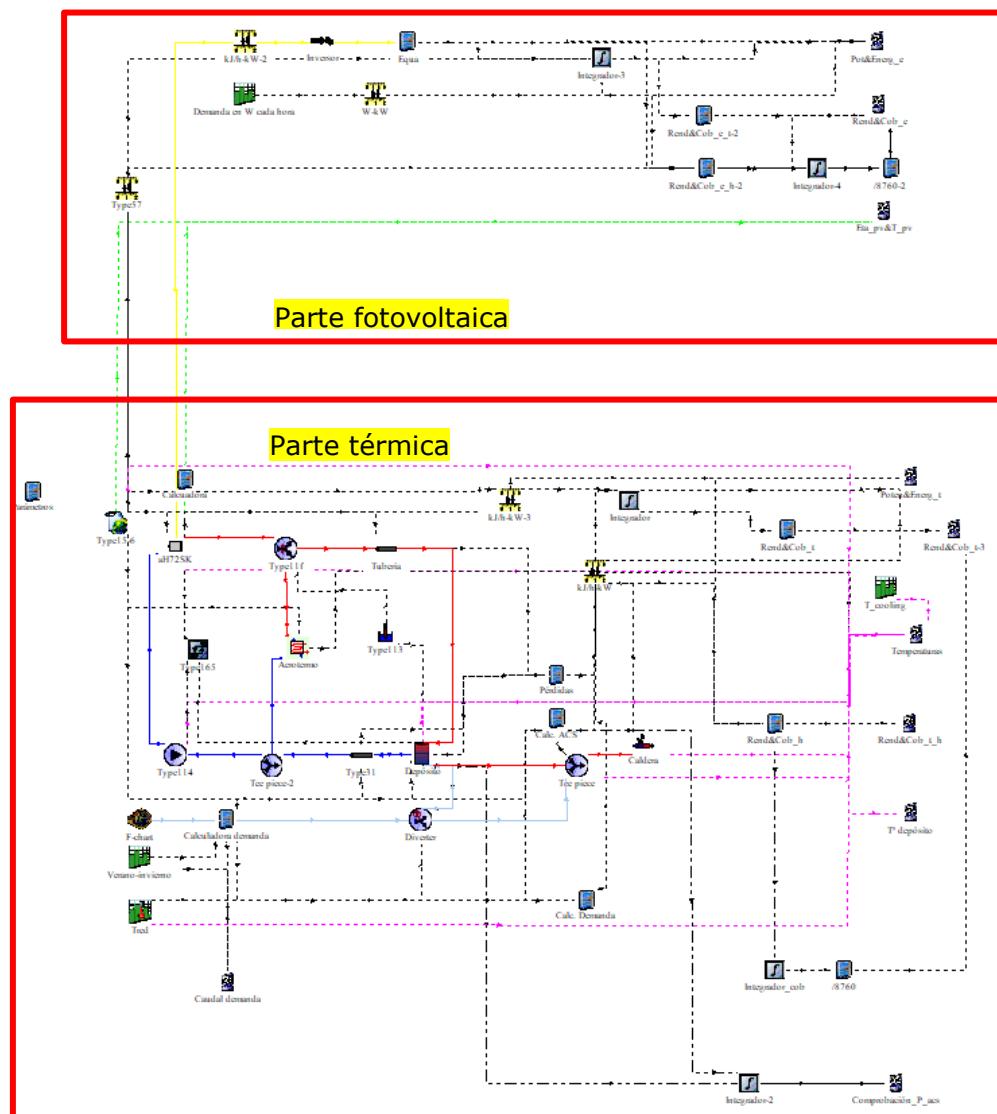


Figura 102: Trnsys del sistema PVT.

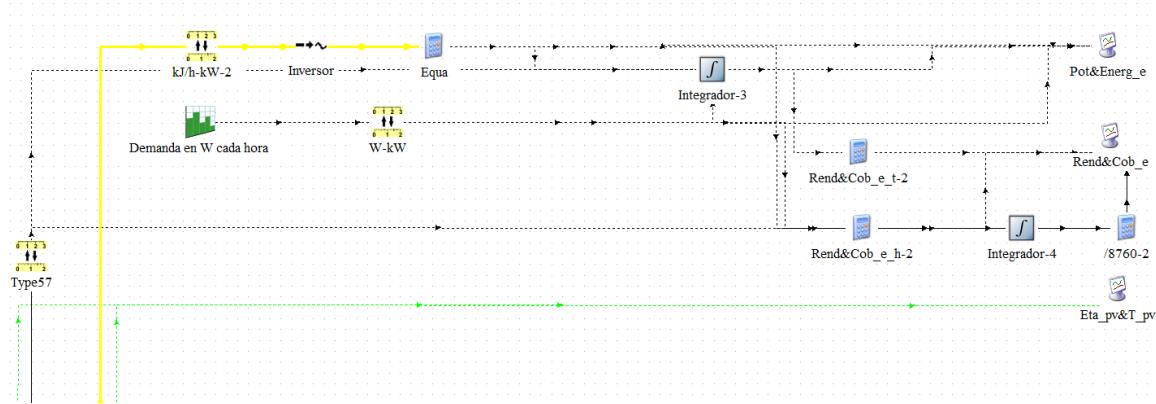


Figura 103: Detalle parte eléctrica del Trnsys del sistema PVT.

En el caso del sistema PVT, tanto la energía térmica como la eléctrica es producida por el type aH72 SK, type que reproduce el comportamiento de un panel solar híbrido. La energía eléctrica es llevada a un Inversor (con sus debidos cambios de unidades) y junto con la demanda se calculan potencias producidas, demandadas, sus integraciones (es decir, la energía tota) y parámetros como rendimiento y cobertura.

De nuevo en este caso se ha calculado la cobertura, además de usando los integradores totales, empleando el método de calcular la cobertura horaria, limitarla, integrarla y dividirla (entre 8760). De esta manera, como para el caso únicamente fotovoltaico, se obtiene una cobertura menor, pero más realista, pues se tiene en cuenta el desfase entre la demanda y la producción.

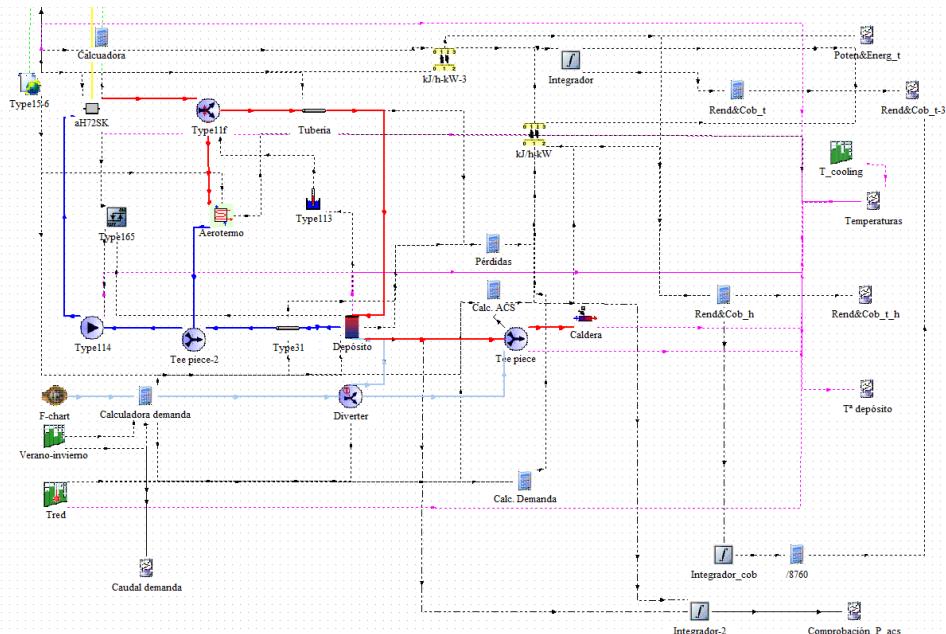


Figura 104: Detalle parte térmica del Trnsys del sistema PVT.

En cuanto a la parte térmica, se tiene un sistema similar al visto en el Trnsys puramente térmico, con representaciones de demandas, temperaturas, potencia, energías y rendimientos y coberturas (añadiendo el cálculo de esta con el método anteriormente descrito).

6.4. SIMULACIÓN SISTEMA COLECTORES PVT+TEG.

En cuanto a la simulación del último sistema, el sistema PVT+TEG, debemos añadir un elemento que nos calcule la producción de los módulos TEG. Para alcanzar este objetivo, se ha optado por incluir un *type* de tipo calculadora y dentro de este incluir la mejor ecuación de primer orden obtenida tras los ensayos realizados en el Anexo IV (Ecuación 3) y extrapolada para el caso de 12 módulos por radiador (pues son los que pueden caber en este) y un radiador en cada colector.

A este *type* debemos añadirle dos entradas: la temperatura de agua a la salida y a la entrada de los colectores. Por otro lado, tendremos como salida la producción de potencia, la cual será empleada, junto con otros datos del programa, para calcular parámetros como rendimientos, coberturas...

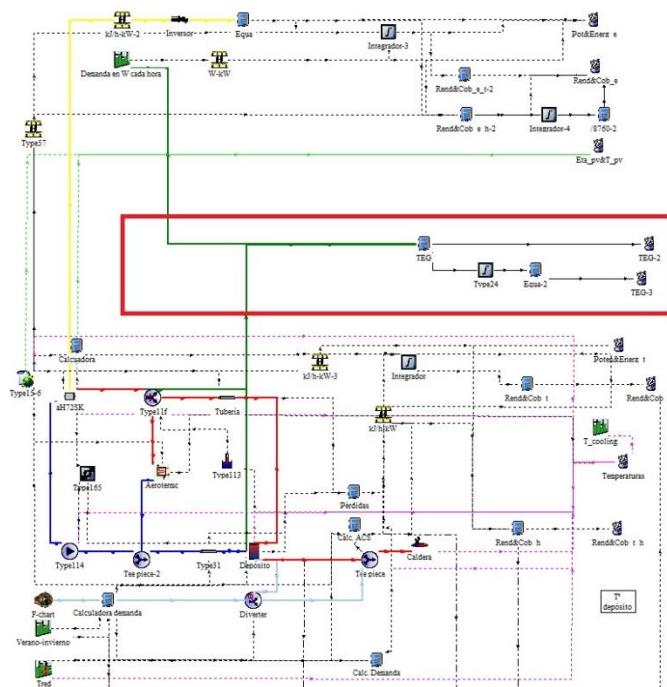


Figura 105: Detalle del sistema PVT+TEG.

En la Figura 105 se puede apreciar (en el rectángulo rojo) las entradas a la calculadora que provienen de la salida de paneles y de la salida de depósito, así como la entrada de la demanda eléctrica para calcular coberturas.



6.5. RESULTADOS.

Para las simulaciones, se emplearon los datos de consumos de electricidad y ACS, así como el número de paneles (ya sean fotovoltaicos, térmicos o PVT) y otros elementos presentes en el trabajo de Antonio Carnicer Salvo [14].

En primer lugar, se analiza el efecto de la adición de 8 módulos fotovoltaicos de características similares a los laminados fotovoltaicos presentes dentro del PVT. La cobertura eléctrica obtenida con dicha instalación es de 53,79%, con un rendimiento de 16,78%.

	Rendimiento (%)	Cobertura eléctrica (%)
Inst. Fotovoltaica	16,78	53,79

Tabla 8: Resultados simulación Trnsys Solar Fotovoltaico.

En el caso de los colectores solares térmico (ST), se simulan 8 colectores térmicos, con las mismas especificaciones térmicas que el aH 60 [3]. Se obtienen los siguientes resultados. Se debe tener en cuenta que, en este caso, los paneles se emplean únicamente en la generación de ACS, por lo que la cobertura que se menciona a continuación es respecto a dicha generación.

	Rendimiento colector (%)	Cobertura térmica (%)
Inst. Térmica	30,11	39,54

Tabla 9: Resultados simulación Trnsys Solar Térmico.

Los resultados del sistema con colectores PVT mejoran los resultados de ambos sistemas anteriores. No solo aumenta la cobertura térmica de energía renovable en la generación de ACS, si no que se añade la generación eléctrica. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

	Rendimiento eléctrico (%)	Cobertura eléctrica (%)	Rendimiento colector (%)	Cobertura térmica (%)
Inst. PVT	13,01	51,61	29,26	44,54

Tabla 10: Resultados simulación Trnsys PVT



Por último, se va a analizar el resultado de la simulación del sistema al que se le añaden los módulos TEG en el radiador exterior.

Si recordamos de apartados anteriores la Ecuación 3, tenemos:

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

Esta ecuación es para el caso de tener el radiador con 6 TEG. Como en estos radiadores se pueden incorporar hasta 12 TEG, se va a usar la siguiente ecuación para un solo colector (hacer doble los términos de la ecuación anterior). Posteriormente, se multiplicará la producción por tantos colectores se tenga (en nuestro caso, 8).

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

Tabla 11: Resultados simulación Trnsys PVT+TEG.

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

Tabla 12: Resultados simulación TEG Trnsys PVT+TEG.



7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] M. P. Galindo Alegre, A. Martínez Gracia y M. T. Pintanel Raymundo, «Estudio preliminar de la integración de módulos termoeléctricos (TEG) en paneles solares híbridos,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2020.
- [2] M. T. Pintanel Raymundo y A. Martínez Gracia, «Estudio experimental de la integración de módulos termoeléctricos en paneles soares híbridos PVT,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2021.
- [3] Abora Solar, «aH 60 Optimum: Ficha técnica,» 2022.
- [4] Abora Solar, «Abora Solar: Advanced Solar Technology,» [En línea]. Available: <https://abora-solar.com>. [Último acceso: 2022].
- [5] C. Subías Espuña y C. Cortés Gracia, «Estudio y optimización del modelo de un panel solar híbrido,» 2021.
- [6] TEC Solid State Power Generators, «Specifications TEG Module TEG2-07025HT-SS,» 2022.
- [7] Abora Solar, «Ubidots,» [En línea]. Available: <https://aboraenergy.iot.ubidots.com/>. [Último acceso: 2022].
- [8] TEC Solid State Power Generators, «WHALEFIN12-40mmLIQUID».
- [9] 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 Jurnal*, 2017.
- [10] 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.



- [11] 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.
- [12] B. Lorenzi, M. Acciarri y D. Narducci, «Suitability of Electrical Coupling in Solar Cell Thermoelectric Hybridization,» 2018.
- [13] L. Kütt, J. Millar, A. Karttunen, M. Lehtonen y M. Karppinen, «Thermoelectric applications for energy harvesting in domestic applications and mico-production units. Part I: Thermoelectric concepts, domestic boilers and biomass stoves,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 98, pp. 519-544, 2018.
- [14] A. Carnicer Salvo, «Rehabilitación energética en vivienda unifamiliar mediante sistema de aerotermia y colectores solares híbridos (PVT),» 2021.
- [15] 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,» *Renewabe Energy* 171, pp. 1026-1040, 2021.
- [16] G. M. Wilson, M. Al-Jassim, W. K. Metzger y S. W. Glunz, «The 2020 photovoltaic technologies roadmap,» *Journal of Physics*, 2020.
- [17] A. Vieira da Rosa, «Thermoelectricity,» de "Fundamentals of Renewable Energy Processes", Capítulo 5, 2009.
- [18] N. Syakirah Nazri, A. Fudholi, W. Mustafa, C. Hoy Yen, M. Mohammad, M. Hafizd 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.
- [19] S. Shoeibi, H. Kargarsharifabad, M. Sadi, A. Arabkoohsar y S. A. Agha Mirjaliy, «A review on using thermoelectric cooling, heating, and electricity generators in solar energy applications,» *Sustainable Energy Technologies and Assesments*, 2022.



- [20] 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.
- [21] 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*.
- [22] 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.
- [23] O. Planas, «Energía Solar: Historia de la energía solar,» 31 8 2020. [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/que-es-energia-solar/historia>.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] NREL, «Best Research-Cell Efficiencies,» 2022.
- [27] S. N. Mohd Tawil y M. Zainal Zulkarnain, «Energy harvesting using TEG and PV cell for low power application,» *AIP Conference Proceedings*, 2018.
- [28] S. Mahmoudinezhad, P. A. Cotfas, D. T. Cotfas, L. A. Rosendahl y A. Rezania, «Response of thermoelectric generators to Bi₂Te₃ and Zn₄Sb₃ energy harvester materials under variant solar radiation,» *Renewable Energy* 146, pp. 2488-2498, 2020.



- [29] 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,» *sustainable Energy, Grids and Networks* 27, 2021.
- [30] 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*.
- [31] S. Kumar Bhukesh, A. Kumar y S. Kumar Gaware, «Bismuth telluride (Bi₂Te₃) thermoelectric material as a transducer for solar energy application,» *Materials Today: Proceedings* 26, pp. 3131-3137, 2020.
- [32] 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.
- [33] S. Karabetoglu, A. Sisman, Z. F. Ozturk y T. Sahin, «Characterization of a thermoelectric generator at low temepratures,» *Energy Conversion and Management* 62, pp. 47-50, 2012.
- [34] IRENA, «Renewabe Power Generation Costs in 2019,» 2019.
- [35] IRENA, «Renawable Power Generation Costs,» 2019.
- [36] D. T. Gotfas, P. A. Gotfas, S. Mahmoudinezhad y M. Louzazni, «Critical factors and parameters fot hybrid Photovoltaic-Thermoelectric systems; review,» *Applied Thermal Engineering* 215, 2022.
- [37] K. Garud Sandip, S.-G. Hwang, J.-W. Han y M.-Y. Lee, «Review on Perfomance Enhacement of Photovoltaic/Thermal-Thermoelectric Generator Systems with Nanofluid Cooling,» *MDPI*, 2021.
- [38] 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.

- [39] 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.
- [40] A. del Amo Sancho, «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,» Universidad de Zaragoza, 2015.
- [41] J. Chen, «Thermodynamic analysis of a solardriven thermoelectric generator,» *AIP Journal of Applied Physics* 79, 1996.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] L. L. Baranowski, G. J. Snyder y E. S. Toberer, «Effective thermal conductivity in thermoelectric materials,» *Journal of Applied Pysics*, 2013.
- [45] 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.
- [46] E. Assareh, S. Mojtaba Alirahmi y P. Ahmadi, «A Sustainable model for the integration of solar and geothermal energy boosted with thermoelectric generators (TEGs) fr electricity, cooling and desalination purpose,» *Geothermics* 92, 2021.



- [47] J. Antonanzas, A. del Amo, A. Martínez Gracia y A. A. Bayod Rújula, «Towards the optimization of convective losses in photovoltaic-thermal panels,» *Soalr Energy 116*, pp. 323-336, 2015.
- [48] M. Alnajideen y G. Min, «Hybrid photovoltaic-thermoelectric system using a novel spectral splitting solar concentrator,» *Energy Conversion and Management 251*, 2022.
- [49] «Wikipedia, La enciclopedia libre,» 20 Junio 2022. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_fotoel%C3%A9ctrico.
- [50] «ONU: Objetivos de Desarrollo Sostenible,» 22 08 2022. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
- [51] «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>.
- [52] «Construible.es,» 20 01 2012. [En línea]. Available: <https://www.construible.es/2012/01/20/consumo-energetico-del-sector-residencial>.
- [53] A. Solar, «Abora Solar: Advanced Solar Technology,» [En línea]. [Último acceso: 2022].



Relación de documentos

(_) Memoria NN páginas
(X) Anexos 82 páginas

Zaragoza, a 25 de octubre de 2022

Firmado: Carlos Subías Espuña