



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis de la refrigeración de una instalación solar térmica de  
absorción directa*

## Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Marta Romero Fueyo

**DIRECTORES:** Javier Pérez Vallejo  
Jose Ignacio Iglesias Prado

**CURSO ACADÉMICO:** 2024-2025

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis de la refrigeración de una instalación solar térmica de  
absorción directa*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

UniversidadeVigo



## RESUMEN

Las instalaciones de energía solar térmica permiten el aprovechamiento de la energía proveniente de la radiación solar, fuente renovable ampliamente utilizada. Sin embargo, las condiciones climatológicas cambiantes dificultan la determinación del rendimiento de los paneles *in situ*. Las instalaciones de laboratorio permiten el establecimiento de condiciones de radiación y temperatura controladas.

Este trabajo se realiza la mejora y puesta a punto de un banco de ensayos centrado en un colector solar térmico de absorción directa. Así, se incorpora un baño termostático refrigerado para incrementar el salto térmico en el intercambiador de calor helicoidal, con el objetivo de alcanzar valores más realistas. Posteriormente, se analiza el rendimiento energético del agua y distintas muestras propilenglicol: agua, simulando el calentamiento de un depósito.

Los distintos ensayos, con saltos de temperatura en el intercambiador de calor mayores de 1,5 °C, permiten concluir que el agua es el mejor fluido térmico analizado, ya que presenta los mayores coeficientes de convección. La adición de un 30% de propilenglicol produce descensos del citado coeficiente de hasta un 11,7%. Además, se proporciona una correlación del número de Nusselt en función de Reynolds, Prandtl y la concentración de glicol, con una desviación máxima de 6,23 respecto a los valores experimentales.

## PALABRAS CLAVE

Energía térmica, Colector solar, Intercambiador de calor, Coeficiente de convección, Correlación de Nusselt.



# AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres por su constante apoyo y comprensión a lo largo de todo este proceso, tanto en los momentos de dedicación al trabajo como en los de descanso necesarios para recargar energías. A mis tutores Javier y Jose, gracias por compartir su experiencia, ofrecerme orientación clara y dedicar tiempo a revisar y mejorar cada fase del proyecto. Mi agradecimiento también a Iñaki, cuya colaboración técnica y disposición para resolver dudas prácticas hicieron posible la puesta a punto del banco de ensayos. Finalmente, agradezco a mis compañeros de promoción por el ambiente de compañerismo, las ideas compartidas y el ánimo mutuo que facilitaron avanzar juntos en este reto académico.



## CONTENIDO

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Contenido .....                                                                   | 1  |
| Índice de Figuras .....                                                           | 3  |
| Índice de Tablas.....                                                             | 5  |
| Índice de ecuaciones.....                                                         | 6  |
| 1 Introducción y objetivos .....                                                  | 7  |
| 1.1 Contextualización y motivación.....                                           | 7  |
| 1.2 Objetivo del trabajo.....                                                     | 7  |
| 1.3 Estructura .....                                                              | 8  |
| 2 Estado del arte .....                                                           | 9  |
| 2.1 Energía .....                                                                 | 9  |
| 2.1.1 Energía térmica .....                                                       | 9  |
| 2.1.2 Energías renovables .....                                                   | 10 |
| 2.2 Uso de la energía solar térmica como fuente renovable .....                   | 10 |
| 2.2.1 Importancia del aprovechamiento de la radiación solar .....                 | 10 |
| 2.2.2 Balance energético en España .....                                          | 11 |
| 2.2.3 Tipos de energía solar .....                                                | 12 |
| 2.3 Instalaciones solares térmicas .....                                          | 14 |
| 2.3.1 Principio de funcionamiento.....                                            | 14 |
| 2.3.2 Tipos de colectores .....                                                   | 15 |
| 2.4 Desafíos del rendimiento de los paneles solares térmicos .....                | 18 |
| 2.4.1 Factores Ambientales.....                                                   | 18 |
| 2.4.2 Limitaciones técnicas.....                                                  | 18 |
| 2.5 Fluidos caloportadores habituales en las instalaciones solares térmicas. .... | 19 |
| 2.5.1 Agua.....                                                                   | 19 |
| 2.5.2 Glicoles .....                                                              | 19 |
| 3 Desarrollo del TFG.....                                                         | 22 |
| 3.1 Modificación del banco de ensayos .....                                       | 22 |
| 3.2 Equipo experimental .....                                                     | 23 |
| 3.3 Circuito hidráulico .....                                                     | 25 |
| 3.4 Circuito eléctrico.....                                                       | 30 |
| 3.4.1 Sistema de adquisición de datos .....                                       | 32 |
| 3.5 Fluidos utilizados .....                                                      | 34 |
| 3.6 Procedimiento experimental .....                                              | 37 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.7 Análisis de datos .....                                            | 40 |
| 3.7.4 Números adimensionales experimentales en el intercambiador ..... | 42 |
| 4 Resultados .....                                                     | 44 |
| 4.1 Validación de los resultados .....                                 | 44 |
| 4.2 Estudio y análisis de los resultados experimentales.....           | 46 |
| Discusión.....                                                         | 51 |
| 5 Conclusiones y líneas futuras .....                                  | 52 |
| 5.1 Conclusiones .....                                                 | 52 |
| 5.2 Líneas futuras .....                                               | 53 |
| 6 Bibliografía.....                                                    | 54 |
| Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales ..... | 58 |
| Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales .....                          | 62 |
| Anexo III: Propiedades termo físicas de los fluidos.....               | 64 |
| Anexo IV: Nomenclatura .....                                           | 66 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2-1 Transferencia de calor. [3].....                                                                 | 10 |
| Figura 2-2 Diagrama Sankey de la energía en España en 2023. Cifras en ktep [9]. ....                        | 11 |
| Figura 2-3 Cómo funciona la energía solar térmica [13]. ....                                                | 12 |
| Figura 2-4 Funcionamiento de una planta fotovoltaica [14]. ....                                             | 13 |
| Figura 2-5 Energía solar pasiva [15]. ....                                                                  | 13 |
| Figura 2-6 Energía solar híbrida [16]. ....                                                                 | 14 |
| Figura 2-7 Partes de un colector solar [18]. ....                                                           | 15 |
| Figura 2-8 Proporción de propilenglicol y temperatura de congelación (elaboración propia).....              | 21 |
| Figura 3-1 Banco de ensayos del anterior TFG con el depósito a temperatura ambiente [44]. ....              | 23 |
| Figura 3-2 Instalación del banco de ensayos (elaboración propia). ....                                      | 24 |
| Figura 3-3 Circuito hidráulico (elaboración propia). ....                                                   | 25 |
| Figura 3-4 Colector solar (elaboración propia) .....                                                        | 26 |
| Figura 3-5 Planta y dimensiones del colector solar [41]. ....                                               | 26 |
| Figura 3-6 Intercambiador helicoidal (elaboración propia).....                                              | 28 |
| Figura 3-7 Baño termostático (elaboración propia).....                                                      | 29 |
| Figura 3-8 Intercambiador de calor dentro del baño termostático (elaboración propia).....                   | 29 |
| Figura 3-9 Circuito eléctrico (elaboración propia). ....                                                    | 30 |
| Figura 3-10 Transmisores / conversores de temperatura Pt-100 (elaboración propia). ....                     | 30 |
| Figura 3-11 Bomba GC-GP 6538 [46]. ....                                                                     | 31 |
| Figura 3-12 Portalámparas [47]. ....                                                                        | 32 |
| Figura 3-13 Bombilla incandescente Phillips [48]. ....                                                      | 32 |
| Figura 3-14 Tarjeta NI USB-6210 [49] .....                                                                  | 33 |
| Figura 3-15 Página principal de LabView 2017 (elaboración propia). ....                                     | 34 |
| Figura 3-16 Gráficos para la adquisición de datos, pantalla secundaria LabView (elaboración propia). ....   | 34 |
| Figura 3-17 Preparación mezcla 10:90 (elaboración propia). ....                                             | 35 |
| Figura 3-18 Preparación mezcla 20:80 (elaboración propia). ....                                             | 35 |
| Figura 3-19 Preparación mezcla 30:70 (elaboración propia). ....                                             | 36 |
| Figura 3-20 Recopilación de datos en el banco de ensayos (elaboración propia). ....                         | 38 |
| Figura 3-21 Transferencia de calor en el intercambiador de calor helicoidal (elaboración propia). ....      | 41 |
| Figura 4-1 Captura de pantalla de la calibración de los sensores (elaboración propia). ....                 | 44 |
| Figura 4-2 Gráfica de los balances energéticos (elaboración propia). ....                                   | 45 |
| Figura 4-3 Gráfica del incremento de temperatura en el colector frente al caudal (elaboración propia). .... | 46 |

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4-4 Gráfico del calor absorbido del colector frente al caudal (elaboración propia). ....                                  | 47 |
| Figura 4-5 Gráfica de coeficiente de convección frente al caudal (elaboración propia).....                                       | 48 |
| Figura 4-6 Disminución promedio del coeficiente de convección respecto al porcentaje de propilenglicol (elaboración propia)..... | 48 |
| Figura 4-7 Gráfica Nusselt frente a Reynolds (elaboración propia) .....                                                          | 49 |
| Figura 4-8 Nu de correlación frente a Nu experimental (elaboración propia). ....                                                 | 50 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2-1 Consumo de energía primaria en España en 2021-2022 por tecnología renovable (elaboración propia) [10] ..... | 12 |
| Tabla 2-2 Diferencias entre energía fotovoltaica y térmica (elaboración propia).....                                  | 14 |
| Tabla 2-3 Clasificación de los colectores solares térmicos (elaboración propia) .....                                 | 17 |
| Tabla 2-4 Principales diferencias entre el etilenglicol y el propilenglicol (elaboración propia) [40] .....           | 20 |
| Tabla 2-5 Porcentaje de glicol frente a la temperatura de congelación (elaboración propia) [40].                      | 21 |
| Tabla 3-1 Dimensiones de los elementos del colector solar (elaboración propia).....                                   | 25 |
| Tabla 3-2 Características del intercambiador de calor (elaboración propia).....                                       | 27 |
| Tabla 3-3 Características baño termostático (elaboración propia). .....                                               | 28 |
| Tabla 3-4 Detalles técnicos de la bomba [46]. .....                                                                   | 31 |
| Tabla 3-5 Conexiones de la tarjeta de adquisición de datos (elaboración propia).....                                  | 33 |
| Tabla 3-6 Recopilación de ensayos caudal vs temperatura del depósito (elaboración propia). .....                      | 39 |
| Tabla 4-1 Desviaciones de Nu.....                                                                                     | 50 |
| Tabla A-3- 1 Propiedades termo físicas del agua. ....                                                                 | 64 |
| Tabla A-3- 2 Propiedades termo físicas del propilenglicol- agua 10:90 .....                                           | 65 |
| Tabla A-3- 3 Propiedades termo físicas del propilenglicol- agua 20:80 .....                                           | 65 |
| Tabla A-3- 4 Propiedades termo físicas del propilenglicol- agua 30:70.. .....                                         | 65 |
| Tabla A-4- 1 Nomenclatura (elaboración propia). .....                                                                 | 66 |

## ÍNDICE DE ECUACIONES

|               |    |
|---------------|----|
| Ec 3-1 .....  | 36 |
| Ec 3-2 .....  | 36 |
| Ec 3-3 .....  | 36 |
| Ec 3-4 .....  | 36 |
| Ec 3-5 .....  | 36 |
| Ec 3-6 .....  | 36 |
| Ec 3-7 .....  | 36 |
| Ec 3-8 .....  | 36 |
| Ec 3-9 .....  | 37 |
| Ec 3-10 ..... | 37 |
| Ec 3-11 ..... | 37 |
| Ec 3-12 ..... | 37 |
| Ec 3-13 ..... | 37 |
| Ec 3-14 ..... | 37 |
| Ec 3-15 ..... | 37 |
| Ec 3-16 ..... | 37 |
| Ec 3-17 ..... | 40 |
| Ec 3-18 ..... | 40 |
| Ec 3-19 ..... | 40 |
| Ec 3-20 ..... | 41 |
| Ec 3-21 ..... | 41 |
| Ec 3-22 ..... | 42 |
| Ec 3-23 ..... | 42 |
| Ec 3-24 ..... | 42 |
| Ec 3-25 ..... | 42 |
| Ec 3-26 ..... | 42 |
| Ec 3-27 ..... | 42 |
| Ec 3-28 ..... | 43 |
| Ec 4-1 .....  | 50 |
| Ec 4-2 .....  | 50 |

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Contextualización y motivación

El calentamiento global y el creciente aumento de la demanda y consumo energético han fomentado la investigación de soluciones sostenibles que disminuyan la dependencia de fuentes de energía fósil. Este trabajo se enfocará en la energía solar térmica, la cual se caracteriza por ser una tecnología clave entre estas opciones, ya que permite aprovechar la radiación solar para generar calor. Las instalaciones de energía solar térmica son utilizadas ampliamente en aplicaciones como calefacción y procesos industriales que requieran calor.

En este contexto, las instalaciones de absorción directa representan un avance tecnológico significativo. En estas instalaciones, el fluido térmico absorbe directamente la radiación solar en el colector, eliminando elementos intermedios, tales como tubos y recubrimientos. Esto no solo optimiza el diseño, sino también mejora la eficacia térmica del sistema.

Este trabajo tiene como objetivo investigar y perfeccionar los procedimientos de enfriamiento en una instalación solar térmica de absorción directa, teniendo en cuenta factores como el diseño del sistema, la clase de fluido térmico y, sobre todo, las condiciones atmosféricas debido a la necesidad de solucionar el problema de una meteorología cambiante. Además, busca analizar el efecto de diversas tácticas de enfriamiento en la eficiencia global del sistema, sugiriendo soluciones que equiparen rendimiento, sostenibilidad y costes.

## 1.2 Objetivo del trabajo

Para lograr lo expuesto anteriormente, analizar la refrigeración de una instalación solar, se requerirán alcanzar los siguientes objetivos:

- Modificación del anterior banco de ensayos, posibilitando la refrigeración del fluido del panel solar térmico de absorción directa mediante intercambiadores de calor y un baño termostático refrigerado y, por supuesto, afrontar y resolver los inconvenientes acaecidos.
- Determinación del consumo de energía en condiciones reales (ajustar los saltos térmicos del intercambiador a saltos de temperatura entrada-salida más realistas)
- Evaluar el rendimiento energético y la eficiencia del sistema realizando ensayos en el laboratorio con distintos montajes.

## 1.3 Estructura

Después de establecer el contexto y objetivos del presente Trabajo de Fin de Grado, se especifica a continuación la organización de esta memoria, que incluye los títulos de los capítulos y sus respectivos contenidos, así como anteriormente, un resumen conciso para simplificar la comprensión y la búsqueda de datos.

### **Capítulo 1: Introducción y objetivos.**

- Se detalla el contexto, se justifica la importancia del estudio y se definen la dirección y los objetivos de la investigación.

### **Capítulo 2: Estado del arte.**

- Se revisa la bibliografía existente, analizando las investigaciones previas, se identifican las carencias de conocimiento y se proporciona una base teórica para el estudio centrándose sobre todo en la energía solar térmica.

### **Capítulo 3: Desarrollo del TFG**

- Se explica paso a paso la implementación y la metodología empleada, detallando las herramientas utilizadas, los componentes, como se realizaron los ensayos y la forma en que se resolvieron los problemas. Además, muestra cómo el proyecto evolucionó desde la planificación inicial hasta la obtención de resultados funcionales.

### **Capítulo 4: Resultados.**

- Se presentan los hallazgos principales derivados del análisis de datos, la eficacia de los experimentos o ensayos realizados. También muestra la verificación de estos hallazgos en relación con los análisis obtenidos.

### **Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras.**

- Se recoge la síntesis de los resultados obtenidos y su relación con los objetivos planteados, valorando el grado de cumplimiento de estos. Además, propone posibles líneas de investigación futuras y reflexiona sobre la importancia y utilidad práctica del banco de ensayos.

### **Capítulo 6. Bibliografía.**

- Se recopilan todas las fuentes consultadas y citadas durante la investigación, ofreciendo respaldo y credibilidad a los contenidos expuestos.

### **Anexos.**

- Se reúnen materiales complementarios que respaldan el contenido principal, como tablas y gráficas extensas. Estos anexos aportan un contexto adicional a la investigación sin sobrecargar el trabajo.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Energía

La energía ha sido y es un componente esencial para el progreso de la humanidad. Desde el inicio de su existencia, el ser humano ha requerido de energía para subsistir y progresar. La energía se refiere a la habilidad de los cuerpos para llevar a cabo una labor y generar transformaciones en sí mismos o en otros cuerpos. En otras palabras, la energía se concreta como la habilidad de poner en marcha las cosas [1]. La Real Academia Española la define como: “Capacidad que tiene un sistema para realizar un trabajo, y que se mide en julios”. El joule ( $J$ ) es la unidad de medida que empleamos para medir la energía, en homenaje al físico inglés James Prescott Joule.

#### 2.1.1 Energía térmica

La energía se expresa de diversas formas, obteniendo así distintas denominaciones dependiendo de las acciones y las transformaciones que puede generar, concretamente la energía térmica se asocia con la energía que se transfiere de un cuerpo caliente a otro más frío, manifestándose a través del calor.

Como todos los procesos termodinámicos suelen mantener un equilibrio térmico con su entorno, esta energía necesita ser transferida de un cuerpo a otro o al entorno, y se realiza mediante tres modos de transferencia de calor fundamentales, como se observa en la Figura 2-1 [2]:

- **Conducción:** el intercambio de energía ocurre a través del contacto entre los cuerpos, sin la transferencia de material. Por ejemplo, un cubo de hielo derritiéndose en la mano, donde el calor se transfiere de la piel al hielo.
- **Convección:** la transmisión de energía ocurre a través del desplazamiento de un líquido (líquidos o gases) Por ejemplo, el agua que circula en una olla caliente se mueve por convección.
- **Radiación:** la energía se transmite a través de ondas electromagnéticas, sin requerir contacto físico. Por ejemplo, nuestra mano sintiendo el calor de un fuego sin necesidad de contacto.



Figura 2-1 Transferencia de calor [3].

Estos principios de transferencia son la base del comportamiento de la energía térmica en sistemas de aprovechamiento energético.

### 2.1.2 Energías renovables

Se denominan energías renovables a aquellas provenientes de recursos naturales que pueden ser reemplazadas más rápido de lo que se consumen. Ejemplos de recursos renovables son la luz solar, el viento, el agua en ciclo hidráulico o la biomasa, los cuales (a diferencia de los combustibles fósiles) son prácticamente inagotables a escala humana y su uso sostenible no conlleva su agotamiento [4].

En el mundo actual, la necesidad energética de la humanidad es extremadamente elevada, ya sea para propósitos industriales, comerciales, de transporte o de supervivencia básica para las viviendas. Desde el inicio de la Revolución Industrial, cuando comenzó a surgir esta demanda en aumento, se han utilizado diversos métodos para cubrirla, siempre en detrimento del medio ambiente: contaminación, minería dañina, tala, quema, entre otros.

Por lo que frente al complejo escenario climático al que nos enfrentamos el siglo XXI, las energías renovables adquieren un papel crucial en la disminución de la emisión de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero que contaminan las aguas y la atmósfera, provocando de esta manera un incremento en el calentamiento global [5].

Estas fuentes renovables, al no implicar procesos de combustión de carbono, presentan un impacto ambiental mucho menor: contribuyen significativamente a mitigar la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación, ayudando a frenar el cambio climático.

## 2.2 Uso de la energía solar térmica como fuente renovable

### 2.2.1 Importancia del aprovechamiento de la radiación solar

Desde tiempos inmemoriales, el sol ha sido la principal fuente de energía para la Tierra. Es la energía más potente y analizada, además de ser una de las figuras principales en la transición energética. A continuación, se detallarán los motivos de su importancia [6]:

- El sol simboliza una fuente de energía constante e inagotable: día a día, año a año, siempre está presente. Además de ser una entidad estable, la energía solar que llega a nuestro planeta es también abundante, tanto que, sería suficiente recoger el 6% de la energía solar para satisfacer las necesidades de energía de toda la humanidad [7] y en tan solo una hora, la Tierra recibe del Sol más energía de la que consume toda la humanidad en un año [8].

- La energía solar es una fuente de energía que se puede utilizar en cualquier parte del planeta, incluso en escenarios aislados, rurales, de acceso complicado y sin acceso a redes eléctricas convencionales.
- La capacidad de adaptación de la energía solar es también tecnológica. Lo primero que se viene a la mente son los paneles fotovoltaicos, sin embargo, se puede utilizar el sol para generar energía térmica, calentando fluidos, o fusionando ambos tipos de energía en las más avanzadas centrales solares termodinámicas.
- Pese a que los paneles solares disminuyen su eficacia con el paso del tiempo, con una duración de 20 a 25 años, las intervenciones de mantenimiento son bastante reducidas.
- Los paneles solares resultan muy útiles durante su retiro o reemplazo. Normalmente es muy fácil desmontarlos y, adicionalmente, los materiales que conforman los paneles pueden ser recuperados, reciclados y reutilizados de nuevo, lo que disminuye aún más el impacto ecológico de esta tecnología.

### 2.2.2 Blance energético en España

La energía primaria abarca todas las manifestaciones de energía existentes en la naturaleza; Abarca tanto como combustibles fósiles como energías renovables. Para satisfacer las demandas energéticas, estas fuentes se convierten en energía final, o sea, en fuentes de energía preparadas para su uso.

La Figura 2-2 muestra el diagrama simplificado de Sankey del proceso energético de España para 2023 muestra la energía primaria, que es la energía final derivada de los distintos procesos de cambio y transformación [9].

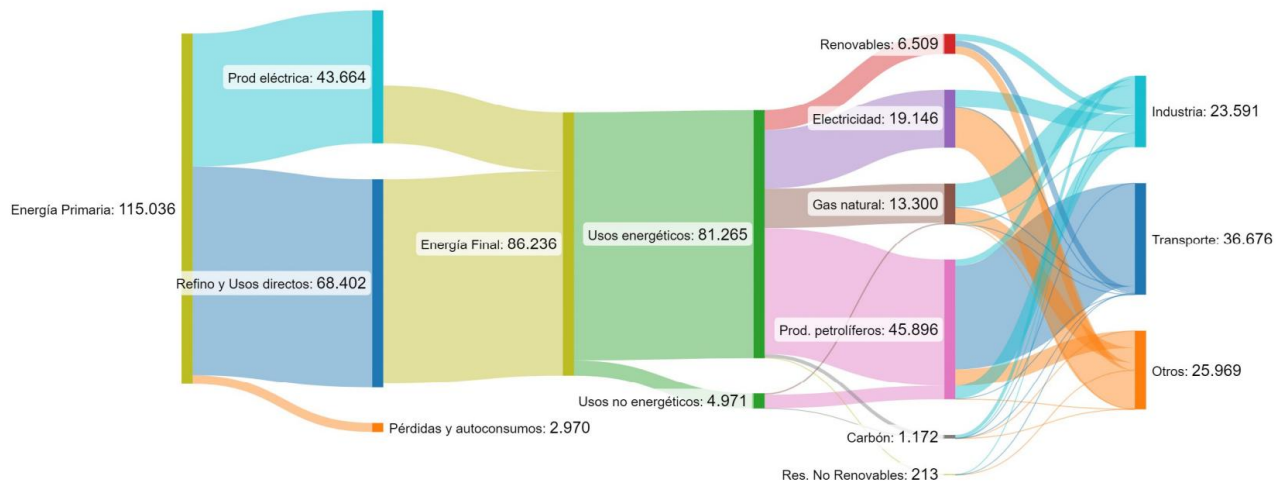


**Figura 2-2 Diagrama Sankey de la energía en España en 2023. Cifras en ktep [9].**

El consumo de energía primaria en España durante 2023 fue de 115.036 ktep, lo que supuso una disminución del 2,8% respecto a 2022 en un contexto nacional de crecimiento económico.

En lo que respecta a las energías renovables, su consumo de energía primaria de 21.101 ktep supuso un crecimiento del 14,7% respecto a 2022, concretamente la solar fotovoltaica (+39,2%) [10].

| Tecnología                | 2021 (ktep) | $\Delta$ 2021/2020 (%) | 2022 (ktep) | $\Delta$ 2022/2021 (%) |
|---------------------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------|
| <b>Hidráulica</b>         | 2.547       | -2,9                   | 1.512       | -40,6                  |
| <b>Eólica</b>             | 5.336       | 10,0                   | 5.399       | 1,2                    |
| <b>Solar fotovoltaica</b> | 1.885       | 39,9                   | 2.682       | 42,3                   |
| <b>Solar térmica</b>      | 1.686       | -26,3                  | 1.526       | -9,5                   |

**Tabla 2-1 Consumo de energía primaria en España en 2021-2022 por tecnología renovable (elaboración propia) [10].**

La energía solar térmica, con un parque instalado sin grandes variaciones, creció en 2021 y se redujo en 2022, en línea con las horas anuales de radiación solar, como podemos ver en la Tabla 2-1.

### 2.2.3 Tipos de energía solar

La energía solar es una fuente renovable que se puede aprovechar de distintas maneras según la tecnología utilizada. Principalmente, se divide en energía solar fotovoltaica y energía solar térmica [11] [12]:

- **Solar térmica:** la energía solar térmica es una tecnología que aprovecha la radiación solar para generar calor mediante colectores solares, que transfieren esta energía a un fluido de trabajo (Figura 2-3). Este calor se utiliza en diversas aplicaciones, como la producción de agua caliente sanitaria, calefacción, climatización de piscinas o calefacción en invernaderos agrícolas. Dentro de esta categoría, también existe la energía termo solar de concentración (CSP<sup>1</sup>, por sus siglas en inglés), que emplea espejos o lentes para concentrar la luz solar en un punto específico, generando altas temperaturas. Este calor se usa para producir vapor de agua que mueve turbinas y genera electricidad, lo que la convierte en una alternativa eficiente para la producción energética a gran escala.

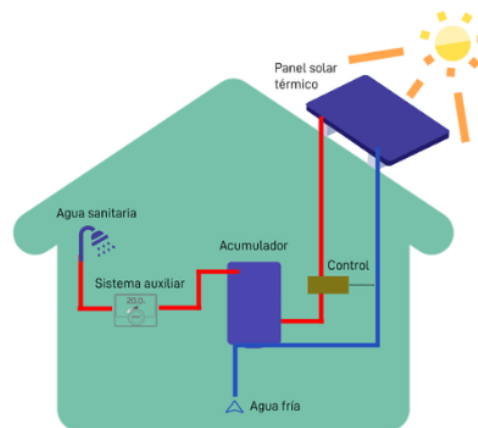


**Figura 2-3 Cómo funciona la energía solar térmica [13].**

- **Solar fotovoltaica:** la energía solar fotovoltaica es un tipo de energía renovable que se obtiene al convertir la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Para ello, se

<sup>1</sup> Concentrated Solar Power.

emplean módulos fotovoltaicos compuestos por células de silicio u otros materiales semiconductores, que al recibir la radiación solar liberan electrones, generando una corriente eléctrica (Figura 2-4). Su aplicación abarca desde el autoconsumo en viviendas hasta la producción a gran escala en huertos solares.

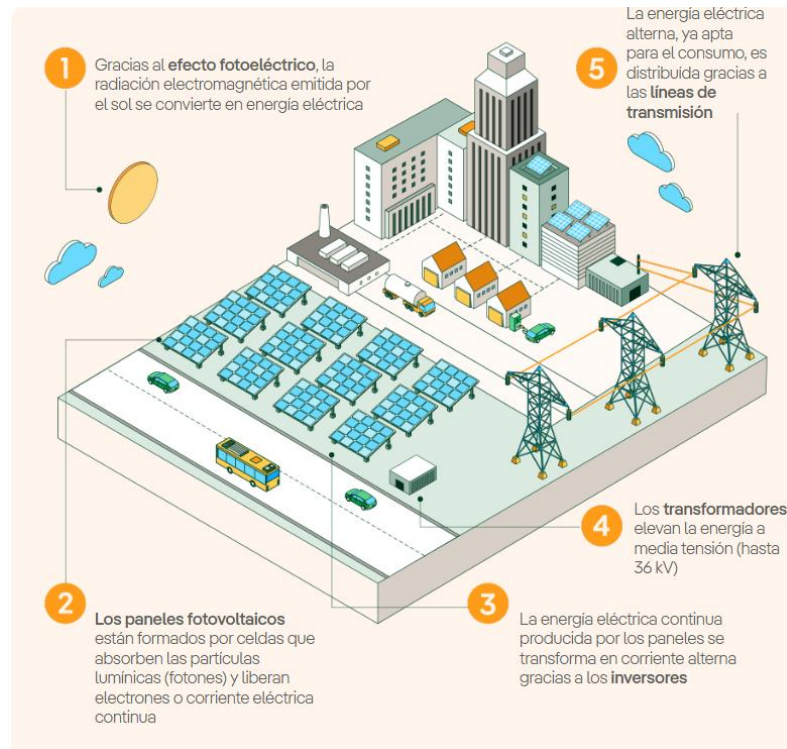


Figura 2-4 Funcionamiento de una planta fotovoltaica [14].

- **Pasiva:** la energía solar pasiva (Figura 2-5) es una forma de aprovechamiento directo de la radiación solar sin necesidad de convertirla en otro tipo de energía ni utilizar sistemas mecánicos o eléctricos. Se basa en el diseño arquitectónico y el uso de materiales específicos para optimizar la captación, acumulación y distribución del calor y la luz natural dentro de los espacios habitables. Su aplicación es clave en la arquitectura bioclimática y el ecodiseño, con estrategias como la orientación de los edificios, el uso estratégico de ventanas y superficies térmicas, así como la incorporación de elementos como tubos de luz para mejorar la iluminación natural.



Figura 2-5 Energía solar pasiva [15].

- **Híbrida:** la energía solar híbrida (Figura 2-6) es un sistema que combina cualquiera de las formas de energía solar con otras fuentes energéticas, principalmente renovables, con el objetivo de optimizar la generación de energía y garantizar un suministro más estable. El

ejemplo más común es la combinación de energía solar fotovoltaica con energía eólica, donde paneles solares y aerogeneradores trabajan en conjunto para aprovechar al máximo los recursos del sol y el viento. Estos sistemas permiten una mayor eficiencia energética y una mayor autonomía en comparación con el uso de una sola fuente renovable.



Figura 2-6 Energía solar híbrida [16].

A continuación, en la Tabla 2-2 las diferencias entre las dos energías principales la fotovoltaica y la térmica en cuanto a su funcionamiento y aplicación:

| Características | Fotovoltaica                                                                                                           | Térmica                                                                             |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Versatilidad    | Total, cubre cualquier tipo de consumo energético                                                                      | Limitado al calentamiento de agua y calefacción de radiadores                       |
| Vida útil       | Muy duradera la instalación, hasta 30 años.                                                                            | Vida útil más corta, hasta 10 años.                                                 |
| Mantenimiento   | Menor mantenimiento a menor coste, se puede monitorizar la instalación para llevar a cabo un mantenimiento preventivo. | Un mantenimiento más costoso y complejo, como la verificación del nivel del fluido. |
| Eficiencia      | En torno al 22%                                                                                                        | Mayor eficiencia, aproximadamente del 95%                                           |
| Coste           | Una instalación de 5 kW ronda los 5.400€ con IVA                                                                       | Un colector plano de un bidón de pocos litros cuesta alrededor de 4.000€            |

Tabla 2-2 Diferencias entre energía fotovoltaica y térmica (elaboración propia).

## 2.3 Instalaciones solares térmicas

Los colectores solares son el eje central de un sistema de energía térmica solar, estos capturan los rayos solares. Posteriormente, los transforman en calor útil, que puede emplearse para generar agua caliente para uso sanitario o como complemento a la calefacción de la vivienda. Esto contribuye al ahorro en gastos energéticos y ayuda a disminuir las emisiones de  $CO_2$  a la atmósfera a través de la combustión de energías fósiles.

### 2.3.1 Principio de funcionamiento

En términos generales, un colector solar actúa como un transferente de calor entre los fluidos. Se lleva a cabo mediante una superficie receptora que capta la radiación solar y la convierte en un líquido que fluye a través de un conducto de metal. Este fluido suele estar compuesto por una mezcla de agua y glicol. Es necesario que la parte baja de la superficie absorbente esté adecuadamente aislada, como vemos en la Figura 2-7, para minimizar las pérdidas provocadas por la transferencia del calor al exterior [17].

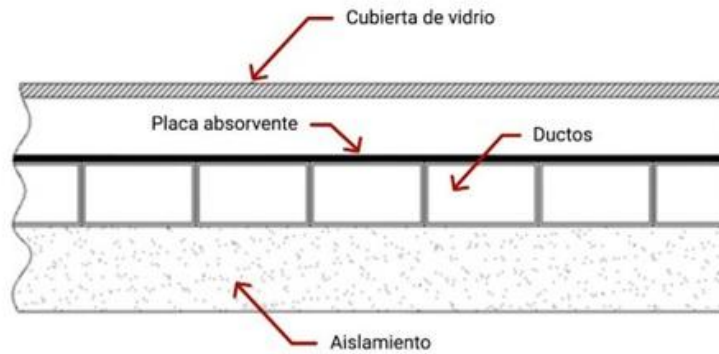


Figura 2-7 Partes de un colector solar [18].

### 2.3.2 Tipos de colectores

En términos generales, hay dos clases principales de sistemas de calentamiento solar: los de concentración y los de no concentración.

Los colectores solares se clasifican según la temperatura que alcanza este fluido de trabajo. pueden categorizarse en las de temperatura baja (hasta 120 °C), media (entre 120 y 400 °C) y alta (superando los 1000 °C) [19]. Cada espectro de temperatura demanda una clase de fluido de trabajo (agua, glicoles, aceites, sales fundidas, gases, etc.), junto con una tecnología que posibilite llegar a estos niveles (sin y con una concentración de la radiación solar). Los colectores solares de no concentración son colectores de baja temperatura. Sus aplicaciones principales son la producción de agua caliente sanitaria y la calefacción. Existen los siguientes tipos [20] [21] [22]:

- **Placa plana:** son los más comunes en aplicaciones domésticas. Consiste en una caja transparente (vidrio o plástico), un absorbedor metálico y aislamiento térmico; La radiación solar calienta el absorbedor, que transfiere el calor al fluido de trabajo (agua o aire). Trabaja típicamente a temperaturas de 40°C a 90°C con eficiencias del orden de 40–70% en condiciones estándar. Son adecuados para climas moderados y aplicaciones residenciales.
- **Aire:** son colectores de tipo plano cuya principal característica es tener como fluido caloportador el aire. La radiación calienta la superficie, transfiriendo calor al aire que pasa por los orificios alcanzando temperaturas desde 20 a 150°C.
- **Tubos de vacío:** este tipo de colector solar usa una serie de tubos de vacío para calentar el agua que se va a utilizar para reducir las pérdidas de calor por convección y conducción. Son más eficientes que los colectores de placa plana en climas fríos o con baja radiación solar y trabajan a temperaturas de 50 a 150°C. Se emplean en secado de granos, ventilación precalentada u otros procesos que admiten aire caliente. Son ideales cuando se requieren temperaturas algo mayores o se busca rendimiento en invierno.
- **Cónicos o esféricos:** los colectores de geometría cónica están diseñados para aprovechar la radiación solar de manera más uniforme a lo largo del día, sin necesidad de seguimiento solar en algunos casos y funcionan con un principio similar al de una lupa, concentrando la radiación solar en un punto focal dentro de la esfera o cono. Por geometría, optimizan la captación en aplicaciones particulares, aunque su implantación es limitada.
- **Heat pipe:** tubo de transferencia de calor pasiva que utiliza un fluido de trabajo y un proceso de evaporación-condensación para trasladar el calor de un extremo a otro de manera eficiente. Transfiere calor de forma rápida y eficiente, sin necesidad de bombas ni partes móviles con mínimas pérdidas térmicas.
- **Absorción directa:** en 1970, buscando eficiencias al modelo de colector solar convencional con absorción de la radiación solar superficial (la energía se absorbe por una superficie exterior, y esta energía térmica se transfiere posteriormente por conducción y convección a un fluido de trabajo que circula por el dispositivo hasta un intercambiador térmico) [23], se propuso un diseño

alternativo de un tipo de colector solar térmico en el que el fluido de trabajo absorbe directamente la radiación solar en lugar de transferir el calor desde una superficie absorbente intermedia. Esto elimina la etapa de conducción desde una placa metálica al fluido, potencialmente reduciendo las pérdidas ópticas y térmicas. Según Kalogirou (2013), este enfoque permite mejorar la eficiencia de conversión al minimizar resistencias térmicas adicionales [24].

Los colectores solares de concentración captan y enfocan la radiación solar en un área reducida para alcanzar temperaturas más altas. Se utilizan en generación de electricidad, procesos industriales y aplicaciones térmicas avanzadas. Estos son los más destacables [20] [21] [22]:

- **Central de torre:** consisten en un campo de espejos (heliostatos) orientables que reflejan la radiación solar hacia un receptor central ubicado en la parte superior de una torre.
- **Central de Disco Parabólico con Motor Stirling:** utilizan espejos con forma de disco parabólico para concentrar la radiación solar en un motor Stirling situado en el foco de la parábola, por eso también se denomina central de disco-Stirling.
- **Central de concentrador de cilindro parabólico:** utilizan espejos con forma de parábola para concentrar la radiación solar en un tubo receptor situado en la línea focal. La tubería contiene un fluido que se calienta y genera vapor que mueve una turbina. Permite alcanzar temperaturas de entre 150 y 400°C.
- **Central de Concentrador Lineal Fresnel:** las centrales de concentración lineal Fresnel son una tecnología de energía solar térmica que utiliza espejos planos o ligeramente curvados para reflejar y concentrar la radiación solar a lo largo de una línea en un tubo receptor elevado. Este sistema es una alternativa más económica a los colectores cilíndrico-parabólicos, ya que usa espejos más simples y de menor costo.

La Tabla 2-3 [24] muestra un resumen de los distintos colectores solares térmicos previamente mencionados. Este TFG se centrará en los colectores solares de no concentración, ya que son los más comunes y baratos. Estos modelos se benefician de la radiación solar directa y difusa, por lo que no es imprescindible incluir un sistema de monitoreo solar. No obstante, esto implica que poseen rendimientos inferiores y funcionan a temperaturas que no superan los 100 °C [17].

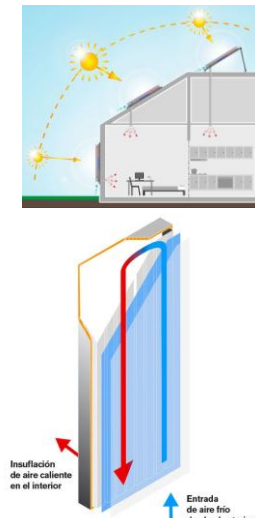
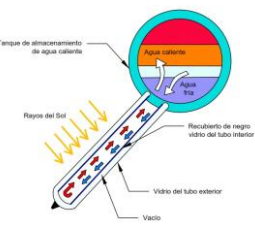
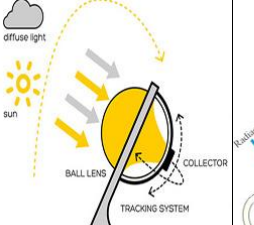
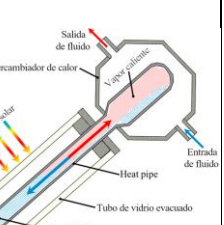
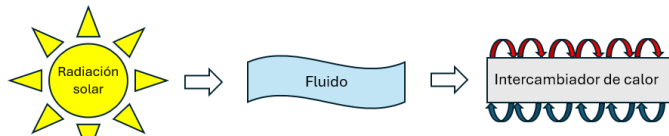
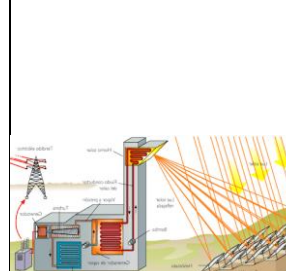
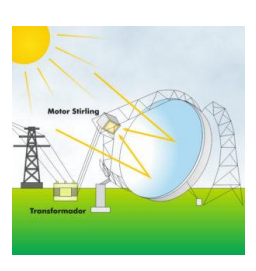
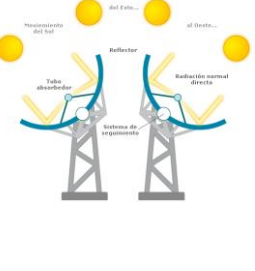
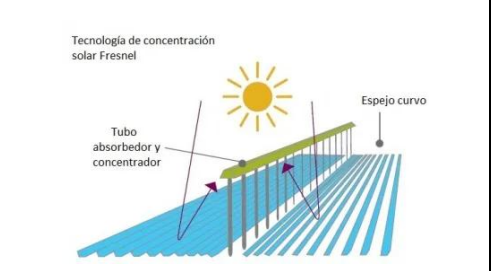
| NO CONCENTRACIÓN                                                                                              |                                                                                                                                           |                                                                                                                                           |                                                                                                                                    |                                                                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Placa plana</p>          |  <p>Aire</p>                                             |  <p>Vacío</p>                                            |  <p>Cónicos o esféricos</p>                      |  <p>Tubos de calor (heatpipe)</p> |
|  <p>Absorción directa</p> |                                                                                                                                           |                                                                                                                                           |                                                                                                                                    |                                                                                                                      |
| CONCENTRACIÓN                                                                                                 |                                                                                                                                           |                                                                                                                                           |                                                                                                                                    |                                                                                                                      |
|  <p>Central de torre</p>   |  <p>Central de Disco Parabólico con Motor Stirling</p> |  <p>Central de concentrador de cilindro parabólico</p> |  <p>Central de Concentrador Lineal Fresnel</p> |                                                                                                                      |

Tabla 2-3 Clasificación de los colectores solares térmicos (elaboración propia)

## 2.4 Desafíos del rendimiento de los paneles solares térmicos

Aunque la tecnología de captación solar térmica está muy desarrollada y es muy eficiente en la conversión de la radiación solar en calor útil, existen diversos factores que pueden afectar su rendimiento real. Estos desafíos pueden agruparse en factores ambientales externos y limitaciones técnicas propias del sistema.

### 2.4.1 Factores Ambientales

Es fundamental tener en cuenta una serie de factores que pueden influir en su rendimiento [25] [26]:

- **Variación en la radiación solar:** la disponibilidad de irradiación fluctúa con la hora del día, la estación del año, la latitud geográfica y la meteorología (nubosidad, niebla, etc.). La eficiencia instantánea de un colector depende directamente de la intensidad de radiación absorbida; por tanto, en días nublados o en invierno (cuando el ángulo solar es bajo y las horas de sol son menores) el rendimiento energético disminuye.
- **Ambientes extremos:** las condiciones de muy baja o muy alta temperatura ambiente pueden comprometer la operación. En climas fríos, existe riesgo de congelación del fluido en los colectores o tuberías, lo que demanda el uso de anticongelantes y diseños especiales para proteger el sistema. En climas muy cálidos o bajo irradiación intensa sin consumo, los paneles pueden alcanzar estancamientos a altas temperaturas, provocando mayores pérdidas térmicas al ambiente e incluso sobrecalentamiento del fluido. Ambos extremos (congelamiento y sobrecalentamiento) requieren medidas de control para mantener el panel dentro de rangos seguros de operación.
- **Acumulación de polvo y suciedad:** con el tiempo, la suciedad, el polvo, el polen u otros detritos atmosféricos pueden depositarse sobre la cubierta del colector. Esta película de suciedad reduce la transmitancia de la cubierta y por tanto disminuye la fracción de radiación solar que llega al absorbedor. Estudios experimentales indican que en entornos muy polvorientos las pérdidas de rendimiento por suciedad pueden superar el 10–15% tras algunas semanas sin limpieza [27]. Por ello, el mantenimiento (limpieza de los paneles) es esencial para asegurar un rendimiento sostenido.
- **Sombras y orientación incorrecta:** obstáculos como construcciones o árboles pueden disminuir la eficacia si no se mejora la inclinación y dirección del colector. Es importante instalar los captadores con la inclinación y azimut adecuados para la localización, evitando sombras durante las horas solares clave.

### 2.4.2 Limitaciones técnicas

Los paneles solares térmicos son una tecnología eficiente para la conversión de radiación solar en calor, pero presentan diversas limitaciones técnicas que pueden afectar su rendimiento y aplicación en ciertos contextos como, por ejemplo: pérdidas térmicas, necesidad de almacenamiento y distribución eficiente, limitación en temperaturas alcanzadas, altos costos de instalación y mantenimiento. [28] [29] [30].

A pesar de estas limitaciones, siguen siendo una tecnología viable y eficiente para la generación de calor en aplicaciones residenciales e industriales. Para maximizar su rendimiento, es importante considerar [31]:

- ✓ Sistemas de almacenamiento térmico adecuados.
- ✓ Mantenimiento preventivo para evitar pérdidas de eficiencia.
- ✓ Uso de tecnologías complementarias como intercambiadores de calor y bombas eficientes.

### 2.4.3 Simulación y Evaluación del Rendimiento

- **Dificultad para realizar mediciones precisas in situ:** las fluctuaciones del clima (radiación variable, viento, temperatura ambiente cambiante) dificultan obtener mediciones reproducibles y precisas.
- **Ensayos en laboratorio vs. condiciones reales:** en entornos de laboratorio se pueden establecer condiciones controladas, pero pueden diferir de los escenarios reales. Las normas internacionales (por ejemplo, UNE-EN ISO 9806) establecen métodos de ensayo estandarizados para caracterizar colectores solares en condiciones controladas. Sin embargo, extrapolar esos resultados de laboratorio al comportamiento en campo abierto requiere cautela. En este contexto, resulta importante diseñar instalaciones de ensayo capaces de recrear escenarios cercanos a los reales, para lograr que los datos de rendimiento medidos sean representativos. Precisamente, el banco de ensayos del laboratorio de Mecánica y Energía (objeto de este TFG) busca ese objetivo: probar un panel solar en condiciones controladas pero ajustadas a las de uso real, combinando la estabilidad del entorno de laboratorio con la relevancia práctica de los resultados.

## 2.5 Fluidos caloportadores habituales en las instalaciones solares térmicas.

En las instalaciones solares térmicas, el fluido caloportador es el medio que transporta la energía térmica desde el colector hasta el punto de uso o de intercambio. La elección del fluido de trabajo es fundamental, ya que sus propiedades físicas influyen directamente en la eficiencia y la operatividad del sistema. Los fluidos más utilizados incluyen agua, mezclas de agua y glicol (para evitar congelación), y aceites térmicos en aplicaciones de mayor temperatura.

### 2.5.1 Agua

Es el fluido caloportador por excelencia en muchos sistemas solares térmicos debido a sus excelentes propiedades termo-físicas, incluyendo los paneles solares de absorción directa. Su utilización presenta beneficios e inconvenientes que dependen de la aplicación particular y las condiciones de operación que se describirán a continuación [32].

Algunas ventajas son [33] [34] [35]:

- ✓ Su alta conductividad térmica y baja viscosidad.
- ✓ Su alta capacidad calorífica (aproximadamente  $4,18 \left( \frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$ ).
- ✓ No es tóxica ni contaminante.
- ✓ Fácil de encontrar y bajo coste.
- ✓ Se puede compaginar con sistemas de almacenamiento térmico.

Sin embargo, algunos de los inconvenientes son [36] [33] [37]:

- ✗ El riesgo de congelación.
- ✗ La formación de corrosión e incrustaciones.
- ✗ La evaporación de esta en sistemas abiertos.
- ✗ La baja estabilidad térmica a altas temperaturas.

### 2.5.2 Glicoles

Los glicoles son compuestos orgánicos de la familia de los alcoholes. En una molécula de un glicol hay dos grupos hidroxilo. Son una alternativa frecuentemente empleada como líquido de enfriamiento en paneles solares térmicos, particularmente en regiones frías donde el peligro de congelación del agua puede poner en riesgo la eficacia y protección del sistema. Principalmente, se utilizan en forma de combinaciones de agua y glicol, que ofrecen defensa contra la congelación y potencian la estabilidad térmica del sistema [38].

Las ventajas en general de los glicoles son [39]:

- ✓ Protección frente a la congelación.
- ✓ Un aumento del punto de ebullición.
- ✓ Menor corrosión que el agua.
- ✓ Mayor estabilidad térmica.
- ✓ Menos problemas por incrustación.

Por el contrario, los principales inconvenientes de los glicoles son [30] [36]:

- ✗ Menor capacidad calorífica que el agua aislada.
- ✗ Mayor viscosidad que esta.
- ✗ Descomposición térmica.
- ✗ Aumento del coste del fluido.
- ✗ Necesario un mantenimiento y reposición.

Los glicoles más habituales para aplicaciones de energía térmica son el etilenglicol y el propilenglicol. A continuación, en la Tabla 2-4 se detallan sus principales diferencias:

| Característica       | Etilenglicol (EG)                      | Propilenglicol (PG)                    |
|----------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| Capacidad calorífica | Moderada y ligeramente menor que el PG | Moderada, mitad que la del agua        |
| Viscosidad           | Moderada, menor que PG                 | Alta, mayor que EG                     |
| Estabilidad térmica  | Buena, mayor que PG                    | Buena, menor que el EG                 |
| Anticorrosión        | Buena protección                       | Buena protección                       |
| Toxicidad            | Alta                                   | Baja                                   |
| Coste                | Más barato                             | Más costoso                            |
| Biodegradabilidad    | Poco biodegradable                     | Más biodegradable y menos contaminante |

**Tabla 2-4 Principales diferencias entre el etilenglicol y el propilenglicol (elaboración propia) [40].**

Destacar la toxicidad, la principal diferencia entre ambos.

A continuación, la Tabla 2-5 que indica las temperatura de congelación obtenidas para diferentes mezclas en peso de etilenglicol y propilenglicol con agua [40]:

| <b>% GLICOL</b> | <b>TEMPERATURA DE CONGELACIÓN MEZLA EG Y AGUA (°C)</b> | <b>TEMPERATURA DE CONGELACIÓN MEZLA PG Y AGUA (°C)</b> |
|-----------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 10%             | -2,2                                                   | -3,0                                                   |
| 20%             | -6,7                                                   | -8,0                                                   |
| 30%             | -12,8                                                  | -14,0                                                  |
| 40%             | -20,6                                                  | -22,0                                                  |
| 50%             | -33,3                                                  | -34,0                                                  |

**Tabla 2-5 Porcentaje de glicol frente a la temperatura de congelación (elaboración propia) [40].**

En este trabajo se utilizan distintas muestras de propilenglicol y agua. A continuación, la Figura 2-8 muestra las temperaturas de congelación para las distintas proporciones de propilenglicol y agua.

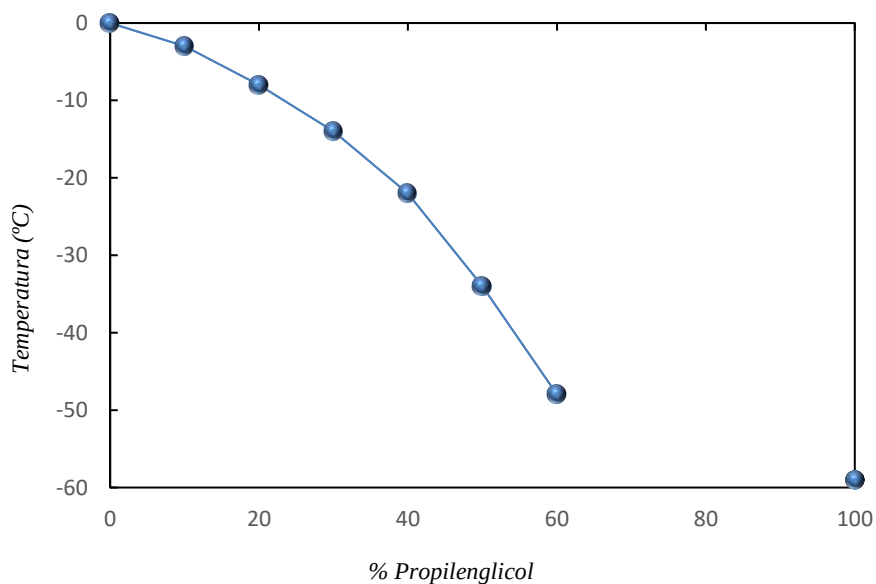


**Figura 2-8 Proporción de propilenglicol y temperatura de congelación (elaboración propia).**

## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Modificación del banco de ensayos

El banco de ensayos del laboratorio permite evaluar el rendimiento de un panel solar térmico de absorción directa, sin embargo, los saltos de temperatura en el intercambiador de calor son reducidos ( $<0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), lo que limita su representatividad en condiciones reales de uso. En usos prácticos, como la calefacción o el calentamiento de agua, los saltos de temperatura en el intercambiador suelen ser  $> 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (con valores típicos de hasta  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), lo que implica que el sistema actual no representa con exactitud el comportamiento previsto en un ambiente operativo real como se presentó en el anterior trabajo de fin de grado [41].

Estos estudios previos han demostrado que una mayor diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del intercambiador de calor mejora la eficiencia global del sistema al permitir una mayor absorción de energía solar en el fluido de trabajo [41] [20] [28]. En el montaje original, el intercambiador de calor calentaba agua de un depósito abierto, que estabilizaba su temperatura con la temperatura ambiente del laboratorio. Para conseguir un salto de temperatura más alto en el intercambiador, es necesario modificar el banco de ensayos mediante la implementación de un sistema de refrigeración que enfríe el fluido de trabajo antes de que reingrese al panel, simulando el proceso de calentamiento de un depósito de agua fría.

#### 3.1.1 Necesidad de la modificación

La implementación de un sistema de refrigeración en el banco de ensayos permitirá reducir la temperatura del fluido de trabajo antes de su reentrada en el panel, favoreciendo así una mayor absorción de energía solar y logrando incrementos de temperatura más cercanos a los valores reales de aplicación. Para ello, se propone la integración de un baño termostático refrigerado para mejorar el control de la temperatura de entrada al panel solar.

#### 3.1.2 Baño termostático

El baño termostático es una herramienta de laboratorio que se compone de un recipiente repleto de un fluido térmico capaz de calentarse o enfriarse hasta la temperatura requerida, manteniendo un valor constante mediante un sistema de refrigeración y control térmico.

Las cubas generalmente se fabrican con acero inoxidable, mientras que el baño termostático cuenta con un sistema de control externo digital (con precisión de  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  para garantizar estabilidad térmica) que posibilita al investigador establecer diversos ciclos y automatizar el procedimiento. Su rango de temperaturas es de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ajustable según necesidades del ensayo).

Los baños termostáticos se emplean para calentar ciertos materiales, usualmente como un paso intermedio requerido para un ensayo de mayor envergadura. Por lo tanto, los baños termostáticos son

instrumentos esenciales en numerosos laboratorios que los emplean en variados procedimientos. En nuestro caso:

- Permite simular el calentamiento de agua fría de un depósito.
- Permite alcanzar temperaturas de entrada controladas en el panel solar.
- Mejora la estabilidad térmica del sistema, evitando variaciones no deseadas en los ensayos.
- Optimiza la absorción de energía solar, aumentando la eficiencia del panel térmico.

### 3.1.3 Beneficios esperados

- **Mejor representación de condiciones operativas reales:** al aumentar el salto térmico, se podrán evaluar con mayor precisión los efectos de la radiación solar en la temperatura del fluido. [42]
- **Mayor precisión en la evaluación del rendimiento del panel:** la modificación permitirá realizar mediciones más realistas del coeficiente de transferencia de calor y eficiencia térmica.
- **Optimización del diseño y operación del sistema:** se podrán analizar diferentes configuraciones de montaje y estrategias de refrigeración, proporcionando datos útiles para futuras aplicaciones.
- **Ampliación del rango de ensayos del banco experimental:** se podrá estudiar el rendimiento del panel en diferentes escenarios de temperatura y radiación, facilitando la investigación de estrategias para mejorar la eficiencia de estos sistemas en climas variables [43].

## 3.2 Equipo experimental

Para llevar a cabo el estudio, se ha modificado el banco de ensayos utilizado en otro Trabajo de Fin de Grado del CUD “*Determinación del rendimiento de fluidos térmicos en un banco de ensayos basado en un panel solar*” [44]. Dicho banco presentaba el inconveniente de que el fluido térmico se almacenaba a temperatura ambiente como observamos en la Figura 3-1, generando saltos de temperatura reducidos. Este problema se ha solucionado mediante la incorporación de un baño termostático, permitiendo así evaluar el comportamiento del sistema en condiciones controladas, como se detallará más adelante.



Figura 3-1 Banco de ensayos del anterior TFG con el depósito a temperatura ambiente [44].

El equipo experimental modificado de este trabajo en cuestión está compuesto por diversos elementos que garantizan la precisión en la adquisición de datos y la reproducibilidad de los ensayos.

A continuación, se detallará el proceso de montaje y sus componentes como podemos ver en la Figura 3-2.

- **Circuito hidráulico:** diseñado para permitir la circulación y control del fluido de trabajo dentro del sistema experimental. Este circuito está compuesto por una serie de componentes interconectados, incluyendo bombas, tubos, válvulas e intercambiadores de calor, que regulan el flujo y la temperatura del fluido. Su función principal es garantizar un transporte eficiente de la energía térmica dentro del banco de ensayos, permitiendo la evaluación del rendimiento del sistema bajo distintas condiciones operativas.
- **Circuito eléctrico:** conjunto de elementos encargados de suministrar energía eléctrica a los distintos componentes del sistema, incluyendo las bombas y el sistema de adquisición de datos, garantizando su correcto funcionamiento y operatividad durante los ensayos.
- **Sistema de adquisición de datos:** unión de hardware y software diseñado para la captura, procesamiento y almacenamiento de señales. Su función principal es registrar y visualizar los datos en tiempo real, facilitando su posterior análisis y evaluación.



Figura 3-2 Instalación del banco de ensayos (elaboración propia).

### 3.3 Circuito hidráulico

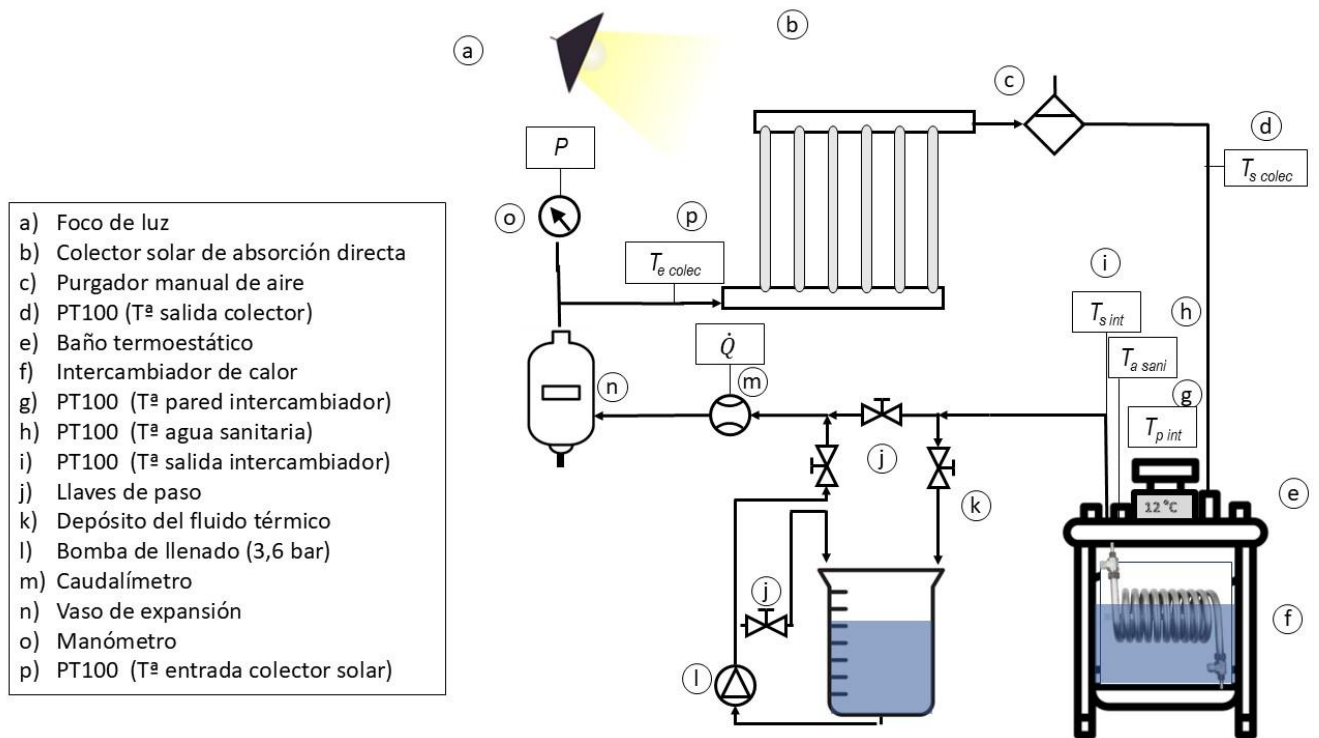


Figura 3-3 Circuito hidráulico (elaboración propia).

#### ➤ Colector solar de tubos transparentes de metacrilato

Es un colector solar de absorción directa de tubos transparentes de metacrilato, Su funcionamiento se basa en la absorción directa de la radiación solar por el fluido, sin la necesidad de una superficie de absorción metálica intermedia, como ocurre en los colectores solares convencionales. Fue desarrollado en el Taller de mecanizado del CACTI<sup>2</sup> de la Universidad de Vigo. Sus dimensiones son de 430 mm de longitud total y 355 mm de ancho total. En la Tabla 3-1 se detallarán sus dimensiones:

**Colector tubos metacrilato**

| Componentes           | Longitud, $L_{col}$   | Diámetro exterior, $d_{ext\ col}$ | Diámetro interior, $d_{inter\ col}$ |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Tubos horizontales x2 | $360,00 \pm 0,01\ mm$ | $20,00 \pm 0,01\ mm$              | $16,00 \pm 0,01\ mm$                |
| Tubos verticales x6   | $315,00 \pm 0,01\ mm$ | $15,00 \pm 0,01\ mm$              | $11,00 \pm 0,01\ mm$                |

Tabla 3-1 Dimensiones de los elementos del colector solar (elaboración propia).

<sup>2</sup> Centro de Apoyo Científico-Tecnológico a Investigación



Figura 3-4 Colector solar (elaboración propia).

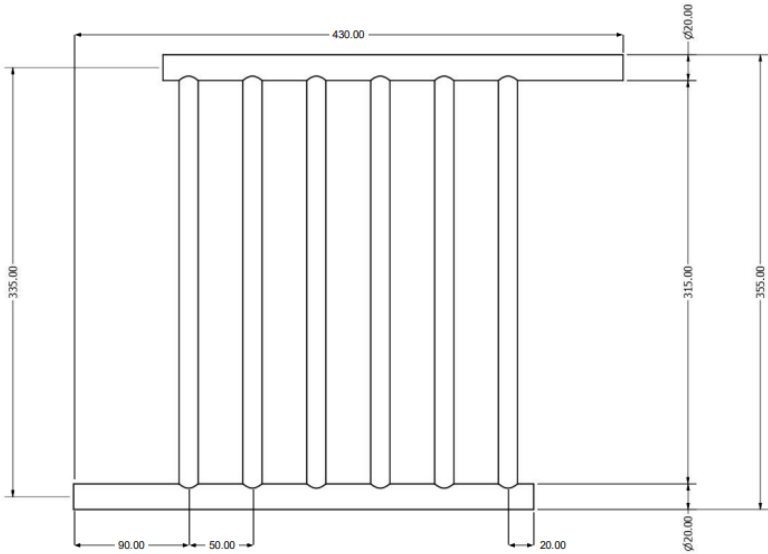


Figura 3-5 Planta y dimensiones del colector solar [41].

## ➤ Intercambiador helicoidal

El intercambiador de calor helicoidal sumergido en un baño termostático es utilizado para transferir calor entre dos fluidos, donde un fluido circula dentro de un tubo helicoidal y el otro fluido (generalmente un refrigerante o un fluido térmico) rodea el tubo dentro de un baño termostático de temperatura controlada. A continuación, están reflejadas sus características en la Tabla 3-2.

| Características Intercambiador de calor                                                                         |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Conductividad térmica, $k_{cu}$                                                                                 | 385 - 401 $W/m \cdot K$ |
| Cantidad de espiras, $n_{esp}$                                                                                  | 16 espiras              |
| Diámetro de conexión del tubo, $d_{tu}$                                                                         | 12,00 ± 0,05 mm         |
| Diámetro del intercambiador,<br>$d_{int}$                                                                       | 100,00 ± 0,05 mm        |
| Paso de la bobina, $p_{bob}$                                                                                    | 195,00 ± 0,05 mm        |
| Diámetro del tubo exterior, $d_{tu\ ext}$                                                                       | 8,00 ± 0,05 mm          |
| Diámetro del tubo interior, $d_{tu\ inter}$                                                                     | 6,00 ± 0,05 mm          |
| Área del intercambiador<br>$A = n_{esp} \cdot \pi \cdot d_{tu\ ext} \cdot \sqrt{p_{bob}^2 + \pi^2 \cdot D_i^2}$ | 0,1264 m <sup>2</sup>   |

Tabla 3-2 Características del intercambiador de calor (elaboración propia).



**Figura 3-6 Intercambiador helicoidal (elaboración propia).**

➤ Baño termostático

El baño termostático (Figura 3-7) es un dispositivo diseñado para mantener un fluido a una temperatura precisa, constante y controlada dentro de un recipiente, permitiendo la inmersión de objetos o sistemas que requieren estabilidad térmica. En este caso el dispositivo es el baño de circulación de PolyScience con controlador de temperatura MX, que tiene las siguientes características [45]:

| Tipo de modelo                                         | Capacidad del depósito | Intervalo de temperatura          |                  |
|--------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------|
|                                                        |                        | $^{\circ}C$                       | $F$              |
| Baño de refrigeración / calentamiento, modelo MX07R-20 | 7 litros               | -20 $^{\circ}C$ a 135 $^{\circ}C$ | -4 $F$ a 275 $F$ |

**Tabla 3-3 Características baño termostático (elaboración propia).**

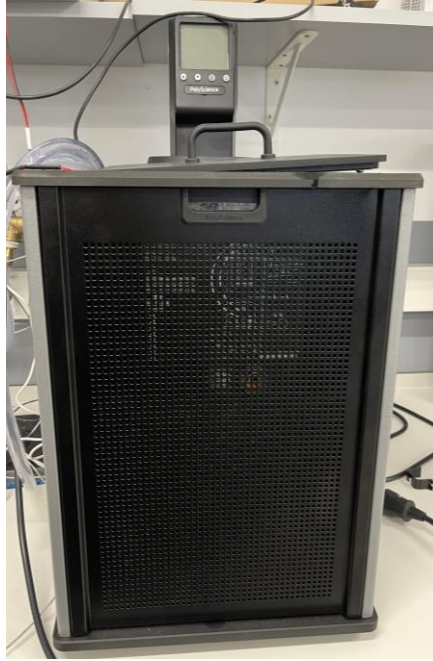


**Figura 3-7 Baño termostático (elaboración propia).**

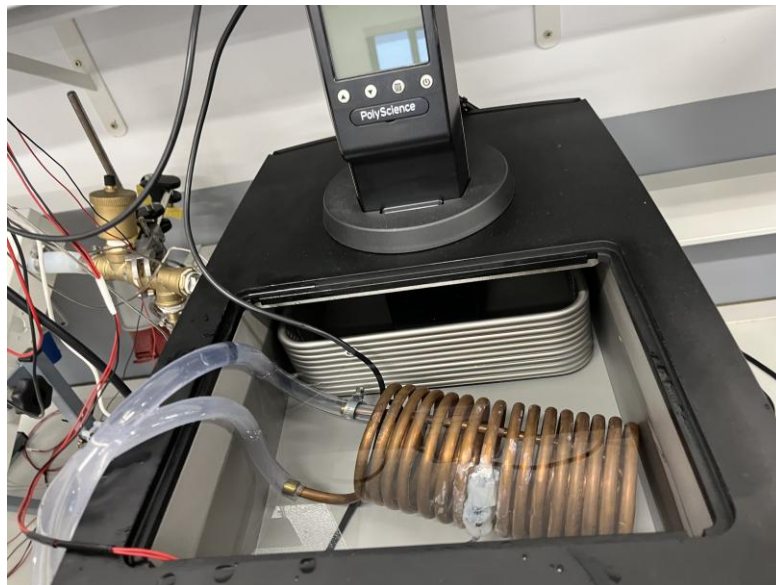


**Figura 3-8 Intercambiador de calor dentro del baño termostático (elaboración propia).**

### 3.4 Circuito eléctrico

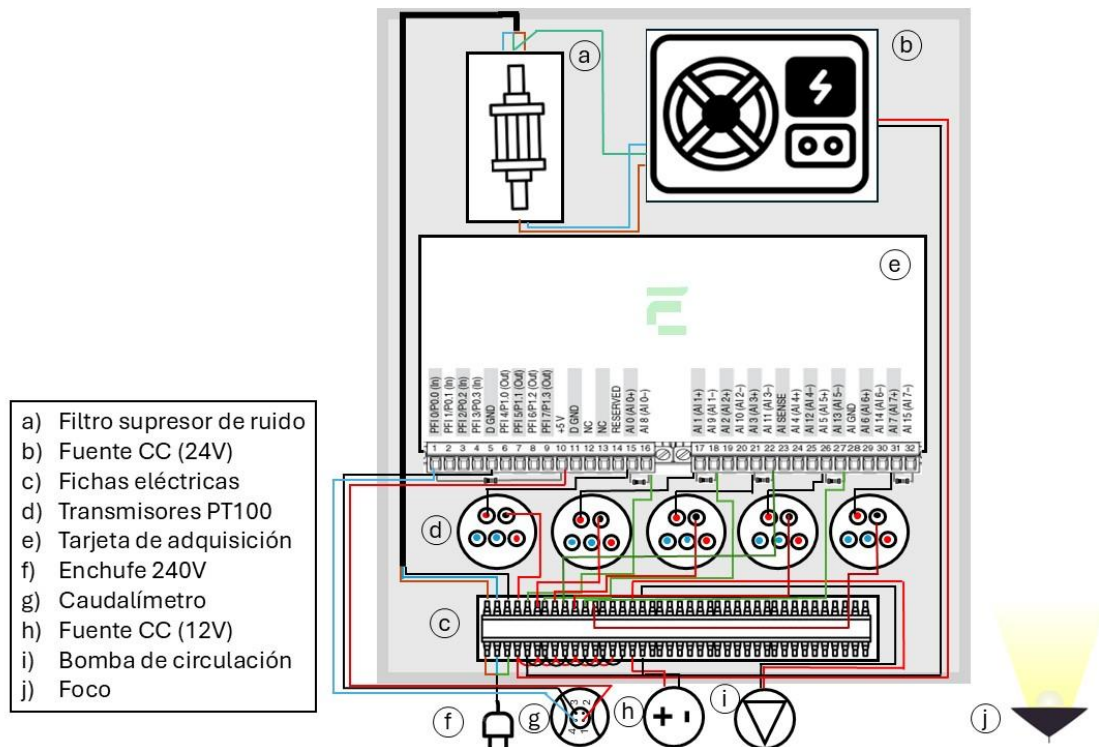


Figura 3-9 Circuito eléctrico (elaboración propia).

#### ➤ Fuente de 24 V

Se alimenta con corriente alterna (CA) de 230 V a 50 Hz. La corriente atraviesa un filtro eléctrico, cuyo propósito es eliminar el ruido de los armónicos causados por interferencias en la red eléctrica del laboratorio de investigación. Posteriormente, la corriente alterna suministra energía a la fuente de alimentación, que convierte la CA en corriente continua (CC) de 24 V.

#### ➤ Transmisores / conversores de temperatura Pt-100

Un Pt100 es un tipo de termorresistencia (RTD<sup>3</sup>) fabricada en platino que presenta una resistencia nominal de 100  $\Omega$  a 0 °C. La fuente, explicada previamente, de 24 V se emplea para suministrar energía a los cinco transmisores/conversores (Figura 3-10 Transmisores / conversores de temperatura Pt-100 (elaboración propia).). Estos módulos electrónicos miden la resistencia térmica de la placa de platino y generan una señal estandarizada de 4 - 20 mA, que es enviada a la tarjeta de adquisición de datos. Posteriormente, dicha señal es escalada y convertida en valores de temperatura.



Figura 3-10 Transmisores / conversores de temperatura Pt-100 (elaboración propia).

<sup>3</sup> Resistive Temperature Detector.

➤ *Bomba de circulación Einhell*

La bomba de GC-GP 6538 (Figura 3-11) es un equipo potente, compacto y fiable. Con un motor de 650 W la bomba impulsa por hora hasta 3.800 litros de agua. La GC-GP 6538 dispone de un interruptor on/off. Un tornillo de llenado de agua posibilita el llenado separado, el agua restante se vacía a través de un tornillo de purga de agua. La bomba se puede transportar fácilmente gracias al asa de transporte.



**Figura 3-11 Bomba GC-GP 6538 [46].**

A continuación, en la Tabla 3-4 se detallan los tecnicismos de esta:

|                                           |          |
|-------------------------------------------|----------|
| <b>Altura máx. de aspiración</b>          | 8 m      |
| <b>Altura máx. de entrega</b>             | 36 m     |
| <b>Caudal máx.</b>                        | 3800 L/h |
| <b>Longitud del cable de alimentación</b> | 1.4 m    |
| <b>Peso del producto</b>                  | 5.65 kg  |
| <b>Potencia</b>                           | 650 W    |
| <b>Presión máx. de salida</b>             | 3.6 bar  |
| <b>Temperatura máxima del agua</b>        | 35 °C    |

**Tabla 3-4 Detalles técnicos de la bomba [46].**

➤ *Portalámparas de cerámica con bombilla incandescente 250 W*

Este portalámparas (Figura 3-12) es ideal para experimentos con radiación de calor. [47]

Ficha técnica:

- Potencia máxima: 250 (500) W
- Diámetro del reflector: 200 mm
- Profundidad del reflector: 165 mm
- Masa: 750 g



**Figura 3-12 Portalámparas [47].**

Las lámparas reflectoras incandescentes de infrarrojos de Philips (Figura 3-13) están diseñadas para operar en entornos exigentes, como granjas, baños y cocinas, así como en sus áreas circundantes. Su estructura reforzada, fabricada con vidrio endurecido, les confiere una gran resistencia. Además, su diseño compacto y la base universal facilitan su compatibilidad con una amplia variedad de equipos, como podemos ver en la Figura 3-13.

El uso de lámparas de calor es una excelente alternativa para la generación eficiente de este, ya que ofrecen una emisión de calor directa y sin corrientes de aire [48].

Ficha técnica:

- Voltaje: 230-250 V
- Diámetro (D): 125 mm
- Profundidad (C): 173 mm
- Masa: 107 g
- Material: Vidrio duro
- Vida útil nominal (horas): 5.000 hora(s)
- Tipo de tecnología: Incandescente

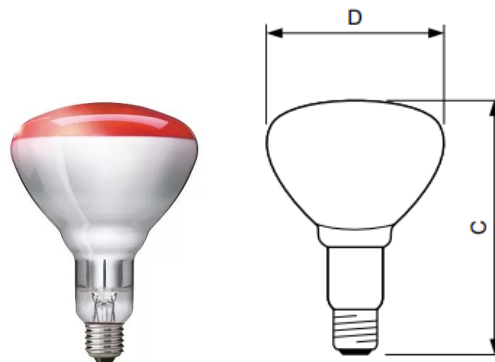


**Figura 3-13 Bombilla incandescente Phillips [48].**

### 3.4.1 Sistema de adquisición de datos

- Tarjeta de adquisición de datos

Proporciona el intercambio de datos entre el software y los sensores, almacenando estos, convirtiéndolos y leyéndolos. Se conecta al ordenador mediante un cable USB y la tarjeta utilizada es la NI USB-6210. A continuación, sus conexiones:

| Pin | Nombre          | Función                                          |
|-----|-----------------|--------------------------------------------------|
| 1.  | PFI 0/P0.0 (In) | Cuenta los pulsos generados por el caudalímetro  |
| 5.  | GND             | Conexión a tierra del caudalímetro               |
| 10. | +5 V            | Alimentación del caudalímetro (5V)               |
| 15. | AI 0+           | Entrada del sensor $T_{sal\ col} = T_{ent\ int}$ |
| 16. | AI 0-           | Salida del sensor $T_{sal\ col} = T_{ent\ int}$  |
| 17. | AI 1+           | Entrada del sensor $T_d$                         |
| 18. | AI 1-           | Salida del sensor $T_d$                          |
| 21. | AI 3+           | Entrada del sensor $T_{p\ int}$                  |
| 22. | AI 3-           | Salida del sensor $T_{p\ int}$                   |
| 26. | AI 5+           | Entrada del sensor $T_{sal\ int}$                |
| 27. | AI 5-           | Salida del sensor $T_{sal\ int}$                 |
| 31. | AI 7+           | Entrada del sensor $T_{ent\ col}$                |
| 32. | AI 7-           | Salida del sensor $T_{ent\ col}$                 |

Tabla 3-5 Conexiones de la tarjeta de adquisición de datos (elaboración propia).

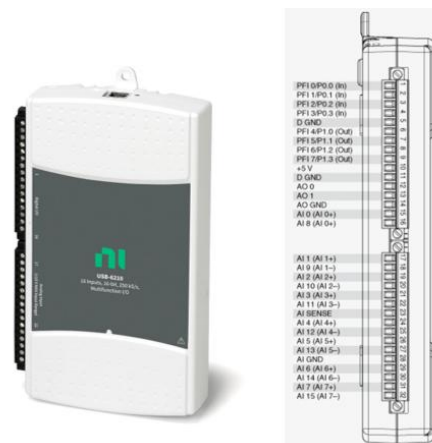


Figura 3-14 Tarjeta NI USB-6210 [49].

#### ➤ Software LabVIEW 2017

LabVIEW 2017 (Figura 3-15) es un entorno de desarrollo gráfico de National Instruments utilizado para el diseño, control y automatización de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y pruebas. Algunas de sus características principales incluyen:

- Utiliza diagramas de bloques en lugar de código basado en texto, lo que facilita el desarrollo y depuración de aplicaciones.
- Compatible con una amplia gama de hardware de adquisición de datos (DAQ<sup>4</sup>).
- Compatible con dispositivos NI<sup>5</sup>.
- Puede ejecutarse en sistemas Windows.
- Incluye bibliotecas para análisis de señales, procesamiento de imágenes y simulaciones.
- Permite diseñar interfaces de usuario interactivas con gráficos en tiempo real y controles intuitivos (Figura 3-16).

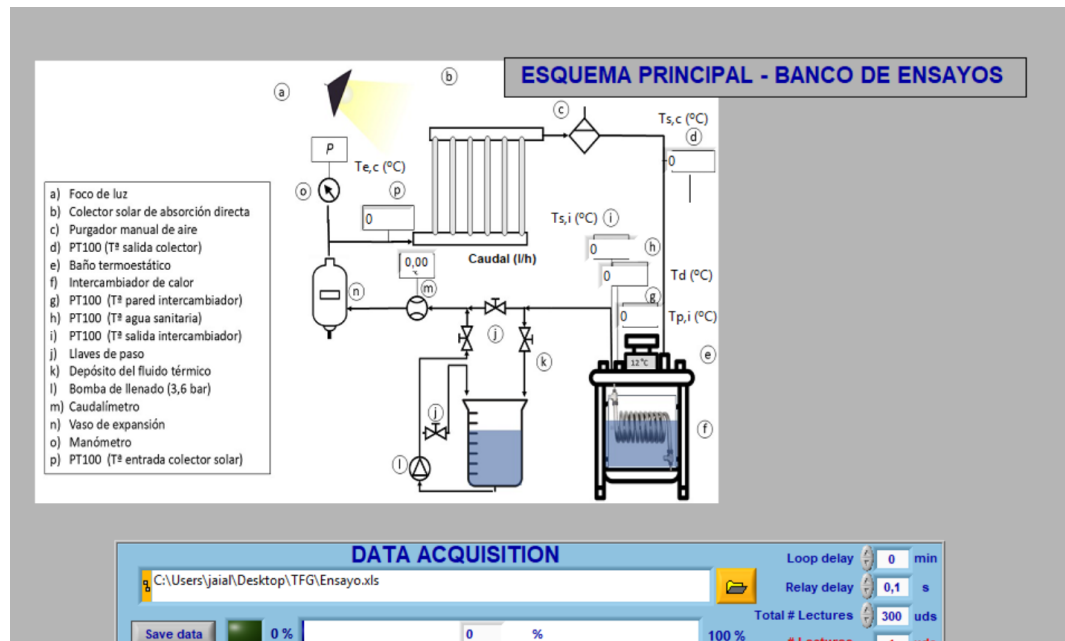


Figura 3-15 Página principal de LabView 2017 (elaboración propia).

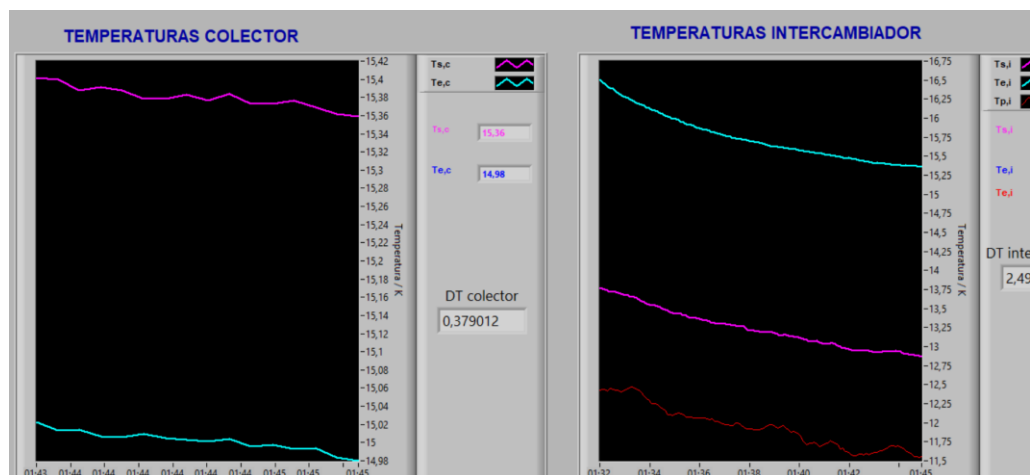


Figura 3-16 Gráficos para la adquisición de datos, pantalla secundaria LabView (elaboración propia).

### 3.5 Fluidos utilizados

En el banco de ensayos se contempló el uso de agua como fluido de trabajo, dada su disponibilidad, bajo costo y buen comportamiento térmico. No obstante, para condiciones con riesgo de congelación,

<sup>4</sup> Data Acquisition.6

<sup>5</sup> National Instruments.

así como para aplicaciones que demandan mayor estabilidad, se utilizaron también soluciones con propilenglicol (PG:A 10:90; PG:A 20:80; PG:A 30:70). Estas mezclas disminuyen el punto de congelación, mejoran la protección del sistema y mantienen unas propiedades termo físicas adecuadas, garantizando un rendimiento estable en distintos rangos de temperatura.

### 3.5.1 Preparación de los fluidos

- Agua: se usaron 4000g de agua pura en los ensayos.
- Propilenglicol 10% Agua 90%: se utilizaron 3600g de agua y 400g de propilenglicol como podemos ver en la Figura 3-17.



Figura 3-17 Preparación mezcla 10:90 (elaboración propia).

- Propilenglicol 20% Agua 80%: se combinaron en el laboratorio 800g de propilenglicol y 3200g de agua (Figura 3-18).

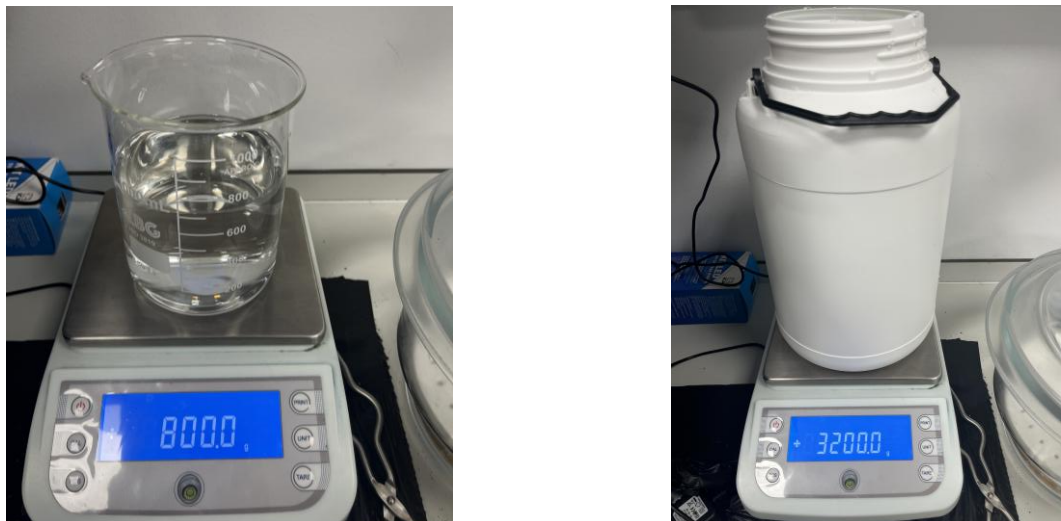


Figura 3-18 Preparación mezcla 20:80 (elaboración propia).

- Propilenglicol 30% Agua 70%: se mezclaron 2800g de agua y 1200g de propilenglicol en el laboratorio como a continuación, en la Figura 3-19.



**Figura 3-19 Preparación mezcla 30:70 (elaboración propia).**

### 3.5.2 Propiedades termo físicas del agua

Para el desarrollo de este trabajo, se hace uso de las propiedades básicas del agua, a partir de datos de la literatura [50]: su densidad ( $\rho_A$ ), su calor específico ( $c_{pA}$ ) que la convierte en uno de los fluidos más adecuados para la transferencia de calor. Asimismo, su viscosidad dinámica ( $\mu_A$ ) y su conductividad térmica ( $k_A$ ). Cabe destacar que estas propiedades varían con la temperatura, de modo que, a medida que el agua se calienta o enfría, cambia su densidad, su capacidad calorífica y su conductividad, entre otras características. Se han empleado estas propiedades para dimensionar y evaluar el rendimiento térmico del sistema, asegurando la correcta selección y calibración de los equipos de medición.

$$\rho_A = 0,00002798 \cdot T^3 - 0,03002 \cdot T^2 + 10,18 \cdot T - 111,50 \quad \text{Ec 3-1}$$

$$c_{pA} = -0,0001158 \cdot T^3 + 0,1118 \cdot T^2 - 37,54 \cdot T + 8490,42 \quad \text{Ec 3-2}$$

$$\mu_A = 9,756 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 - 1,2435 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 5,957 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,01273 \cdot T + 1,024 \quad \text{Ec 3-3}$$

$$k_A = 7,670 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 - 8,141 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,02978 \cdot T - 3,068 \quad \text{Ec 3-4}$$

### 3.5.3 Propiedades termo físicas Propilenglicol:Agua 10:90

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de las propiedades termo físicas de la muestra PG:A 10:90 en función de la temperatura (en K), calculadas a partir de los datos de la literatura [51] recogidos en el Anexo III: Propiedades termo físicas de los fluidos, son:

$$\rho_A = 0,00002111 \cdot T^3 - 0,02330 \cdot T^2 + 7,959 \cdot T + 144,02 \quad \text{Ec 3-5}$$

$$c_{pA} = -0,00001616 \cdot T^3 + 0,017709 \cdot T^2 - 4,978 \cdot T + 4421,808 \quad \text{Ec 3-6}$$

$$\mu_A = 7,2916 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 - 9,93446 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 0,0000507 \cdot T^2 - 0,0115 \cdot T + 0,986 \quad \text{Ec 3-7}$$

$$k_A = 0,000000002472 \cdot T^3 - 0,00000652 \cdot T^2 + 0,0045 \cdot T - 0,278 \quad \text{Ec 3-8}$$

### 3.5.4 Propiedades termo físicas Propilenglicol:Agua 20:80

Estás serán las propiedades termo físicas para la mezcla PG:A 20% propilenglicol y 80% agua.

$$\rho_A = 0,000016305 \cdot T^3 - 0,01834 \cdot T^2 + 6,204 \cdot T + 360,916 \quad \text{Ec 3-9}$$

$$c_{pA} = -0,000016165 \cdot T^3 + 0,017709 \cdot T^2 - 4,9789 \cdot T + 4421,808 \quad \text{Ec 3-10}$$

$$\mu_A = 7,2916^{-11} \cdot T^4 - 9,9344^{-8} \cdot T^3 + 0,0000507 \cdot T^2 - 0,01154 \cdot T + 0,986 \quad \text{Ec 3-11}$$

$$k_A = 0,000000002472 \cdot T^3 - 0,00000652 \cdot T^2 + 0,0045025 \cdot T - 0,27868 \quad \text{Ec 3-12}$$

### 3.5.5 Propiedades termo físicas Propilenglicol:Agua 30:70

Para la el PG:A 30:70, tendremos las siguientes propiedades termo físicas:

$$\rho_A = 0,00001329 \cdot T^3 - 0,0150159 \cdot T^2 + 4,9258 \cdot T + 535,3718 \quad \text{Ec 3-13}$$

$$c_{pA} = -0,00002888 \cdot T^3 + 0,02639 \cdot T^2 - 5,3574 \cdot T + 3883,676 \quad \text{Ec 3-14}$$

$$\mu_A = 1,9262^{-10} \cdot T^4 - 2,64936^{-7} \cdot T^3 + 0,0001366 \cdot T^2 - 0,03137 \cdot T + 2,7042 \quad \text{Ec 3-15}$$

$$k_A = -0,00000000493 \cdot T^3 + 0,0000042202 \cdot T^2 - 0,000381 \cdot T + 0,3182 \quad \text{Ec 3-16}$$

## 3.6 Procedimiento experimental

A continuación, se describe el protocolo experimental empleado:

### I. Preparación del sistema e inyección del fluido.

#### 1. Verificación de la instrumentación

- Inicialmente, se conectan los sensores de temperatura y caudal para confirmar que proporcionan lecturas fiables.

#### 2. Inicio del llenado

- Con la bomba encendida, el fluido se hace circular a baja presión para evitar brusquedades.
- La válvula de circulación permanece cerrada, mientras que la línea de purga y la recirculación se mantiene abierta para desalojar posibles burbujas de aire.

#### 3. Estabilización de la presión

- La presión requerida para la toma de datos será de entre 1,5-2 bar.

#### 4. Comprobación de aire residual

- Se revisa si quedan burbujas en el circuito. De estar despejado, se clausura la purga de aire.
- Con ello se garantiza un flujo uniforme y libre de embolsamientos.

### 5. Estabilización del baño termostático

- Se enciende el baño y se ajusta a la temperatura deseada.
- Para lograr un salto de temperatura en el intercambiador óptimo ( $>1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), se ha seleccionado una temperatura del fluido en el baño termostático de  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Así, desde la temperatura ambiente, éste tardará unos 30 minutos en estabilizarse.

## **II. Desarrollo del test y obtención de mediciones.**

### 1. Alineación y encendido de la fuente térmica

- Se dispone el foco a aproximadamente  $0,4\text{ m}$  de distancia del colector solar, enfocando al centro, para imitar la radiación solar.
- Tras encender el foco, el panel comienza a recibir energía de manera estable.

### 2. Fijación del caudal

- Con la bomba del circuito arrancada ajustamos el caudal inicial, cerrando o abriendo la válvula de recirculación.

### 3. Alcance del estado estable

- Las temperaturas se irán incrementando gradualmente hasta estabilizarse en un régimen estacionario.
- El tiempo requerido depende tanto de la magnitud del caudal como del tipo de fluido (comportamiento distinto en agua pura versus mezclas con glicol).

### 5. Toma de datos

- Durante la fase estacionaria, se registra información a lo largo de 10 minutos, acumulando 150 mediciones de cada sensor.
- Se repite la experiencia para distintos niveles de caudal (en este caso 100, 150, 200, 250, 300, 350 y  $400\text{ L/h}$ ), ver el conjunto de ensayos en la Tabla 3-6.
- Cada vez que se modifica el caudal, es necesario esperar de nuevo hasta que las variables térmicas se estabilicen antes de iniciar una nueva serie de recolección de datos como se puede ver en la Figura 3-20.



**Figura 3-20 Recopilación de datos en el banco de ensayos (elaboración propia).**

| Fluido     | Caudales analizados (L/h) | Temperatura de consigna<br>baño termostático (°C) |
|------------|---------------------------|---------------------------------------------------|
| Agua       | 100                       | 5                                                 |
|            | 150                       |                                                   |
|            | 200                       |                                                   |
|            | 250                       |                                                   |
|            | 300                       |                                                   |
|            | 350                       |                                                   |
|            | 400                       |                                                   |
| PG:A 10:90 | 100                       | 5                                                 |
|            | 150                       |                                                   |
|            | 200                       |                                                   |
|            | 250                       |                                                   |
|            | 300                       |                                                   |
|            | 350                       |                                                   |
|            | 400                       |                                                   |
| PG:A 20:80 | 100                       | 5                                                 |
|            | 150                       |                                                   |
|            | 200                       |                                                   |
|            | 250                       |                                                   |
|            | 300                       |                                                   |
|            | 350                       |                                                   |
|            | 400                       |                                                   |
| PG:A 30:70 | 100                       | 5                                                 |
|            | 150                       |                                                   |
|            | 200                       |                                                   |
|            | 250                       |                                                   |
|            | 300                       |                                                   |
|            | 350                       |                                                   |
|            | 400                       |                                                   |

Tabla 3-6 Recopilación de ensayos caudal vs temperatura del depósito (elaboración propia).

**III. Vaciado del líquido térmico y conservación del equipo.****1. Vaciado del circuito**

- Desconectando los componentes, se abre la válvula de evacuación para dejar salir el fluido.
- Dada la escasa altura disponible, parte del líquido puede permanecer en el colector tubular o en el intercambiador helicoidal.

**2. Desconexión de componentes y limpieza**

- Para un vaciado completo, algunos tramos del sistema se retiran físicamente y se limpian de forma individual.
- Esta higienización es crucial para evitar corrosiones, especialmente en zonas donde el fluido podría estancarse.

**3. Revisión y cierre**

- Se verifica que no queden restos en mangueras o rincones del intercambiador.
- El banco de ensayos queda así listo para su inactividad temporal o para un nuevo test con distinto fluido.

### 3.7 Análisis de datos

#### 3.7.1 Potencia térmica absorbida por el colector solar ( $Q_{col}$ )

En esta ecuación usaremos la **Ec 3-1** y **Ec 3-2** descritas anteriormente.

$$Q_{col} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{sal\ col} - T_{ent\ col}) \quad \text{Ec 3-17}$$

Donde:

- $\dot{Q}_{col}$  es la potencia térmica en el colector ( $W$ ).
- $\dot{m}$  es el caudal másico ( $\frac{kg}{s}$ ), que se puede expresar como  $\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$ , siendo:
  - $\rho$  la densidad del fluido ( $kg/m^3$ ).
  - $\dot{V}$  el caudal volumétrico ( $m^3/s$ ).
- $c_p$  es la capacidad calorífica específica del fluido ( $\frac{J}{kg \cdot K}$ ).
- $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre la salida y la entrada del colector ( $K$ ).

#### 3.7.2 Potencia térmica cedida por el intercambiador helicoidal ( $Q_{int}$ )

En esta ecuación usaremos la **Ec 3-1** y la **Ec 3-2** de nuevo.

$$Q_{int} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{sal\ int} - T_{ent\ int}) \quad \text{Ec 3-18}$$

Donde:

- $\dot{Q}_{int}$  es la potencia térmica en el intercambiador ( $W$ ).
- $\dot{m}$  es el caudal másico ( $\frac{kg}{s}$ ), que se puede expresar como  $\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$ , siendo:
  - $\rho$  la densidad del fluido ( $\frac{kg}{m^3}$ ).
  - $\dot{V}$  el caudal volumétrico ( $\frac{m^3}{s}$ ).
- $c_p$  es la capacidad calorífica específica del fluido ( $\frac{J}{kg \cdot K}$ ).
- $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre la salida y la entrada del intercambiador ( $K$ ).

#### 3.7.3 Coeficiente de convección experimental en el interior del intercambiador

$$U = \frac{1}{R_{total}} = \frac{Q_{int}}{A_{int} \cdot LMTD} \quad \text{Ec 3-19}$$

Donde se utilizará la **Ec 3-12** y donde:

- Media logarítmica de diferencias de temperaturas es  $LMTD = \frac{(T_{ent\ int} - T_d) - (T_{sal\ int} - T_d)}{\ln \left( \frac{T_{ent\ int} - T_d}{T_{sal\ int} - T_d} \right)}$
- $A_{int}$  es el Área del intercambiador ( $m^2$ ).
- $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor ( $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ).
- $T_d$  es la temperatura del agua del depósito ( $K$ ).

Tal como se muestra en la Figura 2-1 Figura 3-21, el proceso global de transferencia de calor consta de tres etapas principales:

- **Convección interna:** intercambio térmico entre el fluido de trabajo y la superficie interna del intercambiador.
- **Conducción en el material:** transferencia de calor a través de la pared del intercambiador (cobre en este caso).

- **Convección externa:** transferencia térmica entre la superficie externa del intercambiador y el agua del depósito.

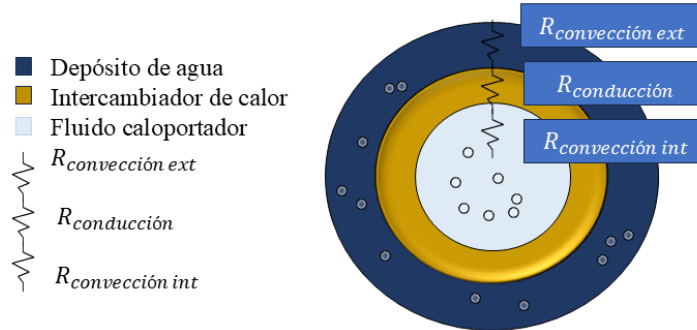


Figura 3-21 Transferencia de calor en el intercambiador de calor helicoidal (elaboración propia).

$$R_{total} = R_{convección\ ext} + R_{conducción} + R_{convección\ inter}^6 \quad \text{Ec 3-20}$$

Continuando con la Ec 3-20:

$$\frac{1}{U} = \frac{d_{ext}}{d_{inter} \cdot h_{inter}} + \frac{d_{ext} \cdot \ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{inter}}\right)}{k_p} + \frac{1}{h_{ext}} \quad \text{Ec 3-21}$$

- $R_{total}$ : Resistencia térmica total  $\left(\frac{K \cdot m^2}{W}\right)$ .
- $R_{convección\ ext}$ : Resistencia térmica de convección en el exterior del intercambiador  $\left(\frac{K \cdot m^2}{W}\right)$ .
- $R_{conducción}$ : Resistencia térmica de conducción a través de la pared  $\left(\frac{K \cdot m^2}{W}\right)$ .
- $R_{convección\ inter}$ : Resistencia térmica de convección en el interior del intercambiador  $\left(\frac{K \cdot m^2}{W}\right)$ .
- $d_{inter}$ : Diámetro interior del intercambiador (m).
- $d_{ext}$ : Diámetro exterior del intercambiador (m).
- $h_{inter}$ : Coeficiente de convección experimental en el interior del intercambiador  $\left(\frac{W}{K \cdot m^2}\right)$ .
- $h_{ext}$ : Coeficiente de convección en el exterior del intercambiador  $\left(\frac{W}{K \cdot m^2}\right)$ .
- $k_p$ : Conductividad térmica de la pared del intercambiador  $\left(\frac{W}{K \cdot m}\right)$ .

Por lo que obtendríamos con la Ec 3-21:

<sup>6</sup> En esta sección se entiende que el trabajo se realiza en el intercambiador, por lo que no se mencionará en la nomenclatura su abreviatura.

$$h_{inter} = \frac{d_{ext}}{d_{inter} \cdot \left( \frac{1}{U} - \frac{d_{ext} \cdot \ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{inter}}\right)}{k_p} - \frac{1}{h_{ext}} \right)} \quad \text{Ec 3-22}$$

$$h_{ext} = \frac{Q_{int}}{(T_d - T_p) \cdot A_{int}} \quad \text{Ec 3-23}$$

### 3.7.4 Números adimensionales experimentales en el intercambiador

En el análisis experimental de intercambiadores de calor, el uso de números adimensionales es fundamental para caracterizar los fenómenos de transferencia de calor y flujo de fluidos sin depender de unidades específicas. Estos parámetros permiten comparar el rendimiento térmico y la eficiencia del sistema en diferentes condiciones operativas.

#### ▪ Número de Reynolds

El número de Reynolds,  $Re$ , es un parámetro adimensional cuyo cálculo es necesario para determinar el régimen en el que se encuentra el fluido durante los ensayos. Se calcula según la ecuación:

Con la ecuación **Ec 3-25**:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_{tu inter}}{\mu} \quad \text{Ec 3-24}$$

$$v = \frac{\dot{V}}{A_{sec int}} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} d_{tu inter}^2} \quad \text{Ec 3-25}$$

$$Re_{crit} = 2300 \left[ 1 + 8,6 \left( \frac{d_{inter}}{d_{int}} \right)^{0,45} \right] \quad \text{Ec 3-26}$$

Donde:

- $\rho$  es la densidad del fluido  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ .
- $v$  es la velocidad media del fluido en la tubería  $\left(\frac{m}{s}\right)$ .
- $d_{tu inter}$  es el diámetro interno del tubo interior del intercambiador ( $m$ ).
- $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido ( $Pa \cdot s$ ).
- $\dot{V}$  es el caudal volumétrico  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$ .
- $A_{sec int}$  es el área de la sección del intercambiador ( $m^2$ ).
- $d_{int}$  es el diámetro del intercambiador ( $m$ ).

#### ▪ Número de Nusselt

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} = \frac{h_{inter} \cdot d_{inter}}{k} \quad \text{Ec 3-27}$$

Donde:

- $h$ : coeficiente de transferencia de calor por convección  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$ .
- $L$ : longitud característica del sistema ( $m$ ).
- $k$ : conductividad térmica del fluido  $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$ .
  - *Número de Prandtl*

El número de Prandtl ( $Pr$ ) es una cantidad adimensional que caracteriza la relación entre la difusión de momento (viscosidad) y la difusión de calor en un fluido. Su ecuación es:

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad \text{Ec 3-28}$$

Donde:

- $v = \frac{\mu}{\rho}$ : Viscosidad cinemática del fluido  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$ .
- $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$ : Difusividad térmica  $\left(\frac{m^2}{s}\right)$ .
- $\mu$ : Viscosidad dinámica  $\left(Pa \cdot s \text{ o } \frac{kg}{m \cdot s}\right)$ .
- $\rho$ : Densidad del fluido  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ .
- $c_p$ : Capacidad calorífica específica a presión constante  $\left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$ .
- $k$ : Conductividad térmica  $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$ .

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Validación de los resultados

En primer lugar, se realiza una validación, orientada a verificar la coherencia de los datos expuestos posteriormente. Esta validación tiene como objetivo determinar la fiabilidad de las mediciones experimentales.

#### 4.1.1 Calibración de los sensores

Primeramente, se llevó a cabo la calibración de los sensores mediante la exposición simultánea a condiciones uniformes y estables, asegurando que todos estuvieran sometidos al mismo ambiente de referencia. Inicialmente, se identificaron pequeñas diferencias entre los valores registrados por cada sensor. Aun así, se confirmó que todos los sensores proporcionaron lecturas homogéneas, alcanzando valores cercanos dentro del margen de incertidumbre permitido (Figura 4-1), validando así la calibración y garantizando la fiabilidad y precisión en futuras mediciones.

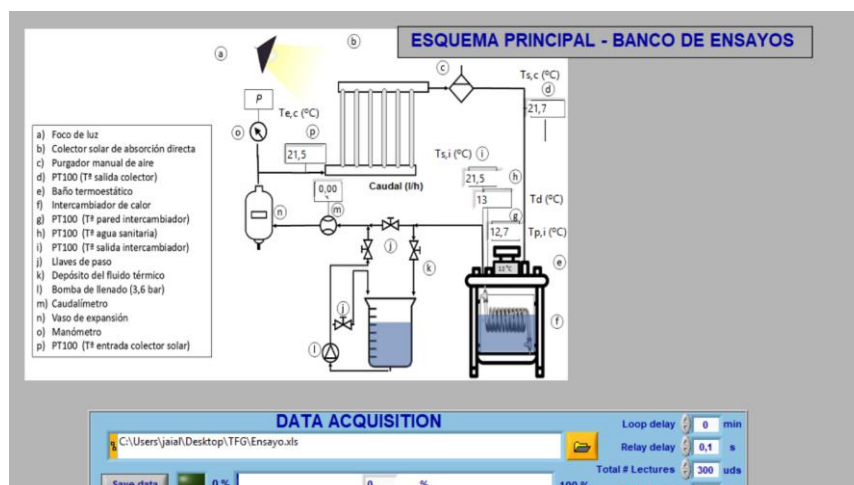


Figura 4-1 Captura de pantalla de la calibración de los sensores (elaboración propia).

Los sensores Pt-100 Clase A empleados en la instalación tienen un error típico determinado por el fabricante de  $\pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  más el 0,2% de la temperatura medida. Por lo tanto, al medirla de manera concreta en las proximidades de los  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la precisión real de dichos sensores sería aproximadamente  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tomando en consideración lo anterior, las mediciones realizadas en los sensores ubicados en el circuito hidráulico ( $T_{ent\ col}$ ,  $\frac{T_{sal\ col}}{T_{ent\ int}}$  y  $T_{sal\ int}$ ) registraron una diferencia máxima entre sí de  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , valor igual

al límite de precisión señalado, por lo cual puede considerarse que estas lecturas son coherentes entre sí. Por el contrario, los sensores en posiciones más cercanas entre sí ( $T_d$  y  $T_{p\ int}$ ) registraron temperaturas cercanas a la temperatura del agua del baño termostático en ese momento.

#### 4.1.2 Balances energéticos

Idealmente, si la instalación estuviese perfectamente aislada, el calor absorbido por el colector solar debe ser cedido íntegramente en el intercambiador de calor. La Figura 4-2 muestra la comparativa entre ambas magnitudes para el conjunto de ensayos realizados. Podemos ver que en el eje horizontal se representa la potencia energética absorbida en el colector ( $Q_{col}$ ), mientras que en el eje vertical se representa la potencia energética transferida en el intercambiador ( $Q_{int}$ ). La diagonal naranja indica una situación ideal en la que toda la energía proveniente del colector ( $Q_{col}$ ) es perfectamente aprovechada por el intercambiador ( $Q_{int}$ ); esto implicaría  $(Q_{int}) = (Q_{col})$ . Los puntos azules representan los valores medidos en el sistema. En la Figura 4-2 observamos que la mayoría de los puntos (mediciones experimentales) se sitúan por encima de la línea ideal y la razón de ello sería que la tubería que conecta el baño con el colector se enfrenta a una temperatura ambiente de unos 20-25°C al no estar aislada, por lo que se produce también una absorción de calor a lo largo de estas superficies. El calor absorbido del intercambiador es un 26% mayor que el del colector.

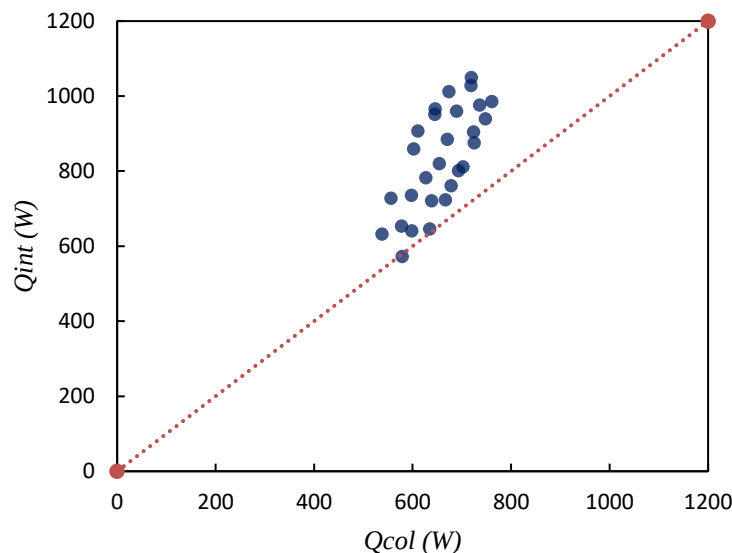


**Figura 4-2 Gráfica de los balances energéticos (elaboración propia).**

Como se ha dicho, estas ligeras diferencias probablemente sean consecuencia de un aislamiento térmico deficiente en las tuberías de conexión y el ambiente. Se considera, por tanto, que los datos obtenidos en los ensayos son coherentes con los procesos de intercambio de calor ocurridos.

#### 4.1.3 Salto de temperatura en el intercambiador

La gráfica de la Figura 4-3 muestra cómo varía el incremento de temperatura del fluido en el colector al cambiar el caudal para cuatro fluidos diferentes: agua pura y mezclas de propilenglicol-agua (PG:A).

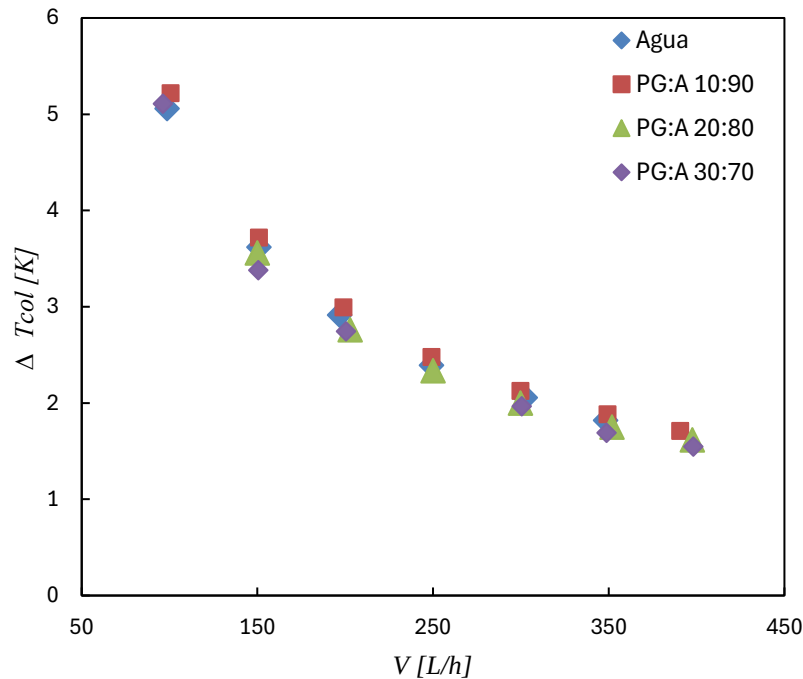


**Figura 4-3 Gráfica del incremento de temperatura en el colector frente al caudal (elaboración propia).**

En todos los casos se observa una clara tendencia: a mayor caudal, menor incremento de temperatura. Esto ocurre porque al aumentar el caudal el fluido permanece menos tiempo en el colector, reduciendo su calentamiento. Como se puede ver, a caudales de aproximadamente 100 L/h el incremento de temperatura alcanza valores cercanos a 5 K, mientras que por encima de 350 L/h el incremento disminuye a alrededor de 1,6–1,9 K.

Comparando los fluidos, el agua pura siempre presenta el mayor incremento, seguida por la mezcla PG:A 10:90. A medida que aumenta la concentración de propilenglicol (20 % y 30 %), el incremento de temperatura en el colector disminuye ligeramente, reflejando la menor capacidad calorífica y conductividad térmica de estas mezclas frente al agua pura.

En conclusión, todos los incrementos de temperatura se encuentran entre 1,5 y 5,2 K por tanto se cumple el objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado.

## 4.2 Estudio y análisis de los resultados experimentales

En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos durante la fase experimental, así como el procedimiento aplicado para su tratamiento e interpretación.

### 4.2.1 Calor absorbido en el colector solar de absorción directa

La Figura 4-4 muestra la potencia térmica absorbida por el colector solar de absorción directa ( $Q_{col}$ ) en función del caudal volumétrico ( $V$ ) que circula por la instalación. Cada serie de datos de los 28 ensayos se corresponde con un ensayo de los distintos fluidos térmicos analizados (agua y mezclas propilenglicol:agua (PG:A)). Se observa que, a medida que aumenta el caudal, la potencia absorbida también se incrementa. Además, las diferentes composiciones de propilenglicol-agua presentan valores de  $Q_{col}$  distintos, lo que sugiere que las propiedades termofísicas de cada mezcla (conductividad térmica, viscosidad, densidad y capacidad calorífica) influyen en la capacidad de absorción del colector.

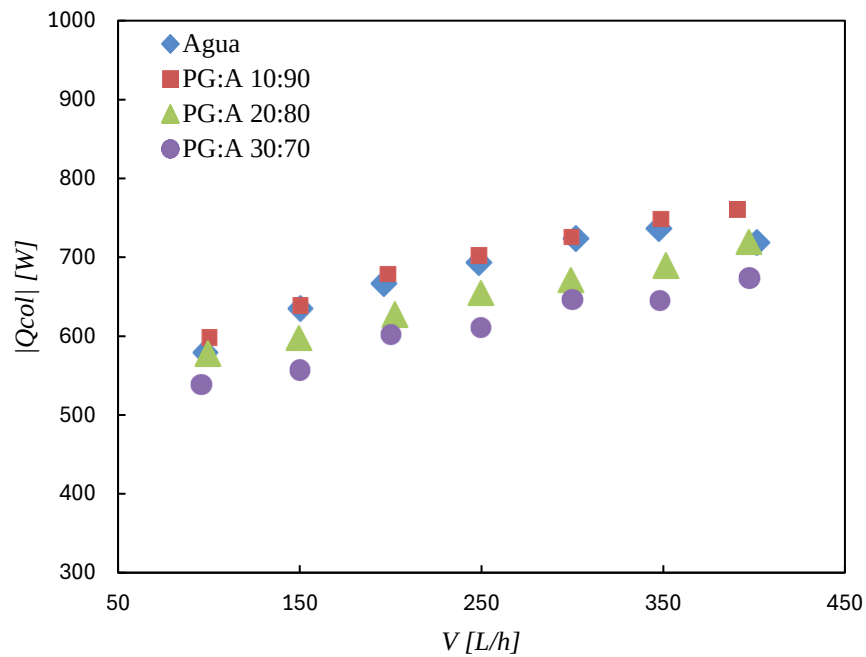


Figura 4-4 Gráfico del calor absorbido del colector frente al caudal (elaboración propia).

#### 4.2.2 Análisis de la transferencia de calor en el intercambiador

En esta gráfica de la Figura 4-5 se presenta la variación del coeficiente de convección ( $h$ ) en el intercambiador en función del caudal volumétrico ( $V$ ). Se observa que, conforme aumenta el caudal, el coeficiente de convección también incrementa, lo que coincide con la teoría de que un mayor flujo propicia una mayor transferencia de calor. Así, para el conjunto de las muestras,  $h$  aumenta aproximadamente un 25% para el incremento de caudal desde 100 a 400 L/h. Asimismo, las mezclas con mayor contenido de propilenglicol tienden a mostrar valores ligeramente menores de  $h$  que el agua pura, debido principalmente a sus propiedades termo físicas (especialmente, conductividad térmica y viscosidad). Se observa también (como podemos ver en la Figura 4-6) que, a medida que aumenta el contenido de propilenglicol, el coeficiente de convección se reduce más significativamente. Esto confirma que las propiedades termo físicas mencionadas influyen de manera negativa en la transferencia de calor.

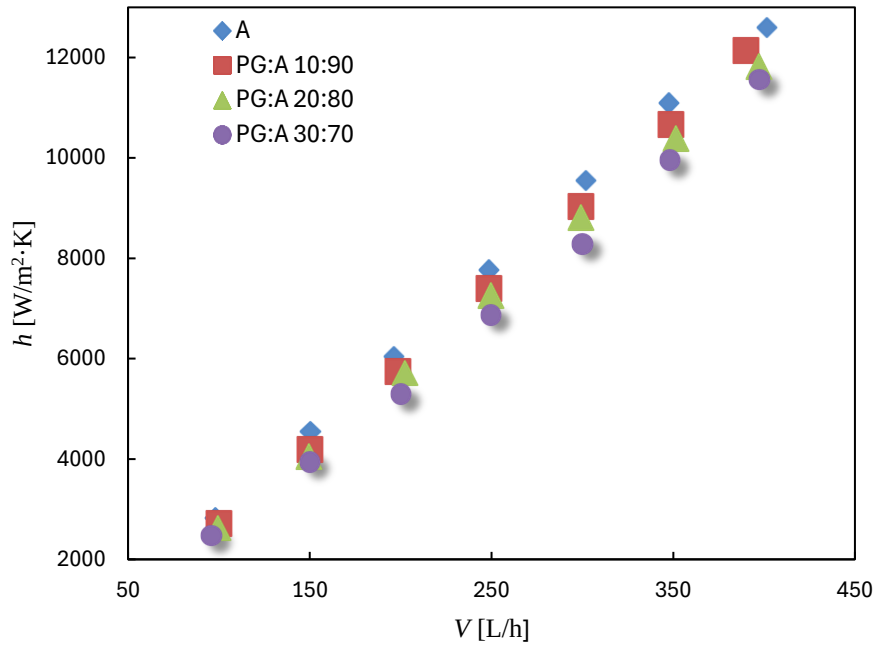


Figura 4-5 Gráfica de coeficiente de convección frente al caudal (elaboración propia).

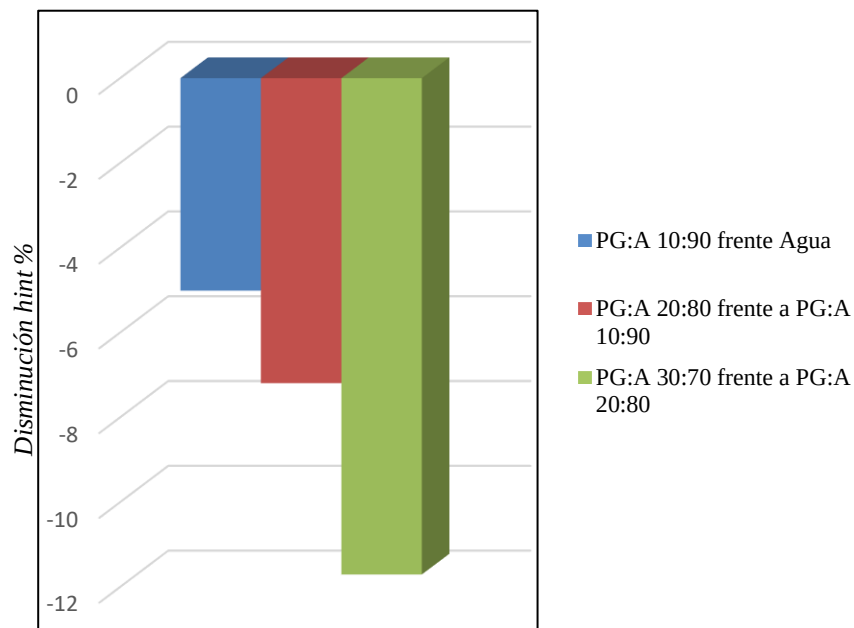


Figura 4-6 Disminución promedio del coeficiente de convección respecto al porcentaje de propilenglicol (elaboración propia).

Aunque el incremento de caudal mejora la transferencia de calor, la presencia de propilenglicol lo disminuye. Así, utilizar hasta un 30% de PG implica una disminución de  $h$  media en el conjunto de caudales analizados del 11,7%. Por tanto, al diseñar o seleccionar la mezcla para un sistema térmico, se debe buscar un equilibrio entre el caudal deseado y la composición de la mezcla que minimice pérdidas de rendimiento y asegure la protección anticongelante o la estabilidad del fluido según las necesidades del sistema.

En instalaciones donde la prevención de congelamiento sea prioritaria (climas muy fríos), se justifica el uso de mezclas con más propilenglicol. Sin embargo, es necesario considerar que esto implica una merma en el coeficiente de convección. En climas moderados, reducir el contenido de propilenglicol

(o emplear agua pura si fuera viable) puede mejorar el rendimiento térmico, siempre y cuando no se comprometa la protección del sistema.

#### 4.2.3 Resultados adimensionales

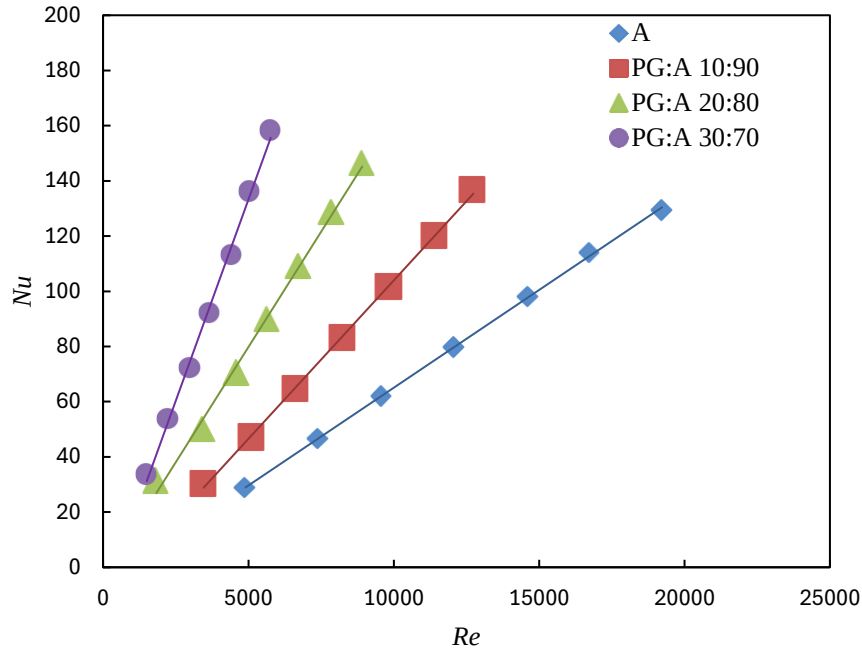


Figura 4-7 Gráfica Nusselt frente a Reynolds (elaboración propia).

Este gráfico de la Figura 4-7 presenta los resultados adimensionales de la transferencia de calor a través del número de Nusselt ( $Nu$ ) frente al número de Reynolds ( $Re$ ) para agua pura ( $A$ ) y mezclas de propilenglicol con agua (PG:A) en diferentes proporciones en el intercambiador helicoidal. El número de Nusselt ( $Nu$ ) mide la relación entre la convección y la conducción térmica en un fluido mientras que el número de Reynolds ( $Re$ ) valora la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en el flujo, y es sinónimo del nivel de turbulencia.

Observamos que, en la mezcla 30:70, para un mismo número de *Reynolds* (por ejemplo, 5000) y en un proceso de intercambio de calor, la convección predomina más que en el caso del agua, lo que indica que la relación convección/conducción es mayor en la mezcla 30:70. Además, se demuestra que al aumentar el porcentaje de propilenglicol en la mezcla se obtienen valores de  $Nu$  mayores para un mismo *Reynolds*, lo que implica que la relación convección/conducción se incrementa conforme crece el porcentaje de glicol, y la pendiente de la curva de tendencia también aumenta. Así, para un *Reynolds* de 5000 se obtiene un  $Nu$  aproximado de 29 en el caso del agua, llegando hasta 130 para un *Reynolds* de 20000.

El incremento de  $Nu$  con  $Re$  concuerda con las correlaciones empíricas habituales (por ejemplo, Dittus-Boelter o Gnielinski), que describen el comportamiento de la transferencia de calor en flujos internos en régimen laminar, de transición o turbulento.

#### 4.2.4 Correlación de los datos experimentales para el número de Nusselt

Tras el análisis de los resultados presentados en este capítulo, se identificó una dependencia del número de *Nusselt* respecto a *Reynolds*, *Prandtl* y la concentración de glicol ( $\phi$ ). Los datos experimentales se ajustaron mediante regresión de mínimos cuadrados a una ecuación con la siguiente estructura:

$$Nu = a \cdot Re^b \cdot Pr^c \cdot (1 - \phi)^d$$

Ec 4-1

La extensión *Solver* de *Excel* permitió ajustar los valores de los coeficientes *a*, *b*, *c* y *d* con el objetivo de minimizar la desviación respecto a los valores experimentales. Así, con la Ec 4-1 se obtuvo finalmente la siguiente expresión:

$$Nu = 0,00223 \cdot Re^{1,1153} \cdot Pr^{0,002123} \cdot (1 - \phi)^{-4,2074}$$

Ec 4-2

Los límites de validez son:

$$1500 < Re < 19300$$

$$8 < Pr < 6$$

$$0 < \phi < 0,3$$

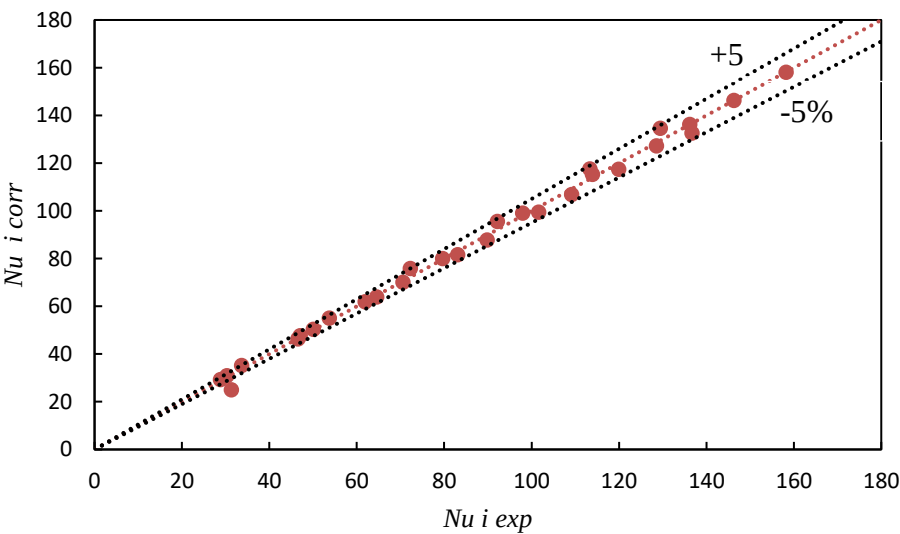


Figura 4-8 Nu de correlación frente a Nu experimental (elaboración propia).

La correlación presenta una desviación absoluta máxima de 6,23 y una desviación relativa media de 2,6 %. La mayor discrepancia observada no supera el 5%, tal como se ilustra en la Figura 4-8. Por lo tanto, esta relación es adecuada para la estimación.

|                           |      |
|---------------------------|------|
| Desviación máxima         | 6,23 |
| Desviación media          | 1,72 |
| Desviación estándar       | 2,52 |
| Desviación relativa media | 2,6% |

Tabla 4-1 Desviaciones de Nu.

## **Discusión**

Los resultados obtenidos proporcionan una estimación razonable del rendimiento térmico del colector solar de absorción directa bajo condiciones de laboratorio. Sin embargo, las limitaciones instrumentales, ambientales y metodológicas a continuación perjudican los ensayos:

- Control ambiental insuficiente: implementar cámara aislante para minimizar pérdidas térmicas externas.
- Calibración de sensores.
- Número de réplicas: incrementar el número de ensayos para mejorar la estadística.
- Fuente de irradiancia: sustituir portalámparas por fuente solar simulada con espectro certificado.

En conclusión, los ensayos realizados ofrecen una estimación válida del colector solar de absorción directa en condiciones de laboratorio, pero deben considerarse sujetas a un margen de error.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

La incorporación de un baño termostático refrigerado en el banco de ensayos ha supuesto una mejora significativa en el control experimental del sistema. Esta modificación permitió estabilizar la temperatura de enfriamiento del fluido de trabajo de forma precisa y reproducible, mejorando así la confiabilidad de las mediciones y la simulación de condiciones de operación reales. Con esta configuración optimizada, se analizó en detalle el comportamiento térmico de la instalación solar térmica de absorción directa empleando distintas mezclas de agua y propilenglicol como fluido caloportador. Los resultados demostraron que la composición de la mezcla influye notablemente en la capacidad de absorción y disipación de calor, observándose diferencias en la respuesta térmica del sistema según el porcentaje de propilenglicol utilizado.

#### 5.1.1 *Análisis del rendimiento de transferencia de calor*

##### **Instalación solar térmica**

- ✓ Calibración de sensores: todos los sensores mostraron lecturas homogéneas bajo condiciones uniformes, con diferencias máximas entre ellos de  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (las del límite de precisión declarado por el fabricante) lo que valida la exactitud y fiabilidad de las mediciones realizadas.
- ✓ Balances energéticos: la comparación entre la potencia absorbida por el colector ( $Q_{col}$ ) y la transferida en el intercambiador ( $Q_{int}$ ) reveló que la ganancia adicional de calor, que es aproximadamente un 26% mayor en el intercambiador, se le atribuye a pérdidas térmicas en las tuberías no aisladas, que absorben calor del ambiente. Pese a ello, los resultados son coherentes con los procesos de intercambio de calor esperados
- ✓ Salto de temperaturas: Se confirmó la relación inversa entre caudal y salto térmico: a mayor caudal, menor incremento de temperatura del fluido. En caudales cercanos a  $100\text{ L/h}$  se alcanzan aumentos de hasta  $5\text{ K}$ , mientras que a más de  $350\text{ L/h}$  el incremento disminuye a  $1,6\text{--}1,9\text{ K}$ . El agua pura presentó siempre el mayor salto térmico, seguida por las mezclas de propilenglicol-agua (10:90, 20:80 y 30:70), reflejando la menor capacidad calorífica y conductividad térmica de éstas.

### Colector solar de absorción directa

- ✓ Potencia térmica absorbida aumenta con el caudal: al incrementar el flujo de fluido de 100 L/h a 400 L/h, la energía captada por el colector crece aproximadamente un 24–28 %, debido al mayor grado de turbulencia y mezclado del fluido térmico.
- ✓ El agua pura presenta el mejor rendimiento: a 400 L/h el colector absorbe aproximadamente 210 W con agua frente a 165 W con mezcla PG:A 30:70 (–21 % de reducción), evidenciando que la menor capacidad calorífica y mayor viscosidad del glicol penalizan la absorción energética.
- ✓ Eficiencia global decrece al aumentar el porcentaje de glicol: la eficiencia térmica del colector cae de aproximadamente 58 % (agua) a aproximadamente 45 % (PG:A 30:70) a caudales altos, por menores propiedades termo-físicas de la mezcla.

### Intercambiador helicoidal

- ✓ Transferencia de calor mejora con caudal: la potencia cedida en el intercambiador aumenta de aproximadamente 100 W a 185 W (agua) cuando el caudal sube de 100 a 400 L/h.
- ✓ Coeficiente de convección ( $h$ ) crece con caudal: para agua,  $h$  pasa de 2822,25 a 12594,43  $\frac{W}{m^2K}$  entre 100–400 L/h lo que implica un aumento del 350% aproximadamente.
- ✓ Coeficiente de convección ( $h$ ) disminuye con glicol: para el agua pura,  $h$  tiene el valor de 12594,43  $\frac{W}{m^2K}$  a 400 L/h; en PG:A 30:70 cae a 11557,45  $\frac{W}{m^2K}$  al mismo caudal, disminuyendo un 8,97% y confirmando el impacto negativo de la viscosidad y baja conductividad del glicol en la eficiencia del intercambio.
- ✓ Correlación: en conclusión, el análisis estadístico permitió desarrollar una correlación empírica fiable para el número de *Nusselt* en función de *Reynolds*, *Prandtl* y concentración de glicol. Esta ecuación presenta una desviación relativa media muy baja (2,6 %) y una discrepancia máxima inferior al 5 %, lo que demuestra su precisión y consistencia frente a los datos experimentales. Por tanto, puede considerarse una herramienta adecuada y precisa para estimar el coeficiente convectivo en sistemas similares dentro de los límites de validez establecidos.

## 5.2 Líneas futuras

De cara a futuros trabajos, se proponen las siguientes líneas de desarrollo para ampliar y aplicar los resultados obtenidos.

- ✓ **Mejoras experimentales del banco de ensayos:** se plantea optimizar aún más el montaje experimental empleando fuentes de irradiación solar simulada que garanticen condiciones controladas y constantes de radiación durante las pruebas. Adicionalmente, se recomienda incorporar un aislamiento térmico más efectivo en los componentes de la instalación, con el objetivo de minimizar las pérdidas de calor hacia el entorno.
- ✓ **Aplicaciones prácticas del sistema:** esta tecnología tiene potencial para emplearse en instalaciones militares autónomas o en zonas aisladas, donde disponer de refrigeración independiente de la red eléctrica resulta estratégico. Por último, se propone investigar la integración de esta tecnología en sistemas híbridos de climatización, combinando la energía solar térmica de absorción directa con sistemas convencionales (como bombas de calor), con el fin de mejorar la eficiencia energética global y la estabilidad operativa en diversos escenarios climáticos.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Endesa, “La energía,” *Endesa*. [En línea]. Disponible en: <https://fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/que-es-la-energia> [Accedido: 4 feb. 2025].
- [2] “Energía térmica – Concepto, obtención, ejemplos y características,” *Concepto.de*. [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/energia-termica/> [Consultado: 4 feb. 2025].
- [3] “Transferencia de calor – Concepto, tipos, aislantes y medidas,” *Concepto.de*. [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/transferencia-de-calor/> [Consultado: 12 feb. 2025].
- [4] “¿Qué son las energías renovables? | Naciones Unidas,” *United Nations*. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy> [Consultado: 4 feb. 2025].
- [5] “Energías renovables – Concepto, importancia y ventajas,” *Concepto.de*. [En línea]. Disponible en: <https://concepto.de/energias-renovables/> [Consultado: 4 feb. 2025].
- [6] “Todas las ventajas de la energía solar,” *Enel Green Power*. [En línea]. Disponible en: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-solar/ventajas-energia-solar> [Consultado: 4 feb. 2025].
- [7] “Todas las ventajas de la energía solar,” *Enel Green Power*. [En línea]. Disponible en: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-solar/ventajas-energia-solar> [Consultado: 10 mar. 2025].
- [8] “Solar Energy Basics,” *NREL*. [En línea]. Disponible en: <https://www2.nrel.gov/research/re-solar> [Consultado: 12 mar. 2025].
- [9] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, “Balance Energético España 2023\_v1.pdf”, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid, Inf. técn., Informe nº Balance Energético España 2023\_v1, feb. 2023.
- [10] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, “Balance Energético España 2021 y 2022\_v0,” Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid, Inf. técn.
- [11] “Tipos de energía solar,” *Descubre La Energía*. [En línea]. Disponible en: <https://descubrelaenergia.fundaciondescubre.es/sobre-la-energia/preguntas-y-respuestas/energias-renovables/que-tipos-de-energia-solar-existen/> [Consultado: 15 mar. 2025].
- [12] “Energía solar: qué es, características y ventajas principales,” *Repsol*. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-solar/index.cshtml> [Consultado: 15 mar. 2025].

- [13] “Qué es la energía solar térmica y cuáles son sus usos,” *BAXI*. [En línea]. Disponible en: <https://www.baxi.es/blog/que-es-la-energia-solar-termica-y-cuales-son-sus-usos> [Consultado: 15 mar. 2025].
- [15] “Energía solar pasiva: Un camino hacia la sostenibilidad – Energía Renovable – Solar, Eólica e Hidráulica,” *DeltaVolt*. [En línea]. Disponible en: <https://deltavolt.pe/general/energia-solar-pasiva-un-camino-hacia-la-sostenibilidad/> [Consultado: 15 mar. 2025].
- [16] “¿Qué es un sistema fotovoltaico híbrido?”, *AutoSolar*. [En línea]. Disponible en: <https://autosolar.pe/energia-solar/que-es-un-sistema-fotovoltaico-hibrido> [Consultado: 15 mar. 2025].
- [17] “¿Qué es y cómo funciona un colector solar?”, *Solarama*. [En línea]. Disponible en: <https://solarama.mx/blog/como-funciona-un-colector-solar/> [Consultado: 4 feb. 2025].
- [18] “¿Qué es y cómo funciona un colector solar?”, *Solarama*. [En línea]. Disponible en: <https://solarama.mx/blog/como-funciona-un-colector-solar/> [Consultado: 12 feb. 2025].
- [19] N. Goel, R. A. Taylor, and T. Otanicar, “A review of nanofluid-based direct absorption solar collectors: Design considerations and experiments with hybrid PV/Thermal and direct steam generation collectors,” *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 903–913, ene. 2020.
- [20] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 2ª ed., Academic Press, 2014.
- [21] ResearchGate, “COLECTORES SOLARES TÉRMICOS,” ResearchGate, Inf. técn.
- [22] “¿Qué es un colector solar? Tipos + para qué sirven,” *Ecoinventos*. [En línea]. Disponible en: <https://ecoinventos.com/colector-solar/> [Consultado: 7 feb. 2025].
- [23] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press, 2013.
- [24] I. Guinot Panadero, “Mejora de colectores solares de absorción directa mediante modelado de nanofluidos,” Universitat Jaume I, Inf. técn., 2020.
- [25] “Factores que afectan en el rendimiento de los paneles solares,” *Pebblex*. [En línea]. Disponible en: <https://bepebblex.com/factores-rendimiento-paneles-solares/> [Consultado: 11 feb. 2025].
- [26] “Los tres factores que más afectan a la producción de las placas solares,” *Endesa*. [En línea]. Disponible en: <https://www.endesa.com/es/blog/blog-de-endesa/luz/factores-afectan-placas-solares> [Consultado: 11 feb. 2025].
- [27] O. K. Ahmed, “Effect of the Dust on the Performance of Solar Water Collectors in Iraq,” *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 5, no. 1, pp. 65–72, feb. 2016.
- [28] J. A. Duffie y W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2013.
- [29] J. A. Duffie y W. A. Beckman, “Flat-Plate Collectors,” en *Solar Engineering of Thermal Processes*, Academic Press, 2013, p. 85.
- [30] “Solar Cooling: Eco-Friendly Temperature Control,” *Deye*. [En línea]. Disponible en: <https://deye.com/es/solar-cooling-eco-friendly-temperature-control/> [Consultado: 11 feb. 2025].
- [31] J. A. Duffie y W. A. Beckman, “Energy Storage,” en *Solar Engineering of Thermal Processes*, Academic Press, 2013, p. 35.
- [32] “Heat Transfer Fluids for Solar Water Heating Systems,” *Energy.gov*. [En línea]. Disponible en: <https://www.energy.gov/energysaver/heat-transfer-fluids-solar-water-heating-systems> [Consultado: 12 mar. 2025].
- [33] “¿Cómo Funcionan Los Paneles Solares Para Calentar Agua?” *LED Solar*. [En línea]. Disponible en: <https://www.ledsolar.com.mx/como-funcionan-los-paneles-solares-para-calentar-agua-guia-completa/> [Consultado: 11 feb. 2025].

- [34] Redacción, “La Refrigeración Solar,” *Mundo HVAC&R*. [En línea]. Disponible en: <https://www.mundohvacr.com/2007/10/la-refrigeracion-solar/> [Consultado: 11 feb. 2025].
- [35] C. N. para el U. E. de la Energía, “Calentamiento solar de agua – Componentes principales,” *Gob.mx*. [En línea]. Disponible en: <http://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/calentamiento-solar-de-agua-componentes-principales> [Consultado: 11 feb. 2025].
- [36] “Fluido solar: propiedades y manipulación,” *Viessmann ES*. [En línea]. Disponible en: <https://www.viessmann.es/es/consejos/tecnologia-y-sistemas/sistema-de-energia-solar-termica/solar-fluid.html> [Consultado: 11 feb. 2025].
- [37] “Solar Cooling: Eco-Friendly Temperature Control,” *Deye*. [En línea]. Disponible en: <https://deye.com/es/solar-cooling-eco-friendly-temperature-control/> [Consultado: 11 feb. 2025].
- [38] I. Toledano, “Usos del glicol para sistemas de calentamiento industrial,” *Wattco*. [En línea]. Disponible en: <https://www.wattco.com/es/2020/09/usos-del-glicol-para-sistemas-de-calentamiento-industrial/> [Consultado: 4 feb. 2025].
- [39] “Refrigerante para paneles solares,” *Química Industrial*. [En línea]. Disponible en: <https://quimicaindustrial.cl/producto/refrigerante-para-paneles-solares/> [Consultado: 4 feb. 2025].
- [40] “Enfriamiento con glicol Propilenglicol o Etilenglicol,” *Ladco – Venta de Productos Químicos*. [En línea]. Disponible en: <https://www.ladco.com.ar/enfriamiento-con-glicol/> [Consultado: 4 feb. 2025].
- [41] C. Álvarez García, “Determinación del rendimiento de fluidos térmicos en un banco de ensayos centrado en un panel solar”, Trabajo Fin de Grado, Centro Universitario de la Defensa (CUD), Pontevedra, ES, 2024.
- [42] G.U.N.T. Gerätebau GmbH, “Uso de la energía solar térmica,” G.U.N.T. Gerätebau GmbH, Barsbuettel, Inf. técn.
- [43] Ministerio de Energía, “Guía SST V4,” Ministerio de Energía, Santiago, CL, Inf. técn., 2022.
- [44] Polyscience, “Manual de operador 110-509 PSC (español),” Polyscience, Inf. técn.
- [45] “GC-GP 6538 | Bombas de jardín,” *Einhell ES*. [En línea]. Disponible en: <https://www.einhell.es/p/4180280-gc-gp-6538/> [Consultado: 15 mar. 2025].
- [46] “Lámpara con socket E27 con reflector, interruptor y seguridad,” *PHYWE*. [En línea]. Disponible en: [https://www.phywe.com/es/equipo-y-accesorios/componentes-electricos-y-magneticos/lamparas-y-portalamparas/lampara-con-socket-e27-con-reflector-interruptor-y-seguridad\\_1045\\_1976/](https://www.phywe.com/es/equipo-y-accesorios/componentes-electricos-y-magneticos/lamparas-y-portalamparas/lampara-con-socket-e27-con-reflector-interruptor-y-seguridad_1045_1976/) [Consultado: 8 mar. 2025].
- [47] Philips Lighting, “923212043801\_EU\_es\_ES\_PROF\_Product\_\_\_full\_data\_sheet.pdf,” Philips Lighting, Inf. técn.
- [48] “USB-6210,” *National Instruments*. [En línea]. Disponible en: <https://www.ni.com/es-es/support/model.usb-6210.html> [Consultado: 4 mar. 2025].
- [49] J. C. Colmenero, “Estudio de la refrigeración líquida de dispositivos electrónicos mediante un banco de ensayos”, Trabajo Fin de Grado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Universitario de la Defensa (CUD), Pontevedra, ES, 2024.
- [50] E. W. Lemmon, M. L. Huber y M. O. McLinden, “NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties—REFPROP, Version 8.0,” NIST, Gaithersburg, Inf. técn., 2007.
- [51] Å. Melinder, *Properties of Secondary Work Fluids for Indirect Systems: Secondary Refrigerants or Coolants, Heat Transfer Fluids*, 2010.
- [52] “Un colector solar distinto,” *Socialab*. [En línea]. Disponible en: <https://cl.socialab.com/challenges/empconciencia19/idea/92351> [Consultado: 11 mar. 2025].

[53] “¿Puedo subvencionar mi ACS solar?”, *Dankesol*. [En línea]. Disponible en: <https://dankesol.com/ayudas-subvenciones-ac-solar/> [Consultado: 11 mar. 2025].

[54] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), “Instalaciones de Energía Solar Térmica para Comunidades de Vecinos,” IDAE, Madrid, Inf. técn., feb. 2004.

## ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

### Implicaciones sociales

#### ✓ Impacto en comunidades locales

La implementación de tecnologías solares térmicas innovadoras puede traer beneficios directos a las comunidades locales. Por un lado, reduce los costos energéticos domésticos, lo cual alivia la pobreza energética. En España, aproximadamente una de cada 10 personas no puede permitirse calentar su hogar en invierno, de modo que el acceso a agua caliente solar gratuita o de bajo costo tendría un impacto significativo en su calidad de vida

#### ✓ Generación de empleo y oportunidades de formación

La expansión de la energía solar térmica de absorción directa impulsa la creación de empleo local. España cuenta con una base industrial importante en el sector solar térmico: existen al menos 5 fábricas nacionales de captadores solares, con capacidad conjunta para producir 1,3 millones de m<sup>2</sup> al año. Esta rama industrial y las empresas instaladoras asociadas generan puestos de trabajo tanto en fabricación como en montaje y mantenimiento de instalaciones.

Por otra parte, el banco de ensayos en sí mismo ofrece oportunidades de formación: puede servir como plataforma educativa para estudiantes e investigadores, mejorando las capacidades técnicas en energías renovables de la región.

#### ✓ Acceso a energía sostenible y contribución a la independencia energética

Aprovechar la energía solar a través de colectores de absorción directa mejora el acceso de la población a energía sostenible para usos cotidianos (agua caliente sanitaria, calefacción de apoyo, etc.). Al generar calor in situ a partir del sol, las viviendas o instalaciones dotadas de esta tecnología dependen menos de combustibles externos como gas natural, gasóleo o electricidad de la red. El IDEA<sup>7</sup> destaca que la energía solar térmica reduce la dependencia de combustibles escasos y costosos y mitiga los problemas asociados a su uso en sistemas convencionales. En el contexto español, con un alto nivel de importación de combustibles fósiles, sustituir parte de la demanda térmica por energía solar local fortalece la seguridad de suministro.

### Implicaciones económicas

#### ✓ Costos de instalación y operación

Los costos iniciales de instalación de un sistema solar térmico pueden ser significativos, aunque las innovaciones de absorción directa buscan reducirlos. Una instalación solar térmica convencional para una vivienda unifamiliar (por ejemplo, un equipo de aproximadamente 5 kWh con acumulador) ronda los 4.000 € (este monto incluye los captadores, tanque de almacenamiento, bombas, tuberías e instalación). Sin embargo, el principal desafío ha sido precisamente el costo: a nivel global se reconoce que necesitamos

---

<sup>7</sup> Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía.

*nuevos colectores solares que cuesten solo una fracción de los actuales* para masificar su uso [52]. El concepto de absorción directa apunta en esa dirección, al eliminar componentes caros (como placas absorbentes selectivas o tubos de vacío) y simplificar el diseño sin sacrificar rendimiento. Por tanto, un colector de absorción directa construido con materiales económicos (p. ej. polímeros transparentes y agua oscurecida) podría abaratar notablemente el precio por m<sup>2</sup>.

En cuanto a los costos de operación, las ventajas son claras: la fuente solar es gratuita, de modo que el gasto se limita al mantenimiento y pequeña electricidad para bombeo. No hay compra de combustible como en calderas de gas o gasóleo. El mantenimiento de un sistema solar térmico, no obstante, tiende a ser algo más complejo que el de instalaciones fotovoltaicas, ya que *requiere verificar niveles de fluido, estado de bombas, intercambiadores y limpiezas periódicas*. Estos gastos de mantenimiento son relativamente bajos (se estima un 1-2% de la inversión por año), pero deben considerarse en la economía del proyecto.

✓ Retorno de inversión y rentabilidad del sistema

La rentabilidad de un colector solar de absorción directa depende de varios factores: coste inicial, fracción de demanda de calor cubierta, precio de la energía convencional, y ayudas disponibles. En España, con abundante radiación solar, estos sistemas pueden alcanzar ahorros del 60-80% en la demanda de agua caliente de una vivienda, lo que se traduce en facturas energéticas mucho menores. Típicamente, un equipo solar térmico doméstico se amortiza en un plazo de aproximadamente 6 a 8 años mediante el ahorro obtenido, pudiendo ser menos si cuenta con subvenciones o si sustituye electricidad (tarifa elevada) en lugar de gas natural. Esto puede darse, por ejemplo, en industrias u hoteles con consumo constante de agua caliente, donde la inversión en solar térmica se recupera rápidamente por el gran volumen de energía ahorrada. No obstante, la rentabilidad exacta varía según el caso. En todo caso, al finalizar el período de inversión, el resto de la vida útil (que suele ser de unos 20 años en total) supone energía prácticamente gratuita, mejorando significativamente la economía familiar o empresarial a largo plazo.

✓ Incentivos fiscales y subvenciones disponibles en España

El marco de apoyos económicos y fiscales en España es un factor clave para impulsar esta tecnología. Actualmente, existen subvenciones estatales orientadas a fomentar las renovables térmicas en edificios. Por ejemplo, hay ayudas directas para la rehabilitación energética de viviendas que incluyen la instalación de sistemas solares de ACS<sup>8</sup>, disponibles para inmuebles construidos antes de 2007 [53]. Estas ayudas nacionales (procedentes en parte de fondos europeos de recuperación) se canalizan a través de las Comunidades Autónomas y pueden cubrir una porción significativa de la inversión inicial. Adicionalmente, los usuarios pueden beneficiarse de deducciones fiscales en varios impuestos locales y nacionales por instalar energías limpias: bonificaciones en el Impuesto sobre Bienes Inmuebles (IBI), reducciones en el Impuesto sobre Construcciones, Instalaciones y Obras (ICIO) e incluso deducciones en el IRPF por mejoras de eficiencia en la vivienda. A nivel autonómico y municipal también hay programas específicos. En Andalucía, por ejemplo, la Agencia

---

<sup>8</sup> Agua Caliente Sanitaria.

Andaluz de la Energía ofrece incentivos que llegan a cubrir *hasta el 45% del coste* de la instalación solar térmica en el marco de mejoras de vivienda sostenible. Muchas otras regiones tienen planes similares de apoyo al autoconsumo térmico.

Cabe mencionar que el Gobierno de España, mediante el Real Decreto 477/2021, ha articulado seis programas de ayudas para energías renovables, tres de los cuales se enfocan en el sector residencial (climatización y ACS con renovables). Estas subvenciones, vigentes hasta 2023-2024, cofinancian proyectos solares térmicos domésticos, lo que mejora sustancialmente la viabilidad económica.

### **Implicaciones ambientales**

#### ✓ Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero

La motivación ambiental principal para desarrollar colectores solares de absorción directa es la disminución de emisiones de  $CO_2$  y otros gases de efecto invernadero al sustituir fuentes fósiles. En términos generales, el potencial es muy significativo: se estima que instalar 2 millones de  $m^2$  de captadores solares térmicos en España (meta de los próximos años) permitiría evitar anualmente la emisión de 4 millones de toneladas de  $CO_2$  cada año [54]. Para ponerlo en perspectiva, una instalación solar térmica de 1 *MWh* de capacidad (tamaño modesto en un polígono o barrio) puede ahorrar del orden de 600 toneladas de  $CO_2$  al año, según datos del Programa de Naciones Unidas. A escala doméstica, diversos estudios señalan que un sistema solar para ACS en una sola vivienda evita la emisión de 0,3 a 0,6 toneladas de  $CO_2$  anuales (dependiendo de si reemplaza electricidad o gas). Estas reducciones contribuyen directamente a los objetivos de descarbonización. España, alineada con el *Pacto Verde Europeo*, necesita recortar drásticamente las emisiones de edificios. De hecho, organizaciones internacionales como IRENA <sup>9</sup> destacan que la rápida adopción de energías renovables (especialmente solar y eólica) es clave para cumplir los objetivos del Acuerdo de París y limitar el aumento de la temperatura global.

#### ✓ Uso de materiales sostenibles y ciclo de vida del colector

Los colectores solares térmicos presentan un perfil ambiental muy favorable. La gran mayoría de sus componentes son materiales reciclables o reutilizables, como metales (cobre, aluminio, acero), vidrio y ciertos plásticos. Según la Asociación Solar de la Industria Térmica, los sistemas solares térmicos *son casi completamente reciclables y tienen un impacto muy bajo en todo su ciclo de vida*. Esto implica que la “mochila ecológica” asociada a su fabricación, uso y disposición final es reducida en comparación con otras tecnologías. Un estudio mostró, por ejemplo, que un prototipo de colector construido mayoritariamente con materiales reciclados tuvo una huella de carbono de fabricación de apenas 33 *kg* de  $CO_2$ , frente a valores de 200-350 *kg* de  $CO_2$  en colectores comerciales convencionales. Esto se debe a la reutilización de materiales y a procesos productivos simplificados.

En el caso de colectores de absorción directa, existe la posibilidad de emplear materiales alternativos más sostenibles que en sistemas tradicionales. Por ejemplo, se pueden usar polímeros transparentes de bajo costo en lugar de grandes cantidades de metal y vidrio, siempre que soporten la intemperie; también es posible usar agua pura como fluido de trabajo (o agua con aditivos no tóxicos), evitando aceites sintéticos o glicoles anticongelantes que

---

<sup>9</sup> International Renewable Energy Agency (Agencia Internacional de las Energías Renovables).

podrían generar residuos peligrosos. De este modo, el impacto ambiental de los insumos se reduce. Además, al final de la vida útil del colector, los materiales pueden recuperarse: el metal puede fundirse y reciclarse, el vidrio reprocesarse, y los plásticos idealmente reciclarse o aprovecharse. La economía circular aplicada a estos equipos minimiza los residuos destinados a vertedero.

## ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo del presente trabajo de fin de grado no solo representa un desafío técnico, sino que también plantea una serie de cuestiones éticas y sociales. Dado que esta tecnología promete un futuro más sostenible en el sector energético, es fundamental considerar su impacto en el medioambiente, su accesibilidad para distintos sectores de la sociedad, la ética en su experimentación y su influencia en el desarrollo comunitario. A continuación, se analizan estos aspectos de manera estructurada, con ejemplos concretos y referencias que respaldan la necesidad de integrar la responsabilidad social y la ética en la investigación y el desarrollo de la energía solar térmica.

### **Impacto Social y Desarrollo Comunitario**

El uso de energía solar térmica puede impulsar el desarrollo local al generar empleo, formación académica y oportunidades económicas. Universidades, empresas y centros de investigación se benefician, formando especialistas en energías renovables y promoviendo la economía verde. La capacitación en estas tecnologías facilita la inserción laboral y el emprendimiento en el sector.

Además, el crecimiento de la energía solar térmica contribuye a la reducción de la pobreza energética. Tecnologías más accesibles y eficientes pueden proporcionar calefacción y agua caliente a comunidades vulnerables, reduciendo costos y mejorando la calidad de vida. Ejemplos exitosos han demostrado ahorros energéticos superiores al 50% en comparación con sistemas convencionales. Esto significa facturas más bajas y menos dependencia de combustibles externos, lo cual mejora directamente la economía familiar. Adicionalmente, el acceso fiable a agua caliente y calefacción adecuada redundará en beneficios para la salud y el bienestar.

Para maximizar su impacto social, es clave la intervención de políticas públicas que faciliten la adopción de estas tecnologías. Incentivos, regulaciones y subsidios pueden hacer que los avances logrados en el laboratorio lleguen a la sociedad de manera equitativa. Cuando existe un ecosistema normativo adecuado, la transición energética sostenible y justa se acelera, beneficiando tanto a la población como al medioambiente.

### **Ética en la Experimentación y Desarrollo Tecnológico**

En cuanto al proceso de experimentación en sí, es fundamental que el diseño y uso del banco de ensayos se guíen por sólidos principios éticos. Toda investigación científica y desarrollos de ingeniería conllevan una responsabilidad de actuar con integridad y teniendo en cuenta las posibles consecuencias. En el contexto del banco de ensayos solar térmico, seguir principios éticos significa:

- **Honestidad y transparencia:** presentar los datos y resultados de forma veraz, sin manipulación, y comunicar los hallazgos con claridad tanto dentro de la comunidad científica como ante la sociedad. Esto implica reconocer las limitaciones de los experimentos, reportar también los resultados negativos o inconvenientes encontrados, y no generar falsas expectativas sobre la tecnología. La transparencia en la expresión pública de los avances genera confianza y permite que otros investigadores e instituciones puedan replicar o validar los resultados.

- Responsabilidad y seguridad: anteponer la protección de la vida, la salud de las personas y el cuidado del medio ambiente por encima de cualquier otro objetivo. En la práctica, esto se traduce en diseñar el banco de ensayos con todas las medidas de seguridad necesarias para los operarios y usuarios (por ejemplo, mecanismos de desconexión ante emergencias, uso de equipos de protección personal en el laboratorio) y asegurar que los experimentos no supongan riesgos para él. Antes de poner en marcha un experimento, los ingenieros deben evaluar cuidadosamente los posibles impactos y mitigar cualquier daño potencial, siguiendo normativas de seguridad industrial y protocolos éticos de investigación.
- Integridad profesional: mantener la rigurosidad técnica y el cumplimiento de estándares de buena práctica en cada etapa del desarrollo tecnológico. La integridad también conlleva la imparcialidad a la hora de interpretar los resultados: los sesgos personales o intereses comerciales no deben tergiversar las conclusiones de las pruebas.

## ANEXO III: PROPIEDADES TERMO FÍSICAS DE LOS FLUIDOS

En este anexo se tratarán las propiedades termo físicas de los fluidos utilizados en el presente trabajo, tales como el agua y las mezclas de propilenglicol.

### Agua

Las propiedades del agua empleadas para derivar las ecuaciones cuadráticas del apartado 3.5.2, y que posteriormente se utilizaron en el análisis de resultados, (véase referencia [50]) se presentan en la Tabla A-3- 1

| Temperatura<br>$T [K]$ | Densidad<br>$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ | Capacidad calorífica<br>$c_p \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$ | Conductividad térmica<br>$k \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$ | Viscosidad<br>$\mu [Pa \cdot s]$ |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 273,15                 | 1000,30                                          | 4215,0                                                            | 0,5563                                                          | 0,001790                         |
| 278,15                 | 1000,40                                          | 4201,2                                                            | 0,5684                                                          | 0,001517                         |
| 283,15                 | 1000,13                                          | 4192,8                                                            | 0,5805                                                          | 0,001305                         |
| 293,15                 | 998,62                                           | 4171,9                                                            | 0,5989                                                          | 0,001001                         |
| 303,15                 | 996,05                                           | 4153,9                                                            | 0,6159                                                          | 0,000797                         |
| 313,15                 | 992,61                                           | 4137,3                                                            | 0,6310                                                          | 0,000653                         |
| 323,15                 | 988,43                                           | 4121,3                                                            | 0,6440                                                          | 0,000547                         |
| 333,15                 | 983,59                                           | 4105,1                                                            | 0,6548                                                          | 0,000467                         |

**Tabla A-3- 1 Propiedades termo físicas del agua.**

### Propilenglicol: Agua 10-90

Las propiedades del agua empleadas para derivar las ecuaciones cuadráticas del apartado 3.5.3 , y que posteriormente se utilizaron en el análisis de resultados, (véase referencia [51]) se presentan en la Tabla A-3- 2.

| Temperatura<br>$T [K]$ | Densidad<br>$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ | Capacidad calorífica<br>$c_p \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$ | Conductividad térmica<br>$k \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$ | Viscosidad<br>$\mu [Pa \cdot s]$ |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 270,38                 | 1009,40                                          | 4050                                                              | 0,511                                                           | 0,00310                          |
| 273,15                 | 1009,30                                          | 4055                                                              | 0,515                                                           | 0,00278                          |
| 293,15                 | 1006,20                                          | 4075                                                              | 0,543                                                           | 0,00141                          |
| 313,15                 | 999,00                                           | 4105                                                              | 0,568                                                           | 0,00089                          |
| 333,15                 | 989,40                                           | 4130                                                              | 0,589                                                           | 0,00062                          |
| 353,15                 | 977,80                                           | 4160                                                              | 0,607                                                           | 0,00045                          |

|        |         |      |       |         |
|--------|---------|------|-------|---------|
| 373,15 | 965,50  | 4190 | 0,622 | 0,00034 |
| 270,38 | 1009,40 | 4050 | 0,511 | 0,00310 |

Tabla A-3- 2 Propiedades termo físicas del propilenglicol- agua 10:90.

**Propilenglicol: Agua 20-80**

Las propiedades del agua empleadas para derivar las ecuaciones cuadráticas del apartado 3.5.2, y que posteriormente se utilizaron en el análisis de resultados, (véase referencia [51]) se presentan en la Tabla A-3- 3

| Temperatura<br>$T [K]$ | Densidad<br>$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ | Capacidad<br>calorífica<br>$c_p \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$ | Conductividad<br>térmica<br>$k \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$ | Viscosidad<br>$\mu [Pa \cdot s]$ |
|------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 265,93                 | 1020,50                                          | 3925                                                                 | 0,464                                                              | 0,00580                          |
| 273,15                 | 1019,60                                          | 3940                                                                 | 0,472                                                              | 0,00420                          |
| 283,15                 | 1017,30                                          | 3960                                                                 | 0,482                                                              | 0,00290                          |
| 293,15                 | 1014,50                                          | 3980                                                                 | 0,492                                                              | 0,00207                          |
| 313,15                 | 1006,00                                          | 4020                                                                 | 0,513                                                              | 0,00120                          |
| 333,15                 | 995,20                                           | 4060                                                                 | 0,531                                                              | 0,00079                          |
| 353,15                 | 982,80                                           | 4100                                                                 | 0,548                                                              | 0,00055                          |
| 373,15                 | 969,50                                           | 4140                                                                 | 0,563                                                              | 0,00043                          |

Tabla A-3- 3 Propiedades termo físicas del propilenglicol- agua 20:80.

**Propilenglicol: Agua 30-70**

Las propiedades del agua empleadas para derivar las ecuaciones cuadráticas del apartado 3.5.2, y que posteriormente se utilizaron en el análisis de resultados, (véase referencia [51]) se presentan en la: Tabla A-3- 4.

| Temperatura<br>$T [K]$ | Densidad<br>$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ | Capacidad calorífica<br>$c_p \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$ | Conductividad<br>térmica<br>$k \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$ | Viscosidad<br>$\mu [Pa \cdot s]$ |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 260,37                 | 1034,50                                          | 3770                                                              | 0,418                                                              | 0,01500                          |
| 263,15                 | 1034,00                                          | 3775                                                              | 0,420                                                              | 0,01250                          |
| 273,15                 | 1031,30                                          | 3800                                                              | 0,428                                                              | 0,00700                          |
| 283,15                 | 1028,00                                          | 3825                                                              | 0,436                                                              | 0,00460                          |
| 293,15                 | 1023,80                                          | 3855                                                              | 0,445                                                              | 0,00301                          |
| 313,15                 | 1013,50                                          | 3910                                                              | 0,461                                                              | 0,00156                          |
| 333,15                 | 1001,10                                          | 3960                                                              | 0,477                                                              | 0,00099                          |
| 353,15                 | 987,70                                           | 4010                                                              | 0,492                                                              | 0,00069                          |

Tabla A-3- 4 Propiedades termo físicas del propilenglicol- agua 30:70.

## ANEXO IV: NOMENCLATURA

En este anexo se recoge la nomenclatura utilizada durante la elaboración del presente trabajo.

| Nomenclatura          |                              | Subíndices   |                                                       |
|-----------------------|------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------|
| $L$                   | Longitud                     | col          | Colector                                              |
| $d$                   | Diámetro                     | ext          | Exterior                                              |
| $T$                   | Temperatura                  | inter        | Interior                                              |
| $K$                   | Conductividad<br>térmica     | sal          | Salida                                                |
|                       |                              | ent          | Entrada                                               |
| $n$                   | Cantidad                     | int          | Intercambiador                                        |
| $p$                   | Paso                         | d            | Depósito                                              |
| $A$                   | Área                         | p            | Pared                                                 |
| $U$                   | Coeficiente global           | esp          | Espiras                                               |
| $R$                   | Resistencia                  | tu           | Tubo                                                  |
| $Re$                  | Reynolds                     | bob          | Bobina                                                |
| $Nu$                  | Nusselt                      | A            | Agua                                                  |
| $Pr$                  | Prandtl                      | sec          | Sección                                               |
| $h$                   | Coeficiente de<br>convección |              |                                                       |
| Caracteres especiales |                              | Abreviaturas |                                                       |
| $P$                   | Densidad                     | EG           | Etilenglicol                                          |
| $c_p$                 | Calor específico             | PG           | Propilenglicol                                        |
| $k$                   | Conductividad<br>térmica     | GND          | Conexión a tierra                                     |
| $\mu$                 | Viscosidad dinámica          | PG:A         | Propilenglicol-Agua                                   |
| $\dot{Q}$             | Potencia térmica             | LMTD         | Media logarítmica de<br>diferencias de<br>temperatura |
| $\dot{m}$             | Caudal másico                |              |                                                       |
| $\dot{V}$             | Caudal volumétrico           |              |                                                       |
| $\Delta T$            | Diferencia de $T$            |              |                                                       |
| $v$                   | Velocidad media              |              |                                                       |
| $\Phi$                | Concentración                |              |                                                       |
| $\alpha$              | Difusividad térmica          |              |                                                       |

**Tabla A-4- 1 Nomenclatura (elaboración propia).**