



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Determinación del rendimiento de fluidos térmicos
en un banco de ensayos centrado en un panel solar*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Ciro Álvarez García

DIRECTORES: Javier Pérez Vallejo

 Jose Ignacio Iglesias Prado

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Determinación del rendimiento de fluidos térmicos
en un banco de ensayos centrado en un panel solar*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Durante los últimos años, el aumento de la población y el avance tecnológico han impulsado un crecimiento exponencial de la demanda energética. La actual dependencia de fuentes de energía no renovables para hacerle frente presenta serios dilemas. Este trabajo revisa las alternativas energéticas renovables, particularmente la energía solar y su aprovechamiento para generar energía térmica.

El objetivo de este trabajo es analizar experimentalmente el rendimiento de transferencia de calor de varios fluidos térmicos en procesos de radiación y convección, utilizando un banco de ensayos centrado en un colector solar de absorción directa de tubos transparentes y un intercambiador helicoidal. Se analizan cuatro fluidos térmicos: agua, una mezcla propilenglicol:agua 20:80 y dos nanofluidos de nanodiamantes basados en la última mezcla.

Los resultados muestran que la mezcla propilenglicol:agua 20:80 empeora un 30% la absorción y un 33% la convección respecto al agua. Además, la dispersión de nanopartículas oscuras en la mezcla mejora su eficiencia de absorción hasta un 16% y su rendimiento en convección hasta un 22%. Finalmente, se obtiene una correlación para el número de Nusselt en función del número de Reynolds y la fracción volumétrica de nanopartículas para la familia de nanofluidos, con una desviación promedio inferior al 1,5%.

PALABRAS CLAVE

Energía solar, Eficiencia energética, Fluidos térmicos, Nanofluidos, DASC

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Javier Pérez Vallejo y Jose Ignacio Iglesias Prado por orientarme y mostrarme todo su apoyo durante la realización de este Trabajo Fin de Grado. Gracias por todas esas horas de laboratorio juntos, por enseñarme nuevas habilidades y por recordarme y explicarme conceptos teóricos, así como resolver mis innumerables dudas, aún a pesar del escaso tiempo disponible.

Al Centro Universitario de la Defensa y a todos sus profesores, que durante estos 5 años me han enseñado todo lo que he podido aplicar durante mis últimos meses de formación, plasmándolo en este Trabajo Fin de Grado.

A la Universidad de Vigo por poner a nuestro alcance los medios e instalaciones para realizar, de manera adecuada, un trabajo de semejantes dimensiones.

A toda mi familia, por apoyarme en mi decisión de unirme a las Fuerzas Armadas desde un principio y por estar lo más cerca posible de mí durante estos 5 años a pesar de la distancia. En especial a mis padres, por ayudarme en mis momentos más duros y mi abuelo paterno, Ciro, quien más se alegró por mí y por mi futuro al ingresar en este cuerpo, y que me dejó la motivación suficiente para seguir adelante durante todos estos años.

A mi pareja, Miriam, que conozco desde hace solo 3 años, pero que ha sido mi mayor apoyo durante mis últimos años de formación, gracias por entender mis innumerables horas de trabajo y estudio desconectado del mundo. Durante estos años la motivación de poder pasar los fines de semana junto a ti a tu familia ha conseguido que las semanas se me hicieran mucho más cortas y productivas. Gracias por acogerme durante este último tiempo y tratarme como uno más de vuestra familia.

A mis compañeros de estudio y de camarata de este último año, con quienes mejor he conectado durante estos 5 años. Estudiando juntos hemos conseguido multiplicar nuestro potencial, pero con los que también he pasado momentos muy divertidos y entretenidos cuando la cabeza no nos daba para estudiar más.

Por último, a mis compañeros de la promoción 424-154, con quienes he pasado los mejores y los peores momentos de mi formación, pero con los cuales nunca han faltado las risas y los buenos momentos. Os guardo un cariño especial.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Contexto y motivación	7
1.2 Objetivos	7
1.3 Estructura de la memoria	7
2 Estado del arte	9
2.1 La energía.....	9
2.1.1 Evolución de la demanda energética mundial	9
2.1.2 El problema energético mundial	11
2.1.3 Alternativas a las energías no renovables	11
2.2 Energía solar	12
2.2.1 Reseña histórica y aplicaciones de la energía solar	12
2.2.2 Clasificación de la energía solar	13
2.2.3 Ventajas e inconvenientes de la energía solar	13
2.3 Colectores solares térmicos.....	14
2.3.1 Clasificación de los colectores solares térmicos.....	14
2.3.2 Colectores solares superficiales no concentradores de rayos	15
2.3.3 Colectores solares superficiales concentradores de rayos	17
2.3.4 Colectores volumétricos	19
2.3.5 Resumen de las características de los diferentes colectores solares	21
2.4 Fluidos térmicos	22
2.4.1 Fluidos térmicos convencionales	22
2.4.2 Nanofluidos.....	24
2.5 Líneas de investigación abiertas en la absorción directa de luz solar	26
3 Desarrollo del TFG.....	27
3.1 Equipo experimental	27
3.1.1 Circuito hidráulico	28
3.1.2 Circuito eléctrico	31
3.1.3 Sistema de adquisición de datos	32
3.2 Fluidos térmicos estudiados	38
3.2.1 Agua.....	38
3.2.2 Propilenglicol:agua 20:80.....	38

3.2.3 Nanofluidos: Nanodiamantes + PG:A 20:80	39
3.3 Procedimiento experimental	41
3.3.1 Llenado del circuito con fluido térmico y verificación de su funcionamiento	41
3.3.2 Realización del experimento y recogida de datos.....	42
3.3.3 Vaciado del fluido térmico y mantenimiento del circuito	42
3.4 Análisis de datos	43
3.4.1 Calor absorbido en el colector y calor cedido en el intercambiador.....	43
3.4.2 Coeficiente de convección experimental en el interior del intercambiador.....	43
3.4.3 Números adimensionales experimentales en el intercambiador	45
3.4.4 Determinación del coeficiente de convección interior teórico	46
4 Resultados / Validación / Prueba.....	47
4.1 Validación de los resultados obtenidos	47
4.1.1 Validación de la calibración de los sensores de temperatura	47
4.1.2 Comprobación de balances energéticos.....	49
4.1.3 Validación del método de análisis de los datos experimentales	50
4.2 Análisis de los datos experimentales	51
4.2.1 Calor absorbido en el colector solar de absorción directa	51
4.2.2 Coeficiente de convección en el interior del intercambiador	52
4.2.3 Resultados adimensionales	53
4.3 Correlación para el número de Nusselt	54
5 Conclusiones y líneas futuras	55
5.1 Conclusiones	55
5.1.1 Validación.....	55
5.1.2 Análisis del rendimiento de transferencia de calor	55
5.1.3 Análisis adimensional y correlaciones.....	56
5.2 Líneas futuras	56
6 Bibliografía.....	57
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales	61
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	63
Anexo III: Nomenclatura.....	65
Anexo IV: Propiedades Termofísicas de los Fluidos	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Evolución de la demanda energética mundial [4]	9
Figura 2-2 Evolución histórica de la demanda energética hasta el presente (elaboración propia)...	10
Figura 2-3 Demanda energética mundial en el año 2022 (elaboración propia)	10
Figura 2-4 Proceso de absorción de energía solar en porcentaje y en $W \cdot m^{-2}$ [8].....	12
Figura 2-5 Partes de un colector solar de placa plana (elaboración propia).....	15
Figura 2-6 Instalación basada en un colector solar de placa plana (modificado de [21])	15
Figura 2-7 Partes de un colector solar híbrido/PVT (elaboración propia)	16
Figura 2-8 Partes de un colector solar PVT bifacial (elaboración propia)	16
Figura 2-9 Esquema funcionamiento de un campo heliostatos (modificado de [26]).....	17
Figura 2-10 Esquema colector solar de plato parabólico (modificado de [29])	18
Figura 2-11 Esquema de un colector solar de canal parabólico (modificado de [30]).....	18
Figura 2-12 Concentrador solar de canal parabólico frente a un concentrador de Fresnel [31]	18
Figura 2-13 Comparativa colector superficial frente colector volumétrico (elaboración propia)....	19
Figura 2-14 Eficiencia y pérdidas térmicas frente a la longitud [35]	20
Figura 2-15 Eficiencia frente a la profundidad [36]	20
Figura 2-16 Regiones del espectro electromagnético [46]	24
Figura 2-17 Resultados del trabajo de Nguyen en un DASC de placa plana (basado en: [47]).....	24
Figura 3-1 Instalación completa del banco de ensayos (elaboración propia).....	27
Figura 3-2 Esquema del circuito hidráulico de la instalación solar (elaboración propia)	28
Figura 3-3 Colector solar de tubos transparentes colocado en el soporte (elaboración propia).....	29
Figura 3-4 Planta y dimensiones del colector solar de tubos transparentes (elaboración propia)....	29
Figura 3-5 Intercambiador de calor helicoidal (elaboración propia).....	30
Figura 3-6 Esquema del circuito eléctrico de la instalación solar (elaboración propia)	31
Figura 3-7 Adherencia de una Pt-100 a la pared del intercambiador (elaboración propia)	33
Figura 3-8 Caudalímetro RS PRO: 511-4772 [53].....	33
Figura 3-9 Tarjeta NI USB-6210 y esquema disposición de los pines [54].....	34
Figura 3-10 Programación del módulo de adquisición del caudalímetro (elaboración propia)	35
Figura 3-11 Programación del módulo de adquisición de las Pt-100 (elaboración propia)	35
Figura 3-12 Programación del módulo de escalado de temperaturas (elaboración propia)	36
Figura 3-13 Programación del módulo de recogida de datos (elaboración propia)	36
Figura 3-14 Programación del módulo de visualización gráfica (elaboración propia)	37
Figura 3-15 Temperaturas y caudal durante un ensayo con agua (elaboración propia).....	37
Figura 3-16 Evolución de las temperaturas durante el ensayo con agua (elaboración propia)	37
Figura 3-17 Preparación nanofluido de diamantes con $\phi_m = 0,0005$ (elaboración propia)	39

Figura 3-18 Microscopía electrónica de transmisión de las nanopartículas de diamante [48].....	40
Figura 3-19 Montaje del sistema de llenado (elaboración propia)	41
Figura 3-20 Alcance del estado estacionario durante el ensayo con PG:A (elaboración propia)	42
Figura 3-21 Variación de la temperatura del fluido caloportador a su paso por el intercambiador y del agua del depósito en función de la longitud del intercambiador (elaboración propia).....	43
Figura 3-22 Proceso de transferencia de calor en el intercambiador (elaboración propia)	44
Figura 4-1 Estado del banco de ensayos al inicio de la verificación (elaboración propia)	47
Figura 4-2 Estado del banco de ensayos al final de la verificación (elaboración propia)	48
Figura 4-3 Análisis de la discrepancia entre el calor absorbido por el colector y el calor cedido en el intercambiador (elaboración propia)	49
Figura 4-4 Coeficiente de convección experimental en función del teórico (elaboración propia) ..	50
Figura 4-5 Calor absorbido en el colector en función del caudal para los fluidos analizados (elaboración propia)	51
Figura 4-6 Incremento del calor absorbido por los nanofluidos con respecto al PG:A 20:80 en función del caudal utilizado (elaboración propia)	51
Figura 4-7 Coeficientes de convección en el intercambiador en función del caudal para los fluidos analizados (elaboración propia)	52
Figura 4-8 Incremento del coeficiente de convección de los nanofluidos respecto a PG:A 20: 80 en función del caudal utilizado (elaboración propia)	52
Figura 4-9 Número de Nusselt en función del número de Reynolds para los fluidos analizados (elaboración propia)	53
Figura 4-10 Incremento del número de Nusselt de los nanofluidos respecto a PG:A 20: 80 en función del número de Reynolds (elaboración propia)	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Revisión de los diferentes tipos de colectores solares (elaboración propia).....	21
Tabla 2-2 Temperatura de fusión según % v/v de glicol (basado en: [42], [43]).....	23
Tabla 2-3 Propiedades termofísicas de los fluidos térmicos a 20 °C (basado en: [42], [43]).....	23
Tabla 3-1 Composición y dimensiones de los elementos del colector solar (elaboración propia)...	29
Tabla 3-2 Características del intercambiador de calor helicoidal de cobre (elaboración propia)	30
Tabla 3-3 Equivalencia temperatura resistencia térmica del platino (modificado de: [52])	32
Tabla 3-4 Conexiones de la tarjeta de adquisición de datos utilizadas (elaboración propia).....	34
Tabla 3-5 Propiedades de los nanodiamantes SDND (basado en: [57])	39
Tabla 4-1 Desviaciones entre los valores de Nu obtenidos mediante la correlación (Ec. 34) y los experimentales (elaboración propia)	54
Tabla A3-1 Nomenclatura utilizada (elaboración propia).....	65
Tabla A4-1 Propiedades termofísicas del agua (modificado de: [55]).....	67
Tabla A4-2 Propiedades termofísicas de la mezcla PG:A 20:80 (modificado de: [56])	67

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y motivación

La dificultad para hacer frente a la demanda energética mundial, así como el agotamiento de las fuentes de energía convencionales no renovables, suponen un reto al que la humanidad deberá de hacer frente, inevitablemente, en las próximas décadas. Son muchas las alternativas planteadas, desde el desarrollo de biocombustibles hasta la investigación de novedosas fuentes de obtención de energía, como por ejemplo la energía nuclear de fusión.

Este trabajo se centrará en la energía solar, una energía renovable utilizada desde la antigüedad, pero cuya investigación y desarrollo sigue siendo una cuestión relevante. La energía solar, es la fuente de energía más abundante en nuestro planeta. Sin embargo, la mayor parte de la energía solar recibida en la Tierra es desperdiciada debido a la dificultad tecnológica que supone su aprovechamiento.

Durante las últimas dos décadas, los avances tecnológicos han permitido mejorar la eficiencia de absorción de este tipo de energía. En este TFG se estudia el avance tecnológico que suponen los colectores solares de absorción directa, utilizados para calentar agua de consumo doméstico y sanitario. De acuerdo con la literatura consultada, estos colectores han demostrado, en el marco teórico, ser altamente eficientes para aplicaciones a bajas temperaturas, como es la obtención de agua caliente sanitaria. A pesar de que los primeros ensayos documentados con este tipo de colectores se realizaron hace casi 50 años, su investigación experimental es muy escasa y solo se centra en colectores de absorción directa de placa transparente. En este trabajo se utilizará un colector de absorción directa de tubos transparentes, el cual supone una innovación en este ámbito.

1.2 Objetivos

Para alcanzar la motivación de este trabajo, realizar un análisis del rendimiento térmico de diversos fluidos térmicos, ha sido necesario cumplir con los siguientes objetivos:

- Montaje de un banco de ensayos centrado en un colector solar de absorción directa. Superación y resolución de problemas surgidos durante el mismo.
- Validación del banco de ensayos y del método de cálculo. Obtención de discrepancias entre las medidas experimentales y las esperadas para la validación.
- Análisis del efecto que tiene la adicción de nanopartículas de nanodiamantes en la capacidad de absorción (radiación) y de convección.
- Elaboración de una correlación para la determinación el número de Nusselt en función del número de Reynolds y de la fracción volumétrica de nanopartículas en el nanofluido de la familia “Nanodiamantes + PG:A 20:80”.

1.3 Estructura de la memoria

Tras dejar claro el contexto y objetivos del presente Trabajo de Fin de Grado, se detalla a continuación la estructura de la presente memoria, incluyendo los títulos de los capítulos, sus contenidos y un breve resumen con el fin de facilitar la comprensión y búsqueda de información.

Capítulo 1: Introducción y objetivos.

- Se detalla la idea principal y motivación del trabajo, los objetivos que se pretenden alcanzar durante su desarrollo y la estructura de la memoria.

Capítulo 2: Estado del arte.

- Consiste en una revisión de toda la literatura relacionada con el tema. En particular, se comienza hablando sobre el origen de la energía, su evolución durante los años y el desafío energético actual. Después se hace una revisión sobre las fuentes de energía renovables como

posible solución a la demanda energética, analizando en mayor detalle la energía solar. Después, se detallan los tipos de colectores solares existentes y en particular los colectores solares de absorción directa, *DASC*. Finalmente, se realiza una revisión sobre los fluidos de trabajo utilizados para la transferencia de calor y el uso de nanopartículas para la elaboración de nanofluidos con propiedades mejoradas frente a los fluidos térmicos convencionales.

Capítulo 3: Desarrollo del TFG.

- Se detalla la metodología del trabajo: Componentes y elaboración del banco de ensayos, procedimiento experimental seguido durante los ensayos, método de cálculo y fluidos analizados.

Capítulo 4: Resultados.

- Se comprueba la validez del banco de ensayos y del método mediante ensayos con fluidos de referencia. Posteriormente, se analizan los datos recogidos siguiendo el método de cálculo aplicado y se presentan las figuras necesarias para facilitar su interpretación. Se realiza un análisis exhaustivo de estos datos. Finalmente, se detalla una correlación que permite obtener el número de Nusselt en función del número de Reynolds y de la fracción volumétrica de nanopartículas en el nanofluido de la familia “Nanodiamantes + PG:A 20:80”.

C Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras.

- Se resumen las principales conclusiones del trabajo. También, se plantean posibles mejoras y tareas experimentales a realizar en el banco de ensayos como posibles líneas futuras, extraídas de las lecciones aprendidas durante la realización del presente trabajo.

Capítulo 6. Bibliografía.

- Se recogen referencias utilizadas para extraer información en el presente trabajo.

Anexos.

- Se recoge información ampliatoria sobre el trabajo y datos utilizados para el análisis de los resultados.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 La energía

2.1.1 Evolución de la demanda energética mundial

Desde el descubrimiento del fuego, hace millones de años, la humanidad ha sabido de la gran utilidad que tiene la energía obtenida de diversas fuentes naturales. Las primeras fuentes de energía utilizadas fueron naturales, entre ellas la madera y el carbón vegetal. Posteriormente, hallazgos como la rueda o la vela, entre otros, permitieron la utilización de otras fuentes de energía naturales: viento, agua y sol [1].

Sin embargo, tras la generalización del conocimiento de la electricidad y las posteriores revoluciones industriales, la demanda energética mundial comenzó a crecer. Progresos como la utilización del motor de combustión y el desarrollo del alumbrado eléctrico en las ciudades, demandaron un rápido desarrollo en la producción energética. Desde entonces se empezó a generalizar la utilización fuentes de energía más eficientes como el carbón, el petróleo, la energía nuclear y el gas natural [2].

El crecimiento poblacional y el desarrollo económico-tecnológico, entre otros factores, han convertido a la energía en una de las necesidades más básicas para el ser humano [3]. En la Figura 2-1 se aprecia el progresivo aumento de la demanda energética mundial desde el año 1800. Según los datos recogidos en el informe de “Our World in Data” para el año 2022 [4], desde la última mitad del siglo XX hasta el presente, la demanda se ha multiplicado por 6 en ese periodo (ver Figura 2-2).

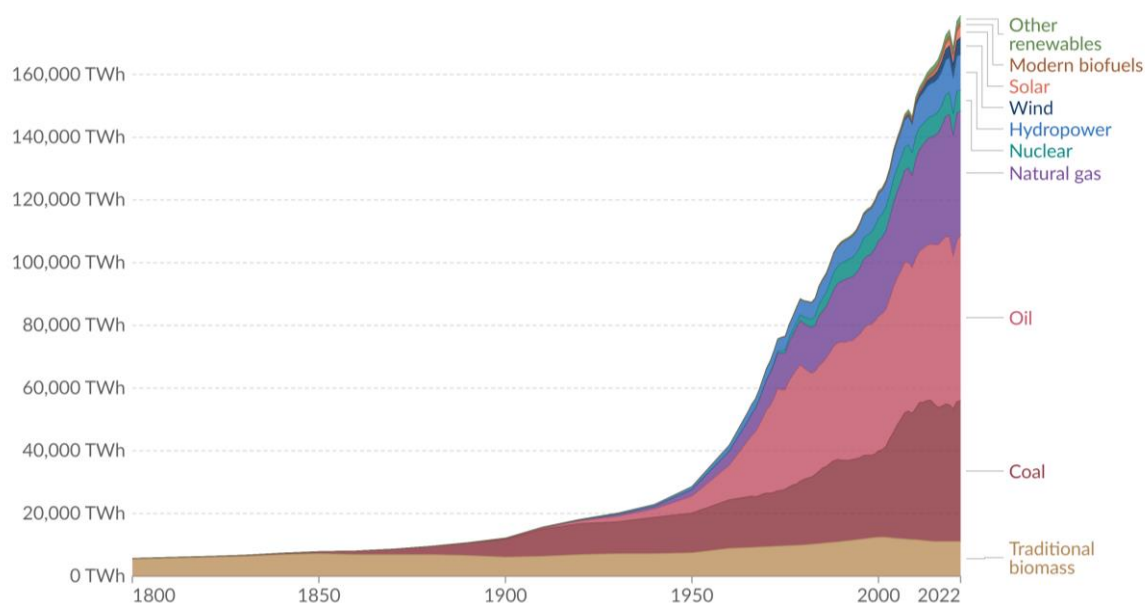


Figura 2-1 Evolución de la demanda energética mundial [4]

AÑO 1800			AÑO 1850			AÑO 1900		
	Biomasa tradicional	5556 TWh		Biomasa tradicional	7222 TWh		Biomasa tradicional	6111 TWh
	Carbón	97 TWh		Carbón	569 TWh		Carbón	5728 TWh
	Otras renovables	0 TWh		Otras renovables	0 TWh		Petróleo	181 TWh
	Biocombustibles	0 TWh		Biocombustibles	0 TWh		Gas natural	64 TWh
	Solar	0 TWh		Solar	0 TWh		Hidroeléctrica	47 TWh
	Eólica	0 TWh		Eólica	0 TWh		Otras renovables	0 TWh
	Hidroeléctrica	0 TWh		Hidroeléctrica	0 TWh		Biocombustibles	0 TWh
	Nuclear	0 TWh		Nuclear	0 TWh		Solar	0 TWh
	Gas natural	0 TWh		Gas natural	0 TWh		Eólica	0 TWh
	Petróleo	0 TWh		Petróleo	0 TWh		Nuclear	0 TWh
TOTAL		5653 TWh	TOTAL		7791 TWh	TOTAL		12131 TWh

AÑO 1950			AÑO 2000			AÑO 2022		
	Carbón	12603 TWh		Petróleo	42978 TWh		Petróleo	52970 TWh
	Biomasa tradicional	7500 TWh		Carbón	27435 TWh		Carbón	44854 TWh
	Petróleo	5444 TWh		Gas natural	23994 TWh		Gas natural	39413 TWh
	Gas natural	2092 TWh		Biomasa tradicional	12500 TWh		Hidroeléctrica	11300 TWh
	Hidroeléctrica	925 TWh		Hidroeléctrica	7826 TWh		Biomasa tradicional	11111 TWh
	Otras renovables	0 TWh		Nuclear	7323 TWh		Nuclear	6702 TWh
	Biocombustibles	0 TWh		Otras renovables	572 TWh		Eólica	5488 TWh
	Solar	0 TWh		Biocombustibles	133 TWh		Solar	3448 TWh
	Eólica	0 TWh		Eólica	93 TWh		Otras renovables	2414 TWh
	Nuclear	0 TWh		Solar	3 TWh		Biocombustibles	1199 TWh
TOTAL		28564 TWh	TOTAL		122857 TWh	TOTAL		178899 TWh

Figura 2-2 Evolución histórica de la demanda energética hasta el presente (elaboración propia)

La demanda energética mundial es actualmente suministrada mediante a una diversa combinación de fuentes de energía, como se puede apreciar en la Figura 2-3, siendo mayoritarias las fuentes convencionales (petróleo, carbón y gas natural). Estas fuentes representan un porcentaje superior al 75%, aunque no es descartable un sobrepaso de las energías renovables (hidroeléctrica, biomasa, eólica, solar...) frente a las convencionales en un corto-medio plazo, para cumplir los objetivos globales establecidos por la Asamblea General de las Naciones Unidas [4].

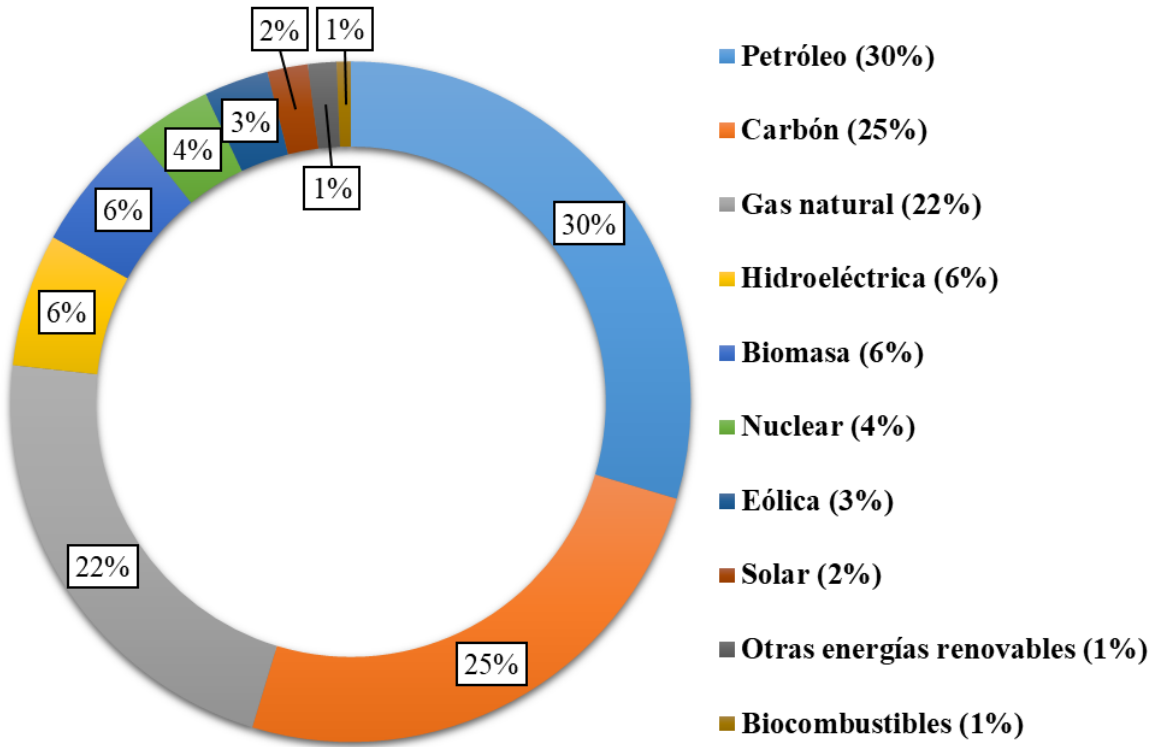


Figura 2-3 Demanda energética mundial en el año 2022 (elaboración propia)

2.1.2 El problema energético mundial

Como se menciona en el punto anterior, tanto el avance tecnológico como el crecimiento de la población han ocasionado un incremento continuo en la demanda energética mundial. La dificultad para hacer frente a esta creciente demanda es cada vez mayor, especialmente en un futuro cercano en el cual el uso de combustibles fósiles será, necesariamente, relegado por fuentes de energía renovables, según lo acordado en tratados internacionales. Los combustibles fósiles han sido, durante décadas, un gran alivio para esta creciente demanda. Sin embargo, plantean serios problemas entre los que destacan [5]:

- **Daños climáticos y medioambientales:**
 - Efecto invernadero debido a la emisión de gases.
 - Lluvia ácida, contaminación urbana, smog
 - Posibilidad de desastres medioambientales en caso de vertidos accidentales
- **Salud global (One Health):**
 - Enfermedades respiratorias como asma, bronquitis crónicas, neumonía e incluso cáncer de pulmón
- **Agotamiento de las reservas:**
 - Regeneración no viable en el corto plazo, ya que son recursos finitos que tardan millones de años en formarse.
- **Economía mundial dependiente del comercio de combustibles fósiles:**
 - Provoca crisis económicas y conflictos debido a la dependencia externa. Ejemplos:
 - Crisis del gas en Europa debido a la “Invasión rusa de Ucrania”
 - Crisis del petróleo en los años 70, debido a los conflictos bélico-económicos ocurridos en Oriente Próximo.

2.1.3 Alternativas a las energías no renovables

Como se ha comentado, las energías renovables fueron las primeras en ser utilizadas, en la antigüedad. Sin embargo, fueron relegadas por las fuentes de energía no renovables, debido a la necesidad de encontrar rápidos avances tecnológicos y a que estas tecnologías permitían obtener energía de manera constante y eficiente [3].

La creciente preocupación por el cambio climático está ocasionando un desarrollo tecnológico sin precedentes en el ámbito de las energías renovables, mejorando almacenamiento y eficiencia de obtención y almacenamiento. Para que una fuente de energía sea considerada como renovable, debe regenerarse indefinidamente y no generar ningún impacto negativo en el medio ambiente. Entre ellas se encuentran [6]:

- Energía solar: Utilización de la radiación solar para producir electricidad o transferir calor.
- Energía eólica: Generación eléctrica mediante aerogeneradores impulsados por viento.
- Energía hidroeléctrica: Generación de electricidad en centrales hidroeléctricas mediante el aprovechamiento de la energía potencial del agua almacenada a gran altura.
- Energía mareomotriz: Generación eléctrica a partir de la energía de movimiento de la marea.
- Energía undimotriz: Generación eléctrica a partir de la energía de las olas.
- Energía geotérmica: Utilización del calor interno de la Tierra para generación eléctrica.
- Energía de biomasa: Generación de electricidad o de biocombustibles, mediante la utilización de restos de materia orgánica.
- Energía de hidrógeno: Generación de electricidad, de calor o de combustibles. Se considera una energía renovable, siempre y cuando para su producción se utilicen energías renovables.
- Energía nuclear de fusión: Utilización de la energía obtenida mediante la fusión controlada de átomos para generar electricidad. Es un proceso similar al que se produce en el interior de las estrellas. A diferencia de la energía nuclear de fisión no produce residuos radiactivos de larga duración, por lo que se considera una energía limpia.

2.2 Energía solar

La energía solar es una de las fuentes renovables de energía más eficiente para abordar el problema energético, siendo la que más ha crecido en los últimos 20 años. El Sol es un enorme reactor nuclear de fusión, que radia energía de manera continua y omnidireccional. Se calcula, de manera aproximada que 174 PW ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$) llegan a la capa superior de la atmósfera terrestre [7]. Sin embargo, la NASA ha estimado que gran parte de esta energía se pierde debido a los procesos naturales ocurrido al atravesar las diferentes capas de la atmósfera (ver Figura 2-4). Estas pérdidas son:

- 6% reflejada por la atmósfera directamente al espacio
- 16% absorbida por la atmósfera
- 20% reflejada por las nubes
- 3% absorbida por las nubes
- 4% reflejada desde la superficie terrestre

Por lo tanto, solo el 51% de la energía solar llega a los océanos y continentes, esto representa 89 PW (ver Figura 2-4), una cantidad más elevada que la demanda energética mundial anual [8]. Si analizamos el flujo solar incidente, $163,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ son absorbidos por la superficie terrestre y los océanos. De este flujo, solo se consiguen aprovechar $0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, menos de un 0,4%.

Los avances tecnológicos están permitiendo aprovechar de manera más eficiente la energía solar. Se estima que en el año 2100 el 70% de la demanda energética mundial será abastecida mediante el aprovechamiento de la energía solar según “World Energy Resources” [1].

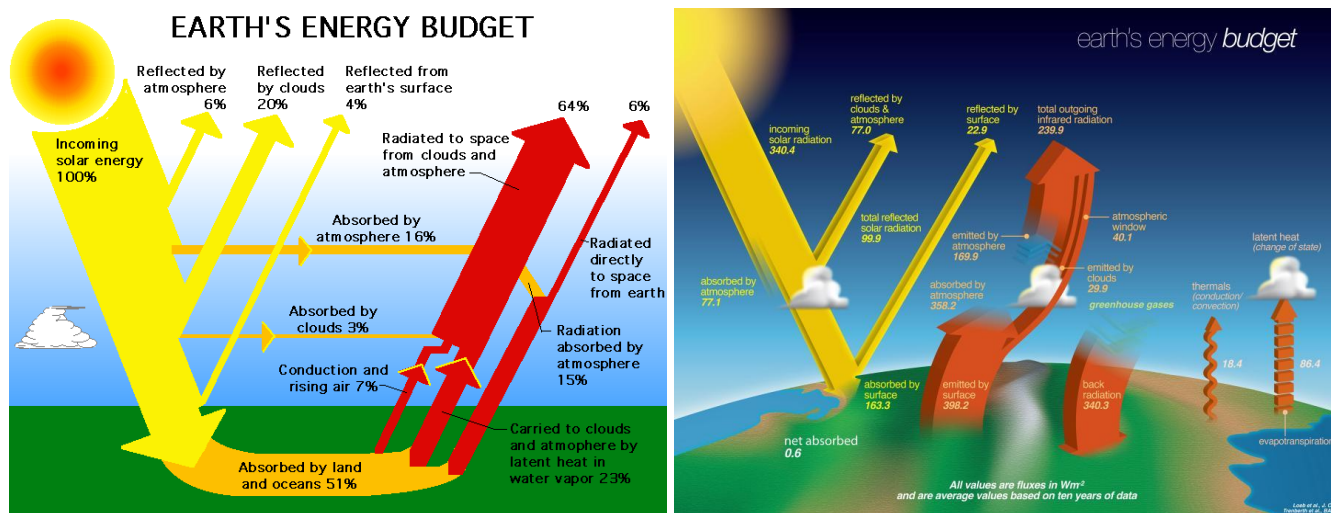


Figura 2-4 Proceso de absorción de energía solar en porcentaje y en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ [8]

2.2.1 Reseña histórica y aplicaciones de la energía solar

Desde la antigüedad, la humanidad ha sido consciente del gran potencial energético del sol. En la Antigua Grecia ya se aprovechaba esta energía mediante la utilización de espejos (helióstatos), tanto en el ámbito naval (usado para las comunicaciones) como de forma doméstica para calentar agua sanitaria.

Posteriormente, el Imperio Romano llegó a diseñar sus edificios orientando ventanas y puertas al sol para utilizarlos como una fuente natural de calefacción, y a construir los primeros tipos de colectores solares utilizados para calentar agua sanitaria.

En 1839, el físico francés Alexandre Edmond Becquerel descubrió que la energía solar podía ser convertida en electricidad aprovechando las propiedades de diferentes materiales, lo que hoy en día se conoce como efecto fotovoltaico.

En 1883 Charles Fritts crea la primera célula solar de silicio. Sin embargo, hasta la década de 1950 no se consigue desarrollar una célula solar altamente eficiente, esta fue patentada por Bell Labs [9].

Entre las aplicaciones actuales de la energía solar encontramos:

- Generación de electricidad: Utilizando el efecto fotovoltaico o ciclos termodinámicos.
- Producción de agua caliente sanitaria: Utilizando procesos termodinámicos
- Calefacción: Utilizando procesos termodinámicos
- Refrigeración: Utilizando la energía para alimentar máquinas térmicas frigoríficas.
- Desalinización: Utilizando la energía para alimentar la planta o para generar vapor solar.
- Sistemas de bombeo: Utilizando la energía absorbida por el fluido para su bombeo.

2.2.2 Clasificación de la energía solar

En función de la tecnología utilizada la energía solar se clasifica en 6 tipos:

1. Energía solar térmica: Producción de agua caliente sanitaria o calefacción mediante el intercambio de calor con un fluido trabajo que absorbe la energía procedente del Sol [10].
2. Energía solar termoelectrónica o solar térmica de concentración: Utilización de helióstatos para concentrar toda la energía solar en un gran colector que calienta agua hasta evaporarla, permitiendo generar electricidad mediante una turbina [11].
3. Energía solar fotovoltaica: Implementación de módulos fotovoltaicos, capaces de ionizar sus electrones al entrar en contacto con los fotones del Sol, generando electricidad [12].
4. Energía solar portátil: Funcionamiento similar al de los módulos fotovoltaicos, pero en menor escala. Es una tecnología en gran desarrollo, dada la gran versatilidad de aplicaciones. Su uso va desde su incorporación en calculadoras y relojes hasta vehículos no tripulados como los UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) y los USV (*Unmanned Surface Vehicle*).
5. Energía solar pasiva: Tecnología aplicada a ciertos materiales y construcciones, con el fin de aprovechar la energía solar de manera pasiva para calentar o iluminar una estancia, esta tecnología es conocida como ecodiseño [13], [14].
6. Energía solar híbrida: Combinación de cualquier tipo energía solar con otra energía renovable. La más común es la combinación de energía solar fotovoltaica con energía eólica.

2.2.3 Ventajas e inconvenientes de la energía solar

La energía solar presenta un gran número de ventajas frente a las energías convencionales, en los siguientes ámbitos [15]:

- ✓ **Medio ambiente**: Nula emisión de gases contaminantes, reducción ruido y bajo impacto visual comparado con otras fuentes de energía.
- ✓ **Económicos**: Independencia y libertad económica al ser accesible por todos los países.
- ✓ **Sostenibilidad**: Es una fuente natural renovable e inagotable.
- ✓ **Mantenimiento**: Escaso y barato, haciéndola muy rentable a largo plazo.

Aunque, al ser una energía aún en desarrollo, debe superar ciertas dificultades e inconvenientes [15]:

- ✗ **Coste**: La inversión inicial es elevada, lo que disminuye su rentabilidad a corto plazo.
- ✗ **Variabilidad en el tiempo y almacenamiento**: La dificultad de almacenamiento de la energía y el hecho de que la energía solar recibida no se ajuste con la demanda energética.
- ✗ **Impacto ambiental**: El procesamiento de los materiales necesarios para la fabricación de placas solares implica la emisión de gases de efecto invernadero y severos daños en el medio ambiente, debido a la toxicidad de muchos de estos materiales.
- ✗ **Espacio ocupado**: La eficiencia por unidad de superficie es menor que la de las centrales térmicas convencionales. A pesar de que su impacto visual en las ciudades es escaso, se debería de incorporar gran cantidad de células fotovoltaicas y colectores solares en todos los edificios para abastecer debidamente la demanda energética. Esto supone un gran desafío, especialmente en las áreas más densamente pobladas, donde la demanda es más elevada.

2.3 Colectores solares térmicos

Los colectores solares térmicos son equipos que, gracias a la captación de energía procedente de la radiación solar, permiten transferir esta misma energía a un fluido térmico, a través de diversos procesos térmicos. El fluido térmico que absorbe la energía presenta diversas utilidades, por lo que, entre las aplicaciones de los colectores solares se encuentran:

- **Sistemas de calefacción**
- **Obtención de ACS (Agua Caliente Sanitaria)**
- **Calentamiento de agua en piscinas**
- **Desalinización del agua de mar**
- **Sistemas de bombeo**
- **Generación de electricidad**

Si bien, aunque tanto los colectores solares térmicos como las placas fotovoltaicas compartan la capacidad de aprovechar la energía radiada por el sol para producir electricidad, es crucial comprender que se tratan de tecnologías diferentes. En el caso de los colectores solares consiguen generar electricidad mediante la utilización de ciclos térmicos y turbinas. Por otro lado, las placas solares fotovoltaicas utilizan el efecto fotovoltaico para generar electricidad directamente, a partir de la radiación solar.

2.3.1 Clasificación de los colectores solares térmicos

Los colectores solares térmicos se clasifican en dos grandes grupos (superficiales o volumétricos), atendiendo a su principio funcionamiento [16], [17]:

- **Colectores solares superficiales:** El parámetro fundamental será la superficie absorbente o la superficie absorbente equivalente disponible. Se dividen a su vez en dos categorías [7]:
 - **Colectores no concentradores de rayos:** Aplicaciones a bajas temperaturas.
 - Colectores solares de placa plana (CSPP)
 - Con cubierta
 - Sin cubierta
 - Colectores solares híbridos o PVT (fotovoltaicos-térmicos)
 - Colectores solares híbridos mejorados o PVT bifaciales
 - **Colectores concentradores de rayos:** Aplicaciones a medias y altas temperaturas
 - Campo de helióstatos o colectores de Fresnel
 - Colectores solares de plato parabólico
 - Colectores solares de canal parabólico (cilindro-parabólico)
- **Colectores solares volumétricos:** El parámetro fundamental a controlar en su caso será el caudal y las propiedades absorbentes del fluido, ya que se eliminan las pérdidas por transferencia de calor asociadas a la superficie absorbente.
 - **Colectores de absorción directa (DASC):** Aplicaciones a bajas temperaturas. Normalmente, se utilizan nanofluidos, ya que tiene mejor capacidad de absorción y de transferencia calor que los fluidos térmicos convencionales. Pueden ser:
 - De placas transparentes
 - De tubos transparentes

También se puede establecer una clasificación en función de la temperatura alcanza por el fluido de trabajo, la cual influirá en sus posibles aplicaciones [18], [19]:

- Baja temperatura (< 120 °C): Se utilizan para uso doméstico, como: la obtención de agua caliente sanitaria, calefacción, calentamiento de piscinas...
- Media temperatura (120 - 400 °C): Aplicaciones en las que se requieran calentar agua a temperaturas elevadas o para generación eléctrica.
- Alta temperatura (400 - 1000 °C): Para generación eléctrica o desalinización mediante la utilización de vapor solar.

2.3.2 Colectores solares superficiales no concentradores de rayos

Son aquellos colectores cuya superficie de interceptación coincide con la superficie de absorción. Como se comentaba anteriormente, sus aplicaciones se limitan a instalaciones en las que se requiera calentar un fluido a bajas temperaturas ($< 120\text{ }^{\circ}\text{C}$). Entre este tipo de colectores encontramos:

▪ Colectores solares de placa plana (CSPP)

Son el tipo más común de colectores debido a su bajo coste y sencilla tecnología. Por norma general, permanecen fijos en la misma posición, por lo que es importante estudiar su orientación inicial. Tienen una eficiencia limitada y su rendimiento es muy bajo para temperaturas superiores a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ [20].

Como se puede ver en la Figura 2-5, los colectores de placa plana suelen estar formados por:

- Cubierta de vidrio: Fabricadas en materiales con alta transmitancia de radiación de onda corta ($\lambda \leq 2,5\text{ }\mu\text{m}$) pero baja transmitancia de onda larga ($\lambda > 2,5\text{ }\mu\text{m}$). Realiza dos funciones:
 - Dejar pasar la radiación solar de onda corta, para poder ser absorbida por la placa.
 - Por otro lado, no permite la salida de la radiación de onda larga, lo que consigue reducir las pérdidas por convección e irradiación al crear un efecto invernadero.
- Placa absorbente: De color negro, para absorber la mayor cantidad de radiación posible.
- Tubos de cobre: Donde el fluido térmico absorbe energía mediante intercambio de calor.
- Aislamiento: Puede estar compuesta por varias capas, su función es disminuir las pérdidas.
- Carcasa: Contiene los elementos anteriores y evita las pérdidas por convección.
- Otros elementos del circuito: Sensores, depósitos, bombas, válvulas... (ver Figura 2-6).

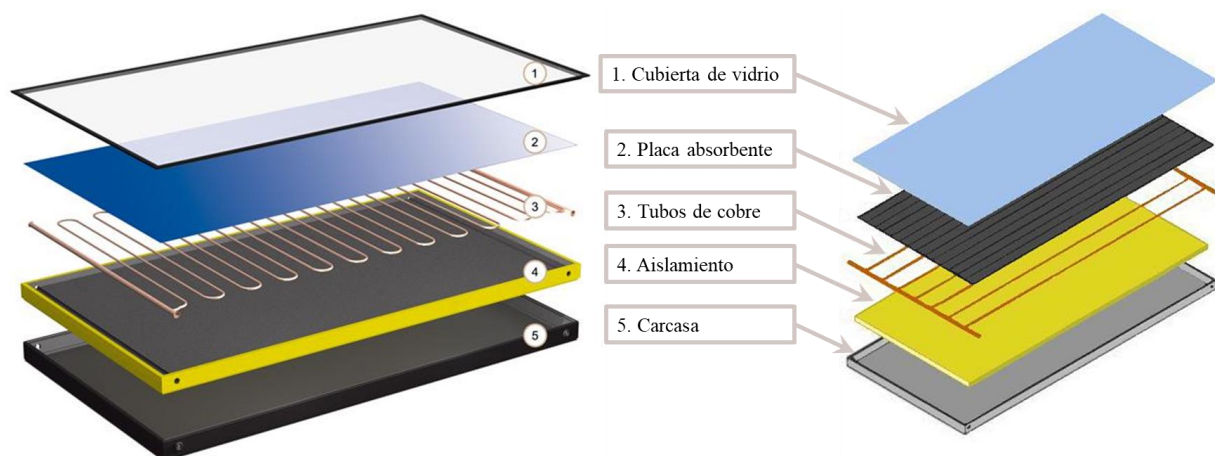


Figura 2-5 Partes de un colector solar de placa plana (elaboración propia)

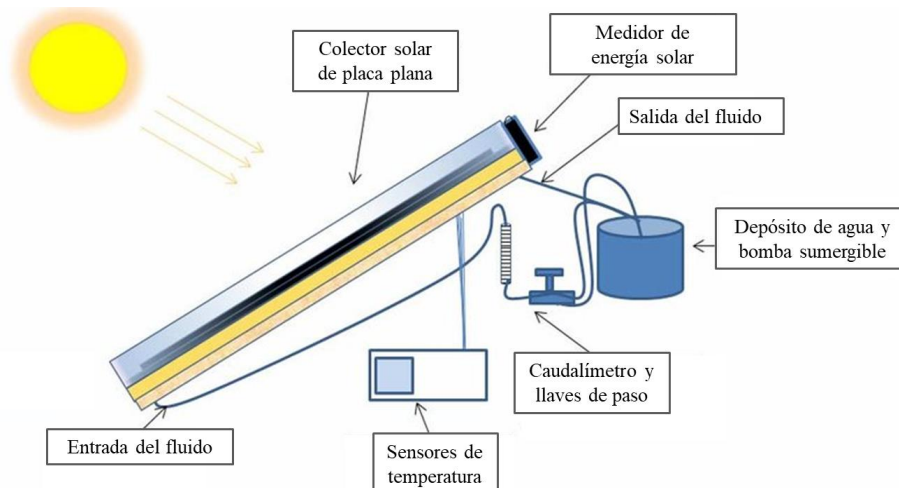


Figura 2-6 Instalación basada en un colector solar de placa plana (modificado de [21])

■ *Colectores solares híbridos o PVT (fotovoltaicos-térmicos)*

Son capaces de absorber la energía solar mediante dos procesos simultáneos e independientes. Primero convirtiéndola directamente en electricidad y después utilizando el calor disipado para calentar un fluido térmico [22], [23]. Estos colectores están formados por dos placas (ver Figura 2-7):

- Un módulo fotovoltaico, con eficiencias máximas entre el 5% y el 20%.
- Una placa absorbente, en la parte posterior del módulo fotovoltaico, con una doble función:
 - Eliminar calor del módulo fotovoltaico para evitar su sobrecalentamiento, lo que mejora notablemente la eficiencia eléctrica del mismo.
 - Absorber el calor residual para calentar un fluido térmico y utilizarlo en aplicaciones de baja temperatura, similar al funcionamiento de un colector de placa plana.

Consideraciones de los colectores solares híbridos:

- Entre ambas placas hay un espacio vacío con aire, donde se transfiere calor por convección.
- Los colectores híbridos PVT logran mayor eficiencia eléctrica que las placas fotovoltaicas.

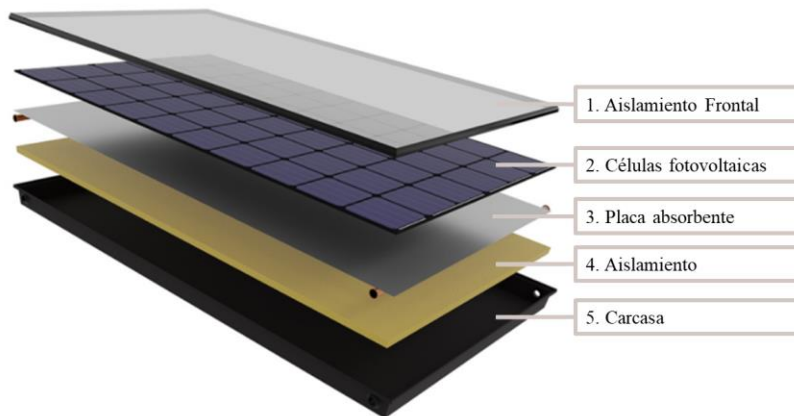


Figura 2-7 Partes de un colector solar híbrido/PVT (elaboración propia)

■ *Colectores solares híbridos mejorados o PVT bifaciales*

Se conocen también como, colectores solares híbridos mejorados ya que a diferencia de los PVT convencionales, utilizan algún material para llenar el espacio existente entre ambas placas, este material puede ser agua o pasta térmica (ver Figura 2-8). Al disponer de un medio material diferente al aire, entre ambas placas, se consigue reducir las pérdidas por convección. La utilización de agua permite aumentar la eficiencia fotovoltaica un 15% al conseguir extraer mayor cantidad calor del módulo fotovoltaico [24].

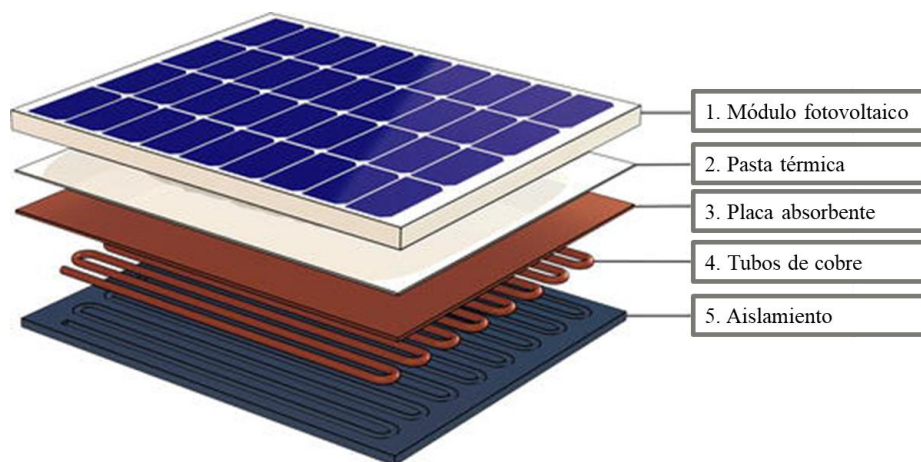


Figura 2-8 Partes de un colector solar PVT bifacial (elaboración propia)

2.3.3 Colectores solares superficiales concentradores de rayos

Son aquellos colectores que cuentan con superficies cóncavas, lo cual les permite concentrar mayor cantidad de radiación solar con una superficie de absorción más pequeña. Se utilizan en aplicaciones a medias y a altas temperaturas, en las cuales, se requiere un cambio en el agua a calentar, evaporándola, para así poder ser utilizada para la generación eléctrica mediante turbinas de vapor, motores térmicos...

- **Campo de heliostatos (concentradores solares de Fresnel)**

Este tipo de colectores consisten en un gran campo de espejos reflectores (*heliostatos*) orientados hacia un gran colector situado, generalmente, en una torre central elevada. Dada la importancia de la orientación de los heliostatos, estos son controlados de forma automática mediante tecnología azimutal, permitiendo obtener, en cada momento del día, la máxima eficiencia energética. Esto se conoce como “*Técnica YNES*” [25] y se utiliza para conseguir el diseño más optimizado para un campo de heliostatos.

Como se puede ver en las Figura 2-9, el colector solar está ubicado en la torre central y se encarga de absorber la energía reflejada por todos los heliostatos (concentradores de Fresnel). Después, la energía se transfiere a un fluido térmico, que se encargará a su vez, de transferir la energía a un depósito de agua. Al recibir energía, el agua se calienta y evapora. Mediante el paso del vapor a través de una turbina de vapor, se genera electricidad, análogamente a como se genera en las centrales térmicas y nucleares [26].

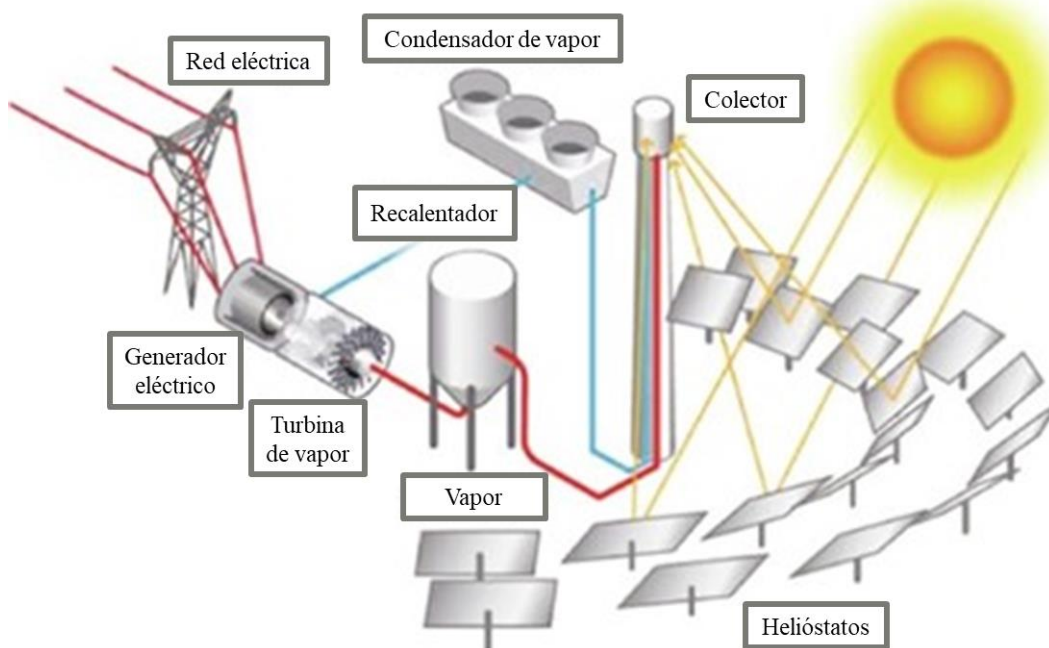


Figura 2-9 Esquema funcionamiento de un campo heliostatos (modificado de [26])

- **Concentradores solares de plato parabólico (plato-motor)**

Este tipo de colectores utilizan un espejo para concentrar los rayos solares en un único punto común, al igual que los concentradores de Fresnel. Sin embargo, en este caso, el espejo tiene forma parabólica (ver Figura 2-10). Disponen de un cilindro negro absorbente, situado en el punto común de cada lente, que contiene un fluido térmico. Este fluido, al alcanzar la presión y temperatura adecuadas, consigue generar electricidad mediante la utilización de un motor de ciclo de Brayton o de Stirling [27], [28].

Este tipo de concentradores incorporan una mejora en la eficiencia óptica frente a los concentradores de Fresnel, ya que, a misma cantidad de área ocupada, permiten obtener una absorción equivalente a una superficie mayor. Sin embargo, presenta varias desventajas como son: su elevado coste y la complejidad para diseñar un sistema de orientación óptimo, ya que necesitan ser orientados de manera tridimensional para mantener la máxima eficacia energética.

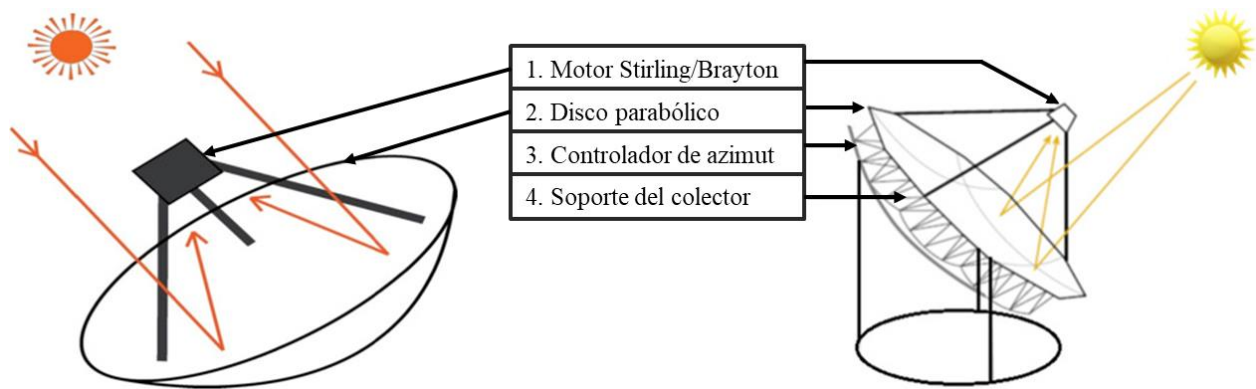


Figura 2-10 Esquema colector solar de plato parabólico (modificado de [29])

▪ Concentradores solares de canal parabólico (cilindro-parabólico)

En este caso los rayos solares se utilizan para transferir energía térmica a un fluido contenido en un cilindro. Este fluido recorre un circuito atravesando intercambiadores de calor en los que se consigue calentar agua, generando vapor, que será utilizado para la producir electricidad mediante un ciclo de Rankine [7]. A diferencia de los concentradores de plato parabólico, que funcionan de manera individual, los concentradores de canal parabólico suelen estar situados en un campo (ver Figura 2-11), de manera similar al campo de heliostatos, pero con la misma forma que los colectores de plato parabólico. Combina ventajas de los dos tipos de colectores anteriores y presenta alguna adicional:

- De los concentradores de Fresnel: Formación de grandes agrupaciones o campos.
- De los de plato parabólico: Superficie equivalente aumentada, lo que se traduce en una gran eficiencia energética, al absorber la radiación equivalente a un área mayor de la que ocupa.
- Como ventaja adicional, su sistema de orientación es más sencillo, ya que solo necesitan ser orientado de manera bidimensional, lo que reduce su coste (ver Figura 2-12).

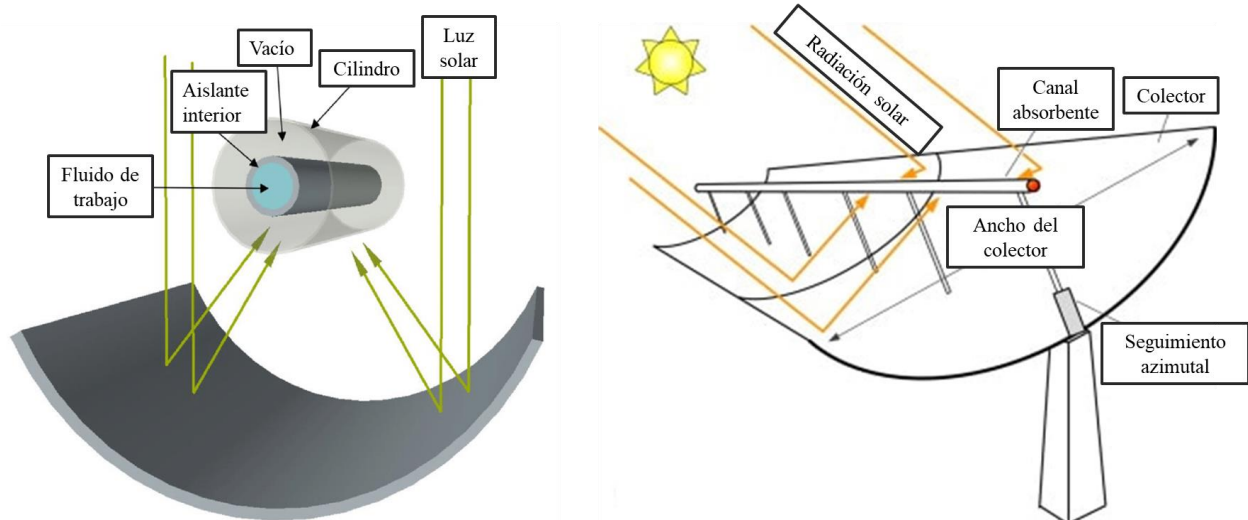


Figura 2-11 Esquema de un colector solar de canal parabólico (modificado de [30])

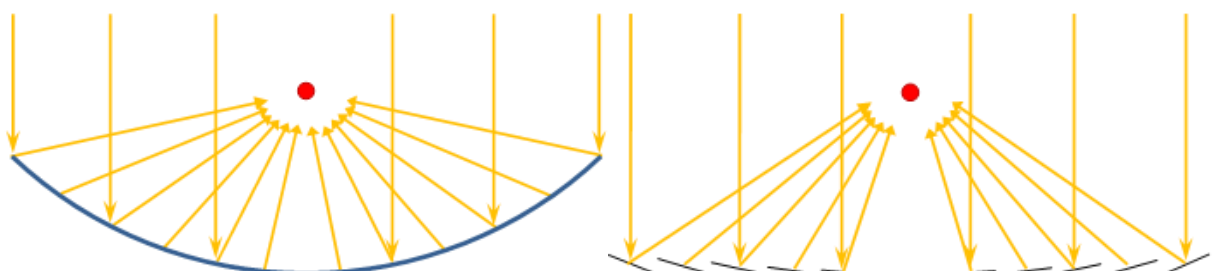


Figura 2-12 Concentrador solar de canal parabólico frente a un concentrador de Fresnel [31]

2.3.4 Colectores volumétricos

▪ Colectores solares de absorción directa (DASC)

Conocidos por sus siglas en inglés DASC “*Direct Absorption Solar Collector*”. Son absorbedores volumétricos que, a diferencia de los absorbedores superficiales, basan su principio de funcionamiento en la reducción de las pérdidas, asociadas a la transferencia de calor. Para ello, disminuyen la resistencia equivalente total, eliminando las resistencias absorción y conducción, relacionadas con el intercambio de calor entre la placa y el fluido de trabajo [18]. En la Figura 2-13, se muestra la diferencia entre un colector de absorción superficial (a la izquierda) y uno volumétrico (a la derecha).

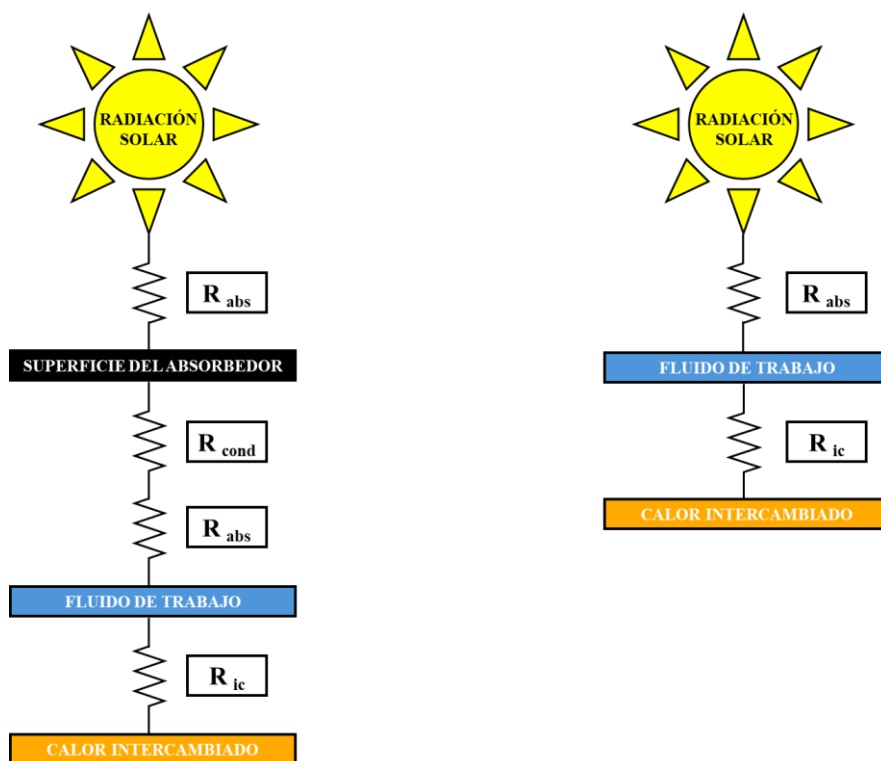


Figura 2-13 Comparativa colector superficial frente colector volumétrico (elaboración propia)

El primer modelo data del año 1975 y se le atribuye a Minardi y Chuang [32]. Como fluido negro se utilizó tinta negra, de origen orgánico, mediante la cual se obtuvieron mejoras en la eficiencia. Sin embargo, se observó que la radiación continuada degradaba la tinta, provocando deposiciones en las válvulas y bombas del circuito y dificultando su adecuado funcionamiento [33]. Diversos experimentos, han verificado también un aumento en la eficiencia térmica debido al uso de nanofluidos, gracias a su capacidad de absorción, como se comentará en el apartado 2.4.

Tras décadas de investigación, la utilización de los DASC sigue muy ligada al ámbito teórico y de modelado. Esta dificultad se debe a la numerosa cantidad de variables de diseño de las que dependen tanto su eficiencia como rendimiento óptimo [34]. Estas variables dependen principalmente de:

- Las propiedades geométricas, como son:
 - La longitud del colector
 - La profundidad del colector
- Fluido de trabajo utilizado
- El caudal utilizado

■ *Propiedades geométricas:*

- Longitud del colector. Inicialmente la eficiencia térmica mejora al aumentar la longitud. Sin embargo, a medida que esta aumenta, las pérdidas térmicas también. La Figura 2-14 representa el efecto de la longitud de un DASC de placa transparente en su eficiencia y pérdidas térmicas, utilizando un nanofluido con partículas de aluminio en base acuosa. El punto en el que se crucen la eficiencia y las pérdidas térmicas determinará la longitud óptima.

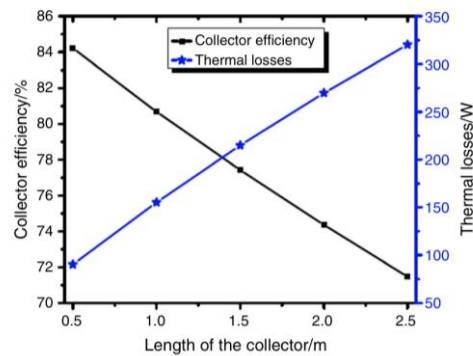


Figura 2-14 Eficiencia y pérdidas térmicas frente a la longitud [35]

- Profundidad del colector. La profundidad óptima dependerá del fluido utilizado, aunque la literatura la establece entre 10-20 mm [36]. La Figura 2-15 recoge el efecto de la profundidad de un DASC de placa transparente en su eficiencia, utilizando un nanofluido con partículas de aluminio en base acuosa. La eficiencia crece de forma logarítmica, alcanzado una asíntota sobre los 10-12 mm. Por otro lado, al aumentar la profundidad aumenta el coste y dificultad de funcionamiento del circuito.

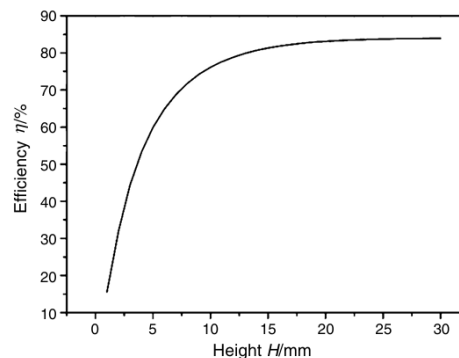


Figura 2-15 Eficiencia frente a la profundidad [36]

■ *Fluido de trabajo:*

- Fluido caloportador. Su elección es esencial para maximizar el rendimiento térmico, este fluido debe poseer una alta capacidad de absorción solar y una alta conductividad térmica. En el apartado 2.4 se describe en detalle las propiedades termofísicas de diversos fluidos térmicos como el agua, los glicoles y los nanofluidos [34].

■ *Caudal:*

- Flujo volumétrico. Su aumento produce en un aumento de la eficiencia de transferencia de calor, pero una disminución en la temperatura de salida del fluido del colector, lo que reduce la temperatura máxima alcanzada en sistema [34]. Al igual que con el resto de las propiedades será fundamental estudiar el caudal óptimo en el cual se alcanza la temperatura máxima deseada logrando la mayor eficiencia global del sistema.

2.3.5 Resumen de las características de los diferentes colectores solares

A demás de las ventajas comunes ofrecidas por todos los colectores, se recogen en la Tabla 2-1, las principales diferencias entre cada tipo, analizando las principales ventajas y desventajas de cada uno.

Clasificación de los colectores		Ventajas	Inconvenientes
Superficiales, concentradores de rayos solares	Placa plana	✓ Bajo coste ✓ Instalación sencilla ✓ Tecnología madura ✓ Bajo mantenimiento	✗ Eficiencia limitada ✗ Gran impacto visual ✗ Ocupan bastante espacio
	PVT	✓ Combina la obtención de ACS y generación eléctrica ✓ Economiza espacio ✓ Rentable a medio plazo	✗ Coste inicial ✗ Complejidad de diseño ✗ Dificil integración de las placas fotovoltaicas con el colector solar
	PVT bifaciales	✓ Mayor eficiencia de generación eléctrica ✓ Mejora de rendimiento en baja intensidad solar	✗ Mayor coste inicial ✗ Mayor complejidad que los PVT convencionales
Superficiales, no concentradores de rayos solares	Campo de helióstatos	✓ Alta eficiencia térmica ✓ Alcanzan temperaturas medias y altas ✓ Generación eléctrica sin placas fotovoltaicas	✗ Necesidad de desarrollo del seguimiento azimuthal
	Plato parabólico	✓ Alta eficiencia térmica ✓ Alcanzan temperaturas altas ✓ Generación eléctrica sin placas fotovoltaicas	✗ Requieren seguimiento azimuthal tridimensional ✗ Coste inicial elevado
	Canal parabólico	✓ Seguimiento azimuthal bidimensional ✓ Coste más reducido ✓ Buena eficiencia térmica, menor que plato parabólico ✓ Alcanzan altas temperaturas ✓ Generación eléctrica sin placas fotovoltaicas	✗ Siguen necesitando el desarrollo de un sistema de seguimiento azimuthal ✗ Coste inicial elevado
Volumétricos, solares de absorción directa (DASC)	Placa o tubos transparentes	✓ Mayor eficiencia a bajas temperaturas ✓ Reducción de pérdidas, gracias a una distribución temperaturas más uniforme ✓ Menor tamaño ✓ Menor coste fabricación ✓ Menor corrosión	✗ Coste de fabricación de los nanofluidos ✗ Control sedimentación y estabilidad del fluido ✗ Estudio del caudal óptimo ✗ Necesaria investigación

Tabla 2-1 Revisión de los diferentes tipos de colectores solares (elaboración propia)

2.4 Fluidos térmicos

Los fluidos térmicos, como se ha comentado en el apartado 2.3, son los encargados de absorber energía procedente de la radiación solar y transferírsela a otro fluido mediante intercambiadores de calor. Se deben de buscar fluidos que cumplan las siguientes características [37]:

- Buenas propiedades térmicas para la transferencia de calor.
- Baja viscosidad en todo el rango de trabajo.
- Baja temperatura de solidificación.
- Baja toxicidad.
- Inocuidad con el medio ambiente.
- Bajo riesgo tanto para personal como para el equipo en caso de fugas.

2.4.1 Fluidos térmicos convencionales

Atendiendo a su elevada conductividad térmica y baja viscosidad, además de la facilidad de obtención, el agua es el mejor fluido térmico convencional. Sin embargo, su estructura molecular presenta serios problemas para las aplicaciones previamente comentadas.

Cuando se utilizan en equipos al aire libre ambientes en los que la temperatura pueda ser inferior a 0 °C en algún momento presenta serios riesgos. Si el agua se solidifica, el hielo generado podría ocasionar severos daños en el circuito. Para modificar la temperatura de solidificación del agua se utilizan anticongelantes como los glicoles. A continuación, se detallan los glicoles más comunes para la elaboración fluidos térmicos utilizados en instalaciones solares [38], [39]:

- Etilenglicol: Es un fluido incoloro, inodoro, ligeramente dulce y más viscoso que el agua. Su toxicidad puede representar un problema para los seres vivos, agua y terrenos circundantes.
- Propilenglicol: Es un fluido incoloro, inodoro, insípido y más viscoso que el agua. Su conductividad térmica es ligeramente menor que la del propilenglicol. No presenta toxicidad alguna para los seres vivos y tiene bajos riesgos como contaminante medioambiental.

En la Tabla 2-2, se puede ver la mejora en la temperatura de solidificación de la mezcla en función de la concentración de glicol añadido a una disolución de agua. Generalmente, no se realizan ensayos con concentraciones de glicol superiores al 60%, dado que no se consiguen mejoras en la temperatura de solidificación de la mezcla. El etilenglicol es un caso especial, ya que, con una cierta concentración de este en agua se consiguen temperaturas de solidificación menores que la del propio glicol.

Sin embargo, en la Tabla 2-3, donde se comparan las propiedades térmicas del agua, el propilenglicol y el etilenglicol a 20 °C, se puede observar que los glicoles presentan propiedades térmicas peores que el agua, lo que genera pérdidas de eficiencia en las instalaciones solares [40]. Debido a este motivo tampoco se utilizan mezclas con concentraciones mayores de glicol. Normalmente, se busca obtener una mezcla que se encuentre en estado líquido a la temperatura más fría que esté expuesta la instalación, pero siempre buscando la menor concentración de glicol para maximizar la eficiencia térmica del fluido.

Algunas características de los glicoles a tener en cuenta cuando se utilizan en instalaciones son [41]:

- Toxicidad: Especialmente en el caso del etilenglicol, se debe evitar que el fluido de trabajo entre en contacto con el agua caliente sanitaria (ACS).
- Viscosidad: Son más viscosos que el agua, su utilización disminuye la velocidad de carga, lo que va a ocasionar una reducción del caudal máximo generado por la bomba del circuito.
- Dilatación térmica: Su coeficiente de dilatación es mayor que el del agua, esto se debe tener en cuenta para evitar sobrepresiones, se recomienda utilizar vasos de expansión.
- Inestabilidad: Ya que a temperaturas mayores de 120 °C se convierten en ácidos, lo que puede generar daños en la instalación.
- Control del pH y salinidad: Para evitar el deterioro y futuras averías de los componentes del circuito hidráulico de la instalación solar.

Concentración de glicol en base acuosa [% v/v]	Temperatura de fusión [°C]	
	Propilenglicol	Etilenglicol
0	0	0
10	-3	-3,4
20	-8	-7,9
30	-14	-13,7
40	-22	-23,5
50	-34	-36,8
60	-48	-52,8
100	-59	-13

Tabla 2-2 Temperatura de fusión según % v/v de glicol (basado en: [42], [43])

Fluidos térmicos	Propiedades termofísicas			
	Conductividad térmica k [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Capacidad calorífica c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Densidad ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Viscosidad dinámica μ [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
Agua	0,608	4180	998,6	$1,002\cdot 10^{-3}$
Propilenglicol	0,196	2400	1035,3	$57,6\cdot 10^{-3}$
Etilenglicol	0,254	2450	1125,9	$21,0\cdot 10^{-3}$

Tabla 2-3 Propiedades termofísicas de los fluidos térmicos a 20 °C (basado en: [42], [43])

En conclusión, si bien los glicoles consiguen mejorar el punto de congelación del agua, tienen un impacto negativo en la capacidad de absorción y en la de transferencia de calor, por lo que cuanto mayor sea su concentración en la mezcla peores serán las propiedades térmicas del fluido resultante. En este trabajo se analizará el comportamiento de dos fluidos convencionales:

- Agua.
- Mezcla de propilenglicol (PG) y agua (A), PG:A 20:80.

2.4.2 Nanofluidos

Un nanofluido es una disolución de partículas nanométricas ($d_{np} \leq 100$ nm), en un fluido base. En los años 90 se generalizó su utilización, ya que pretendían ser fluidos con propiedades térmicas mejoradas gracias a la presencia de sólidos, que tienen mayor conductividad térmica que los líquidos. Con el paso de los años se ha descubierto que las nanopartículas disueltas pueden mejorar otras propiedades mecánicas u ópticas de los fluidos base [44], [45]. Se pueden conseguir fluidos absorbentes de luz mejorados con concentraciones de nanopartículas muy pequeñas [33]. En términos del espectro electromagnético, las nanopartículas consiguen aumentar la eficiencia absorción en las regiones ultravioleta, visible e infrarroja (ver Figura 2-16).

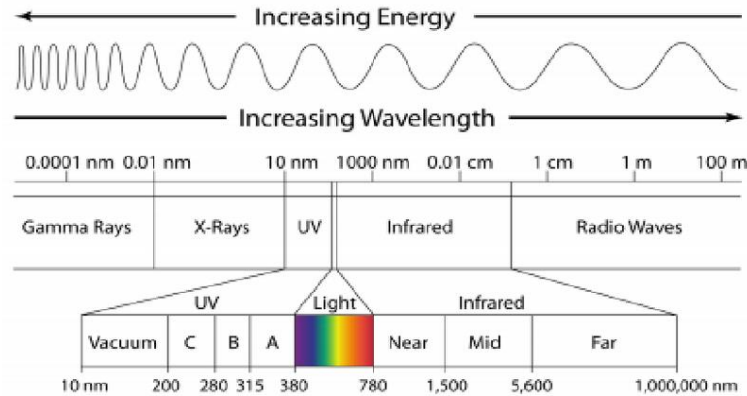


Figura 2-16 Regiones del espectro electromagnético [46]

El trabajo de Nguyen et al. [47] es un ejemplo de trabajo experimental en el que se consiguen mejoras de la absorción de luz con nanofluidos en un DASC de placa plana. Los fluidos utilizados fueron agua, un fluido biodegradable consistente en un coloide de café disuelto, y distintos nanofluidos acuosos basados en *Carbon Black* y un surfactante (Dodecilsulfato sódico, SDS). En la Figura 2-17 se puede observar la mayor eficiencia del nanofluido 0.01% *Carbon Black* frente al agua y al colide de café.

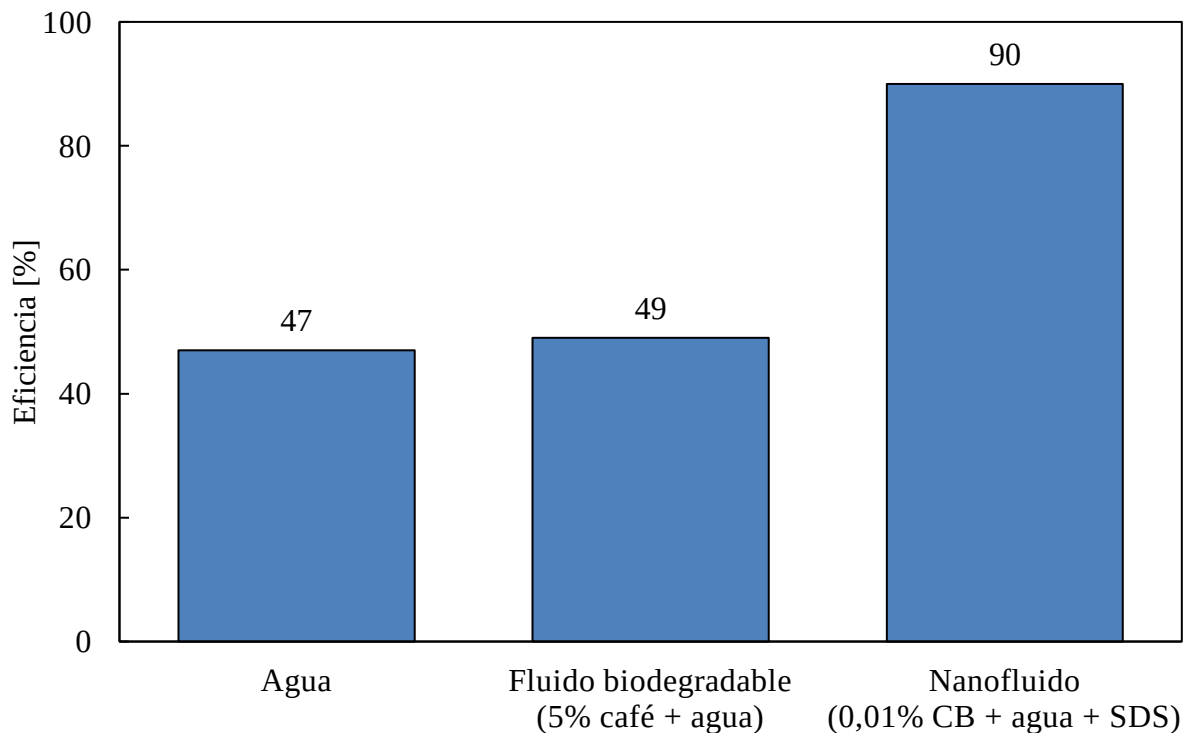


Figura 2-17 Resultados del trabajo de Nguyen en un DASC de placa plana (basado en: [47])

El diseño de los nanofluidos es complejo, lo que incrementa considerablemente su coste. Un nanofluido bien diseñado requiere un estudio detallado acerca del tamaño de las partículas, concentración y estabilidad de la dispersión necesarios para optimizar las propiedades requeridas, en cada una de sus aplicaciones [34]. En el presente trabajo se han utilizado nanofluidos estables compuestos por nanopartículas de diamante disueltas en una base de propilenglicol:agua, 20:80, previamente diseñadas en un Trabajo de Fin de Grado anterior [48].

Los parámetros de mayor relevancia para el diseño de un nanofluido son:

- La elección del fluido base. Según el rango de temperaturas para el que se utilicen
- Consideración de las características de las nanopartículas. Principalmente atendiendo a:
 - Material
 - Tamaño
 - Concentración

▪ *Fluidos base y características*

La elección del fluido base depende del rango de temperaturas en el que opere [18]:

- **Agua:** Para temperaturas entre 0 °C y 100 °C.
- **Glicoles o gliceroles:** Para temperaturas por debajo de 0 °C.
- **Aceites:** Para temperaturas superiores a 175 °C.

▪ *Nanopartículas y sus características*

- **Materiales usados como nanopartículas.** Atendiendo al material, las nanopartículas más utilizadas se dividen, generalmente, en 2 categorías [49]:
 - Nanopartículas inorgánicas. No están compuestas por carbono, pueden ser:
 - Basadas en metales
 - Basadas en óxidos metálicos
 - Nanopartículas basadas en carbono. Pueden ser de:
 - Fullerenos
 - Grafeno
 - Nanotubos de carbono (CNT)
 - Nanofibras de carbono
 - *Carbon Black* (CB)
 - Diamante: son las que se van a utilizar para los ensayos
- **Tamaño de las nanopartículas.** La eficiencia térmica y óptica aumenta ligeramente al aumentar el tamaño de las partículas [37]. Sin embargo, mayores tamaños implican una reducción de la estabilidad de la mezcla, lo que podría provocar obstrucciones en las bombas y válvulas del circuito, afectando a su correcto funcionamiento [18].
- **Concentración.** Es un parámetro fundamental, con él se determinan las propiedades ópticas y termodinámicas del fluido de trabajo. Numerosos experimentos han demostrado un aumento significativo en la eficiencia, en función de la concentración del nanofluido [36]. Dependiendo del tipo de nanopartículas utilizado, esta mejora se producirá en un porcentaje de concentración u otro. Este parámetro debe de ser equilibrado con la estabilidad y el coste, debido a que cuanto mayor sea la concentración peor será su estabilidad y mayores los costes asociados al bombeo del nanofluido.

2.5 Líneas de investigación abiertas en la absorción directa de luz solar

A continuación, se analizan tareas de investigación pendientes de estudio en el ámbito de la absorción directa de luz solar, tanto desde el punto de vista de los tipos de paneles como desde el de los fluidos térmicos utilizados:

- La literatura contiene varios estudios en el ámbito teórico y de modelado respecto a la utilización de la tecnología DASC [32], [33], [35], [50], [51]. Sin embargo, la investigación experimental es escasa.
- Los pocos trabajos experimentales encontrados solamente utilizan colectores solares de absorción directa de placa transparente [35], [50], [51].
- Además, todos estos trabajos experimentales utilizan agua y nanofluidos basados en agua como fluidos absorbedores de luz.

El presente trabajo pretende diseñar un banco de ensayos basado en un DASC de tubos transparentes, para la posterior determinación experimental de los diferentes parámetros de eficiencia. Este banco permitirá el estudio de fluidos base convencionales como el agua y una mezcla propilenglicol y agua.

Además, se estudiará la mejora de la eficiencia energética de un nanofluido oscuro basado en carbono, utilizando diferentes concentraciones de nanopartículas de diamante, en el proceso de absorción de luz en el panel solar y el de convección en un intercambiador de calor helicoidal.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Equipo experimental

En este apartado se detallará la composición y funcionamiento del banco de ensayos diseñado y construido para este trabajo. También se detallará el proceso de montaje y verificación de este.

La Figura 3-1 muestra la configuración del banco de ensayos al completo. Como se observa, se pueden diferenciar tres partes, interrelacionadas entre sí:

- **Circuito hidráulico:** Conjunto de elementos a través de los cuáles fluye el fluido térmico analizado y donde se producen los principales procesos de intercambio de calor.
- **Circuito eléctrico:** Conjunto de elemento encargados de proporcionar alimentación eléctrica a todos los componentes eléctricos como las bombas o el sistema de adquisición de datos.
- **Sistema de adquisición de datos:** Conjunto de hardware y software encargados de la lectura y procesamiento de señales. Permite visualizar y recoger datos para su posterior análisis.

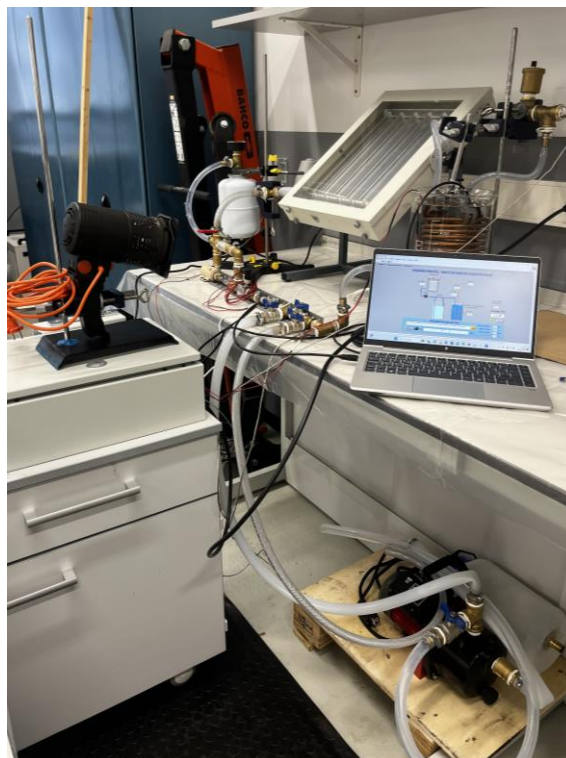


Figura 3-1 Instalación completa del banco de ensayos (elaboración propia)

3.1.1 Circuito hidráulico

Se considera circuito hidráulico a todos los componentes a través de los que circula el fluido de trabajo. La Figura 3-2 muestra un esquema del circuito hidráulico, junto a sus principales componentes. Los procesos de intercambio de calor serán analizados en el colector solar y el intercambiador helicoidal.

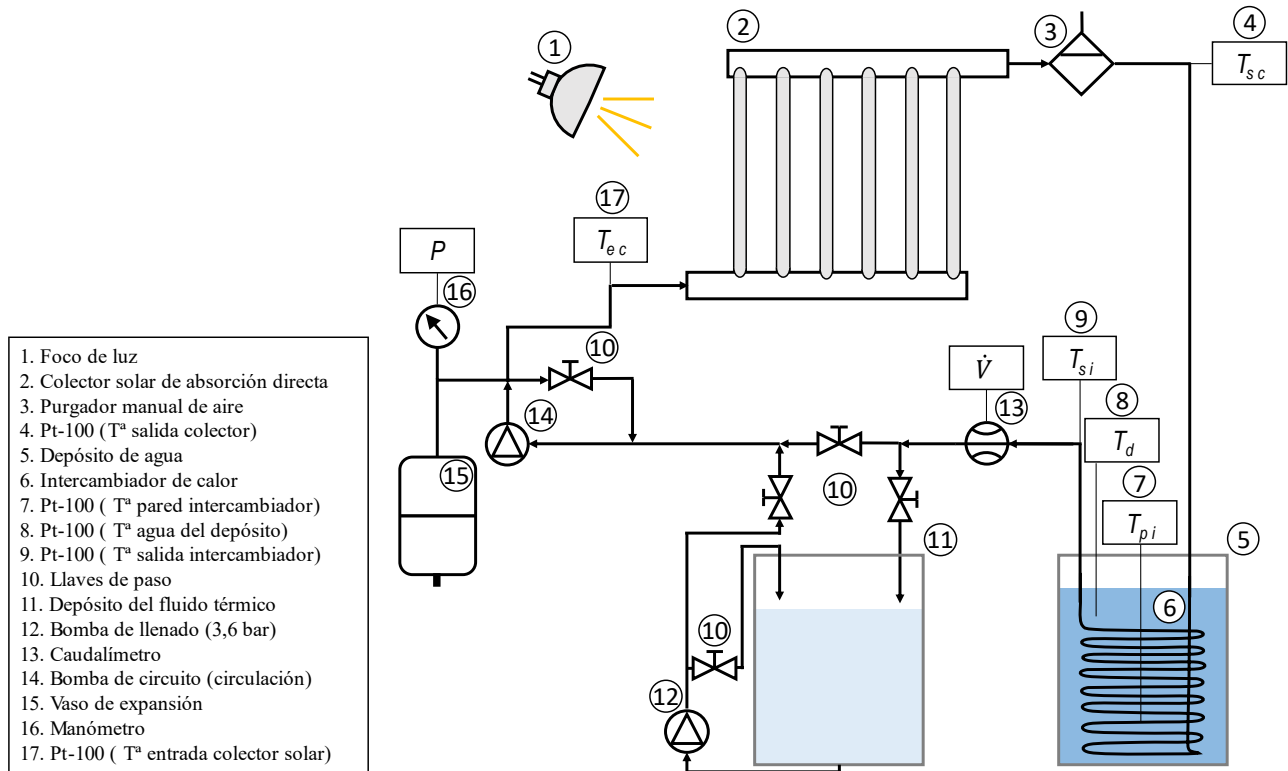


Figura 3-2 Esquema del circuito hidráulico de la instalación solar (elaboración propia)

En la parte superior se encuentra el colector solar de absorción directa utilizado para la realización de los ensayos. Consiste en un panel solar de tubos transparentes de metacrilato. Para simular la radiación solar se ha utilizado un foco halógeno con una potencia de 1000 W. Tras atravesar el panel solar, el fluido circula por un intercambiador de calor helicoidal, situado en el interior de un depósito de agua. En él tiene lugar la transferencia de calor entre el fluido de trabajo y el agua del depósito.

Al salir del intercambiador de calor, el fluido regresa al panel solar. A lo largo de este camino el fluido atravesará el caudalímetro, un baipás (que es una combinación de llaves, utilizada como sistema de llenado y vaciado del circuito) y la bomba de circulación del circuito.

El circuito cuenta, además, con varios componentes utilizados para controlar la presión:

- Un purgador de aire: Utilizado para eliminar burbujas de aire introducidas por la bomba de llenado del circuito. Se sitúa en la parte más elevada del circuito.
- Un vaso de expansión: Utilizado para absorber los cambios de volumen del fluido de trabajo debidos al aumento de temperatura durante la realización de los ensayos. Es especialmente importante durante la utilización de glicoles, los cuales tienen un coeficiente de expansión volumétrica mayor que el agua, esta sobrepresión podría provocar serios daños en el circuito.
- Un manómetro: Utilizado para conocer la presión del fluido en el interior del circuito. Proporciona el valor de la presión manométrica, es decir, la diferencia entre la presión total y la presión atmosférica.

En la Figura 3-2 se puede observar también la posición de los sensores de medición de temperaturas y de caudal, que son parte del sistema de adquisición de datos, del que posteriormente se explicará su composición y funcionamiento.

■ *Colector solar de tubos transparentes de metacrilato*

Es un colector solar volumétrico de absorción directa de tubos transparentes que ha sido colocado en un soporte con una cubierta de vidrio (ver Figura 3-3). Su desarrollo (corte y unión) se ha llevado a cabo en el Taller de mecanizado del CACTI (*Centro de Apoyo Científico-Tecnológico á Investigación*) de la Universidad de Vigo. Sus dimensiones totales son 430 mm de longitud y 355 mm de ancho. El resto de las dimensiones características están recogidas en la Tabla 3-1 y en el plano de la Figura 3-4.

Colector solar de tubos de metacrilato

Componentes	Longitud, L_c	Diámetro exterior, $d_{ext\ c}$	Diámetro interior, $d_{int\ c}$
Tubos horizontales x 2	360,00 mm $\pm$ 0,01 mm	20,00 mm $\pm$ 0,01 mm	16,00 mm $\pm$ 0,01 mm
Tubos verticales x6	315,00 mm $\pm$ 0,01 mm	15,00 mm $\pm$ 0,01 mm	11,00 mm $\pm$ 0,01 mm

Tabla 3-1 Composición y dimensiones de los elementos del colector solar (elaboración propia)

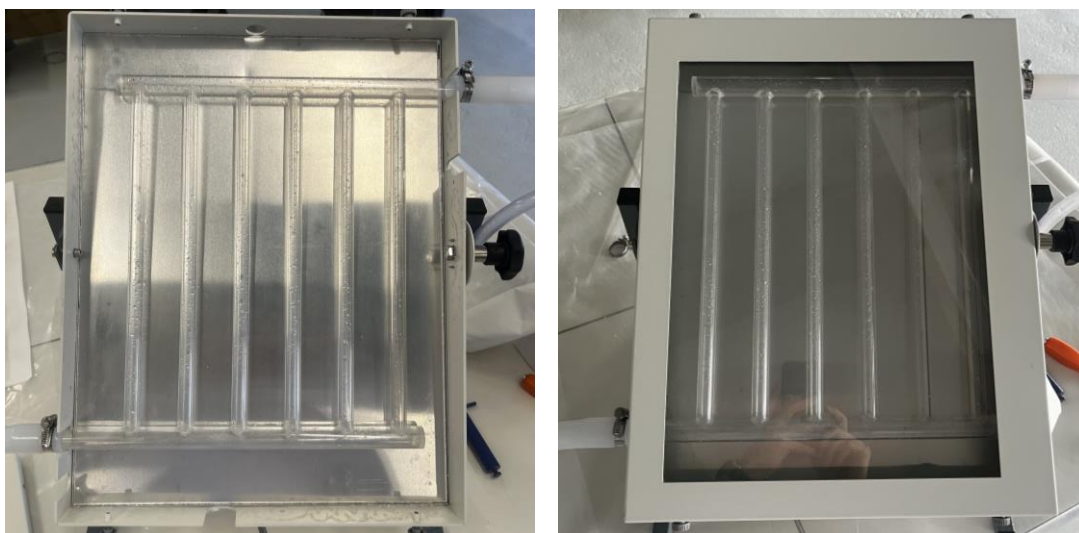


Figura 3-3 Colector solar de tubos transparentes colocado en el soporte (elaboración propia)

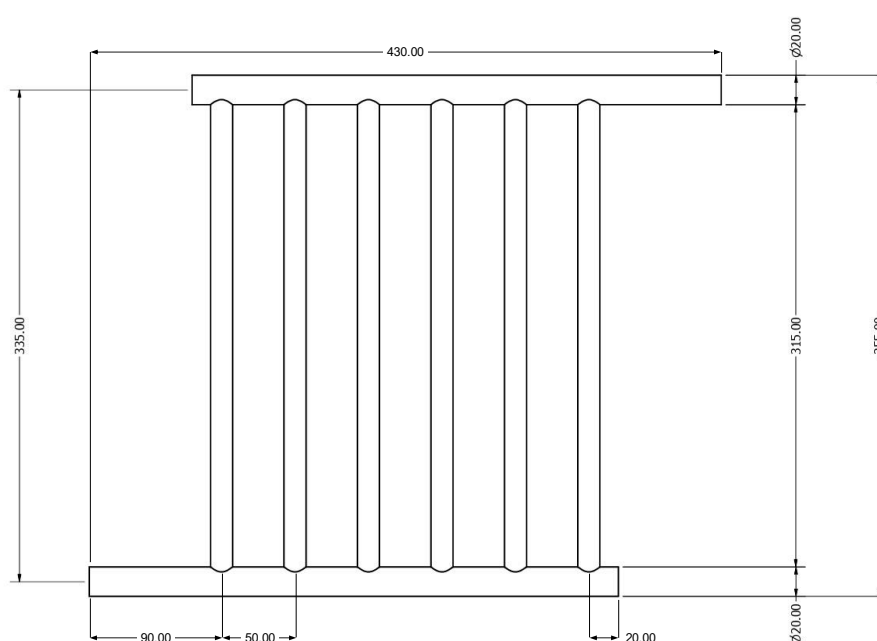


Figura 3-4 Planta y dimensiones del colector solar de tubos transparentes (elaboración propia)

■ *Intercambiador de calor helicoidal*

Sumergido en el depósito de agua caliente sanitaria, tiene como función realizar la transferencia de calor entre el fluido de trabajo y el agua. Con el fin poder realizar los cálculos necesarios asociados a la transferencia de calor, se han recogido en la Tabla 3-2 las principales características y dimensiones del intercambiador de calor. En la Figura 3-5, se puede observar su morfología.

Intercambiador de calor helicoidal de cobre	
Conductividad térmica del cobre, k_{cu}	$385 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Cantidad de espiras, n_i	16 espiras
Diámetro conexión de la manguera, d_i	$12,00 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$
Diámetro del intercambiador, D_i	$100,00 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$
Altura del intercambiador, H_i	$195,00 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$
Paso de la bobina, p_i	$12,00 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$
Diámetro tubo exterior, $d_{ext i}$	$8,00 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$
Diámetro tubo interior, $d_{int i}$	$6,00 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$
Área del intercambiador, $A_i = n_i \cdot \pi \cdot d_{ext i} \cdot \sqrt{p_i^2 + \pi^2 \times D_i^2}$	$0,126423 \text{ m}^2$

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

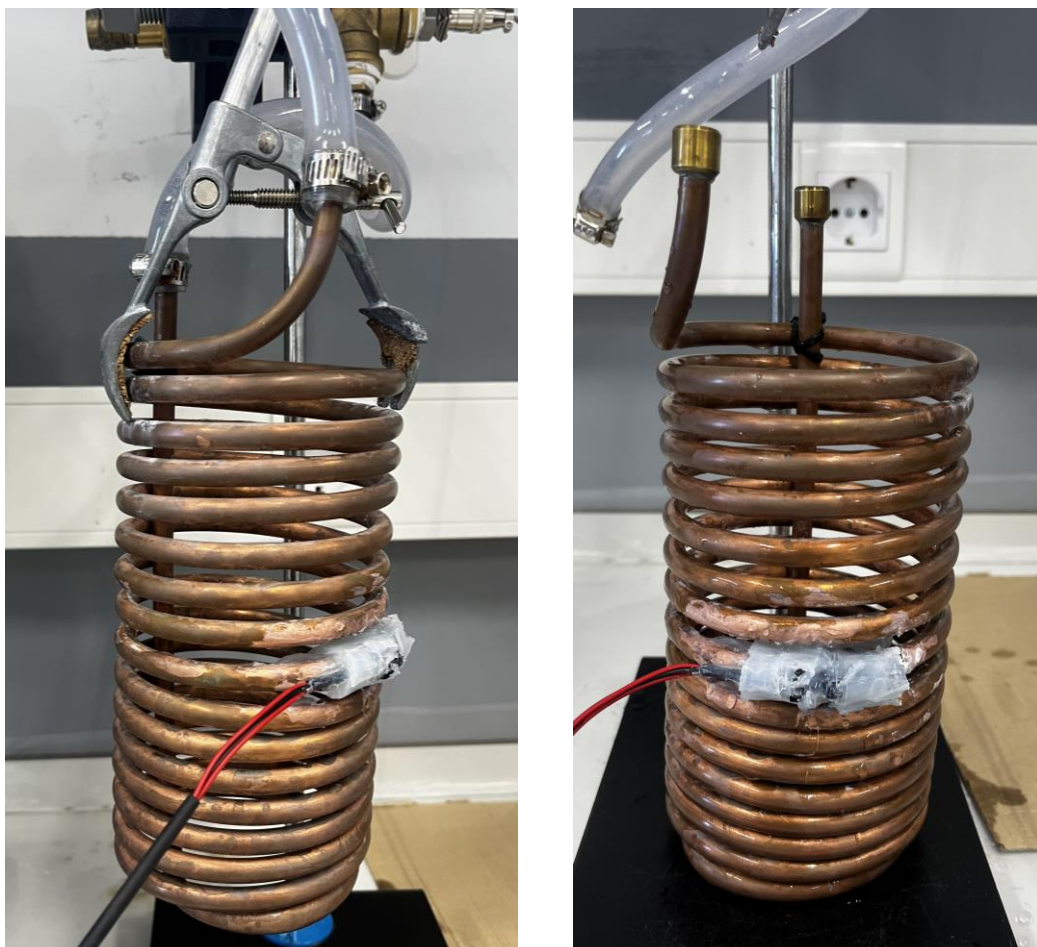


Figura 3-5 Intercambiador de calor helicoidal (elaboración propia)

3.1.2 Circuito eléctrico

Se encarga de proporcionar la tensión eléctrica adecuada a todos los componentes del banco de ensayos. La Figura 3-6 muestra un esquema del sistema eléctrico y de las diferentes conexiones internas.

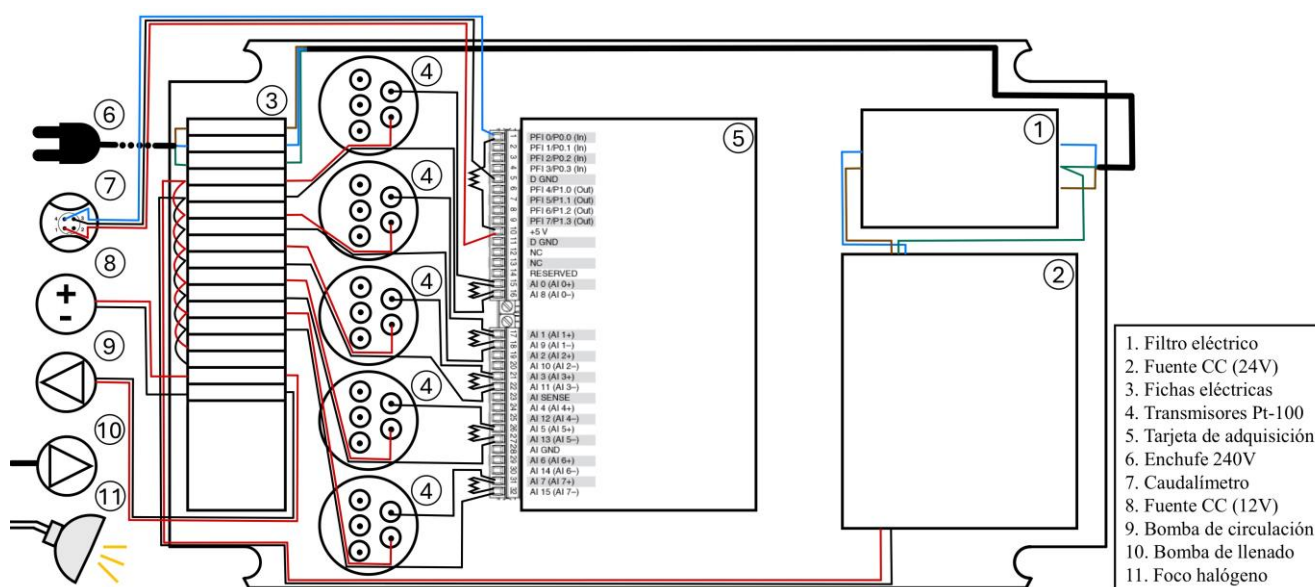


Figura 3-6 Esquema del circuito eléctrico de la instalación solar (elaboración propia)

■ Fuente de 24 V

Su funcionamiento es el siguiente:

1. Alimentación mediante corriente alterna (CA), 230 V – 50 Hz.
2. La corriente pasa a través de un filtro eléctrico. Su finalidad es eliminar el ruido de los armónicos, debidos a interferencias generadas en la red eléctrica del Laboratorio de investigación.
3. La corriente alterna alimenta a la fuente, que proporciona corriente continua (CC), 24 V.

■ Transmisores/conversores de temperatura Pt-100

La fuente de alimentación de 24 V es utilizada para alimentar los 5 transmisores/conversores. Estos miden la resistencia térmica asociada a la placa de platino y envían a la tarjeta de adquisición de datos una señal estandarizada de 4 - 20 mA, que posteriormente será escalada y convertida a temperatura.

■ Bomba del circuito

La bomba necesita ser alimentada con una tensión de 12 V, genera un caudal máximo de 480 L/h y puede impulsar agua a una altura máxima de 3 m. En los experimentos se va a disponer de una caudal máximo de 130 L/h para el agua, debido a las pérdidas de altura. Una fuente de corriente continua regulable, enchufada a corriente alterna (CA), 230 V - 50 Hz, permite el funcionamiento de esta bomba.

■ Bomba de llenado

Esta bomba, recibe alimentación de la red de corriente alterna (CA), 230 V - 50 Hz. Suministra una presión máxima de 3,6 bar. Durante el llenado del circuito, la presión máxima alcanzada fueron 3 bar.

■ Foco halógeno / Foco de cuarzo 1 kW

Funciona utilizando corriente alterna (CA), 230 V - 50 Hz. Su función es radiar energía al colector.

3.1.3 Sistema de adquisición de datos

Este sistema permite la toma de datos relativos a los experimentos y que posteriormente serán utilizados para la validación, cálculos y elaboración de conclusiones. Los datos necesarios para la elaboración de los cálculos son 1 caudal y las 5 temperaturas comentados en el apartado 3.1.1. El sistema está formado por 6 sensores y otros elementos de hardware y software descrito a continuación:

■ Sensores de temperatura Pt-100

Las temperaturas del fluido a su paso por el banco de ensayos, medidas por los sensores son:

- Entrada del fluido de trabajo al colector solar, T_{ec} , donde se espera registrar la temperatura más baja del circuito.
- Salida del fluido de trabajo al colector solar, T_{sc} , donde se espera registrar la temperatura más alta del circuito. La diferencia entre la T_{ec} y la T_{sc} permitirá calcular el calor absorbido.
- Entrada del fluido de trabajo al intercambiador de calor, T_{ei} , con el fin de simplificar y reducir el empleo de sensores, se ha utilizado una única sonda Pt-100 para medir tanto la temperatura a la salida del colector como la temperatura a la entrada de intercambiador ($T_{sc} = T_{ei}$), considerando que no hay pérdidas de calor en el tramo de tubería situado entre dichos puntos del circuito.
- Pared del intercambiador de calor, T_{pi} . Se utiliza una sonda Pt-100 adherida a la pared del intercambiador. En la Figura 3-7 se detallan los pasos seguidos para su montaje y el método utilizado para evitar que el agua del depósito interfiera con la medición de la sonda. Su resultado final se pudo ver en la Figura 3-5.
- Agua del depósito, T_d , en una instalación equivaldría al depósito de ACS.
- Salida del fluido de trabajo del intercambiador, T_{si} , permitiendo calcular el calor cedido en el intercambiador de calor.

Para entender su funcionamiento se debe conocer como varía la resistencia térmica en función de la temperatura a la que se expone la placa de platino. Esto se asocia con el valor de 100Ω a 0°C . Con una fórmula que relacione resistencia y temperatura es fácil extrapolar el valor de temperatura deseado a partir de resistencia térmica del platino. Para este proceso se utiliza un transmisor de temperatura, la tarjeta de adquisición de datos y el software. El proceso es el siguiente:

1. Cada transmisor es conectado en serie con la fuente de alimentación de 24 V (CC) y una entrada analógica de la tarjeta de adquisición de datos. Teniendo en cuenta que las entradas analógicas funcionan con señales 0-10 V, es necesario acoplar una resistencia en paralelo a la misma para transformar la señal 4-20 mA a 0-10 V. En este trabajo, se emplearon resistencias de 499Ω siguiendo las especificaciones del fabricante de la tarjeta.
2. Antes de realizar las medidas, es necesario calibrar previamente el zero y el span del transmisor, empleando resistencias eléctricas que correspondientes al rango de temperaturas en el que funciona el conversor, en este caso 0-100 $^\circ\text{C}$. Por lo tanto, se emplearon las siguientes resistencias de precisión disponibles comercialmente:
 - a. $100 \Omega \equiv 0^\circ\text{C} \rightarrow 4 \text{ mA}$
 - b. $140 \Omega \equiv 103,96^\circ\text{C} \rightarrow 20 \text{ mA}$
3. La señal de 4-20 mA es recibida y leída por la tarjeta de adquisición e interpretada por el software.
4. Dentro del software se realiza un escalado de corriente a resistencia eléctrica y finalmente se obtiene la temperatura utilizando interpolación cuadrática del valor de esta resistencia con la tabla de datos asociada a la Pt-100 (ver Tabla 3-3).

Temperatura [$^\circ\text{C}$]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Resistencia [Ω]	100,0	103,9	107,8	111,7	115,5	119,4	123,2	127,1	130,9	134,7	138,5

Tabla 3-3 Equivalencia temperatura resistencia térmica del platino (modificado de: [52])

Cada sonda Pt-100 está compuesta por una placa de platino con dos patas conductoras de cobre soladas a ella. A estos se le sueldan tres cables, dos a una pata y el otro a la otra pata, constituyendo los que se conoce como Pt-100 a 3 hilos (ver Figura 3-7).

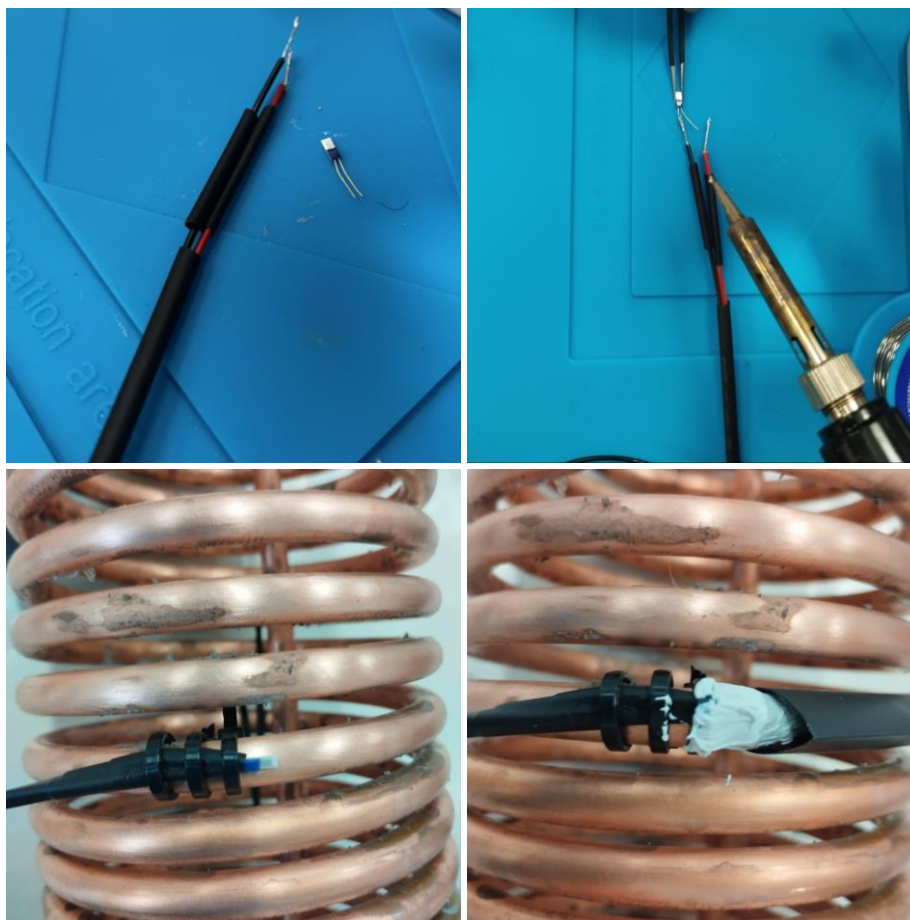


Figura 3-7 Adherencia de una Pt-100 a la pared del intercambiador (elaboración propia)

■ Caudalímetro RS PRO

Para medir el caudal, $\dot{V}$, del fluido de trabajo a su paso por el circuito se ha utilizado el caudalímetro de turbina, RS PRO (0,6 L/min $\rightarrow$ 10 L/min). Su funcionamiento es el siguiente:

1. Es necesario colocar el caudalímetro (ver Figura 3-8) entre dos tuberías rectas por las que fluya el fluido, quedando la turbina del caudalímetro en el medio de estas.
2. Se sujetan los extremos mediante abrazaderas para evitar fugas y se cablea de manera apropiada el caudalímetro, empleando un puerto digital de la tarjeta de adquisición de datos habilitado con función de contador pulsos, como se muestra en el esquema de la Figura 3-6.
3. El fluido impacta sobre las palas de la turbina, lo que hace que el impulsor gire. En el manual del caudalímetro se especifica el factor de escalación, K . Este factor permite convertir el número de pulsos recibidos en un caudal en L/h o en la unidad de medición deseada. Posteriormente se explicará la programación del caudalímetro en el software.



Figura 3-8 Caudalímetro RS PRO: 511-4772 [53]

■ Tarjeta de adquisición de datos

Se conecta mediante USB a un ordenador. Proporciona al software la información necesaria para la conversión, lectura y almacenamiento de los datos. Se ha utilizado una tarjeta NI USB-6210. Su aspecto y esquema se puede ver en la Figura 3-9. Se puede observar que la tarjeta está dividida en dos partes: digital (pines 1-13) y analógica (pines 15-32). La Tabla 3-4 recoge los pines utilizados y su finalidad:

Pin	Nombre	Función
1.	PFI 0/P0.0 (In)	Cuenta los pulsos enviados por el caudalímetro
5.	GND	Conecta a tierra el caudalímetro
10.	+5 V	Alimenta al caudalímetro con una tensión de 5 V
15.	AI 0 (AI 0+)	Entrada del sensor de $T_{sc} = T_{ei}$
16.	AI 8 (AI 0-)	Salida del sensor de $T_{sc} = T_{ei}$
17.	AI 1 (AI 1+)	Entrada del sensor de T_d
18.	AI 9 (AI 1-)	Salida del sensor de T_d
21.	AI 3 (AI 3+)	Entrada del sensor de T_{pi}
22.	AI 11 (AI 3-)	Salida del sensor de T_{pi}
26.	AI 5 (AI 5+)	Entrada del sensor de T_{si}
27.	AI 13 (AI 5-)	Salida del sensor de T_{si}
31.	AI 7 (AI 7+)	Entrada del sensor de T_{ec}
32.	AI 15 (AI 7-)	Salida del sensor de T_{ec}

Tabla 3-4 Conexiones de la tarjeta de adquisición de datos utilizadas (elaboración propia)



Figura 3-9 Tarjeta NI USB-6210 y esquema disposición de los pines [54]

- *Software LabVIEW 2017*

El software LabVIEW, desarrollado por “*National Instruments*”, es una plataforma y entorno utilizado para el diseño de sistemas, en el cual se utiliza un lenguaje de programación gráfico y visual. En este trabajo se diseñará el sistema de adquisición de datos del banco de ensayos anteriormente descrito. Su programación se realiza por módulos o bloques.

La Figura 3-10 muestra el módulo correspondiente a la adquisición de datos del caudalímetro izquierda. Para esto se emplearon las siguientes funciones básicas de LabVIEW: “*Count Edges*” y “*Counter DBL*”. Estas funciones permiten contar los pulsos recibidos en el puerto digital de la tarjeta. Relacionando el número de pulsos con el tiempo y el factor K , se puede obtener el caudal en L/h.

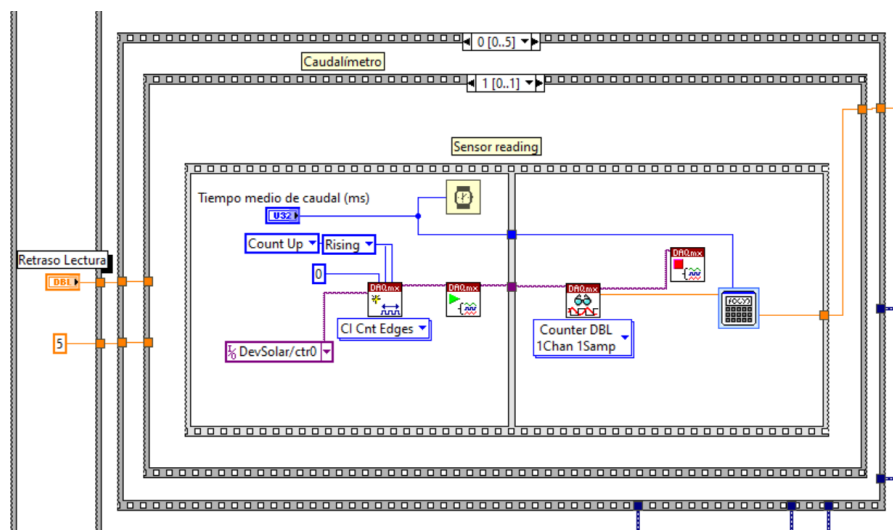


Figura 3-10 Programación del módulo de adquisición del caudalímetro (elaboración propia)

La Figura 3-11 muestra el módulo correspondiente a la adquisición de datos de uno de los sensores de temperatura. En diferencia al caudalímetro, para las Pt-100 se hizo uso de la función “*DAQ Assistant*” configurada para obtener 100 medidas de cada señal de temperatura.

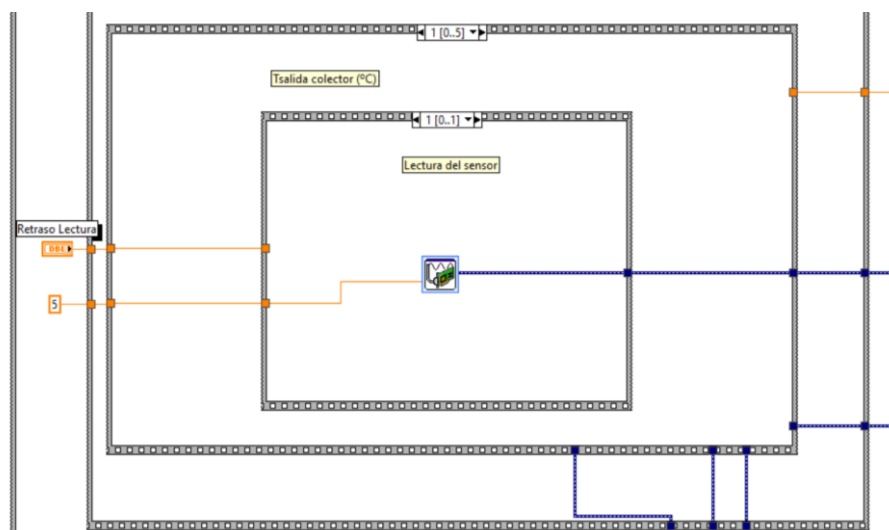


Figura 3-11 Programación del módulo de adquisición de las Pt-100 (elaboración propia)

La Figura 3-12 representa el proceso de análisis y escalado, posterior a la recogida de datos, para algunos de los sensores de temperatura utilizados durante los ensayos. Para este proceso se utilizan las funciones: “Statistics”, “Scaling and Mapping” y “Formula”. Estas funciones permiten elaborar la media de las 100 medidas, escalar la señal obteniendo la resistencia térmica equivalente a la señal y finalmente asociar la resistencia térmica a una temperatura mediante la interpolación cuadrática anteriormente comentada.

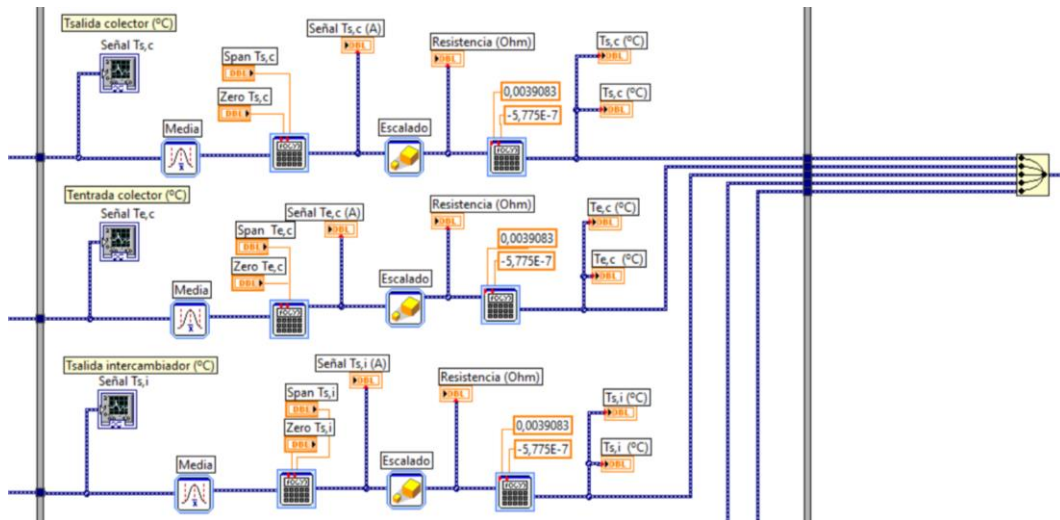


Figura 3-12 Programación del módulo de escalado de temperaturas (elaboración propia)

El almacenamiento de datos se realiza gracias al módulo de la Figura 3-13. En el cual se emplea la función “Write to Measurement File”. Esta función almacena los datos recogidos durante los ensayos en el documento deseado. Para este trabajo se utilizará el formato “.xls” para exportarlos a *Microsoft Excel* y realizar sobre estos el posterior análisis de los resultados.

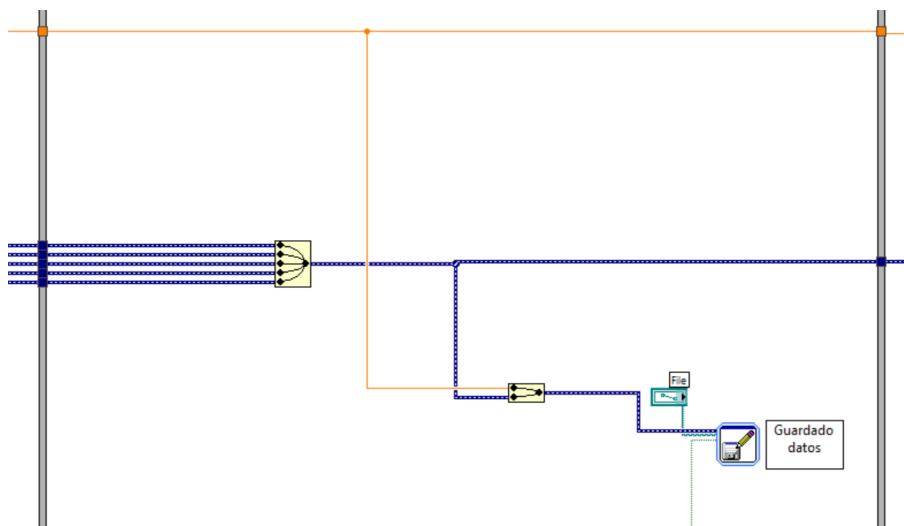


Figura 3-13 Programación del módulo de recogida de datos (elaboración propia)

Finalmente, el módulo de la Figura 3-14, permite la visualización y representación gráfica de los datos de temperaturas y caudal mientras se realizan los ensayos, mediante las funciones “Numeric” y “Chart”, respectivamente.

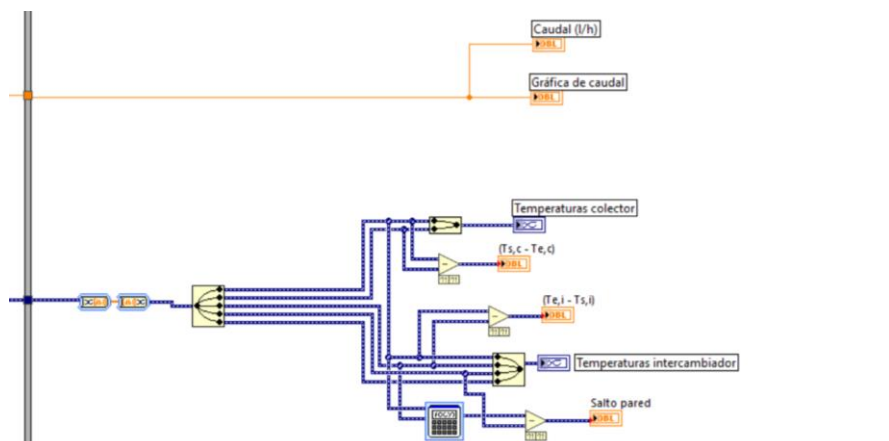


Figura 3-14 Programación del módulo de visualización gráfica (elaboración propia)

En el “Front Panel” se muestran y representan los datos recogidos por los sensores en el esquema del circuito (ver Figura 3-15) y en las gráficas correspondientes (ver Figura 3-16). Estas son herramientas muy útiles a la hora de realizar los ensayos, ya que permiten monitorizar, en todo momento, los valores de temperatura y caudal en el banco de ensayos.

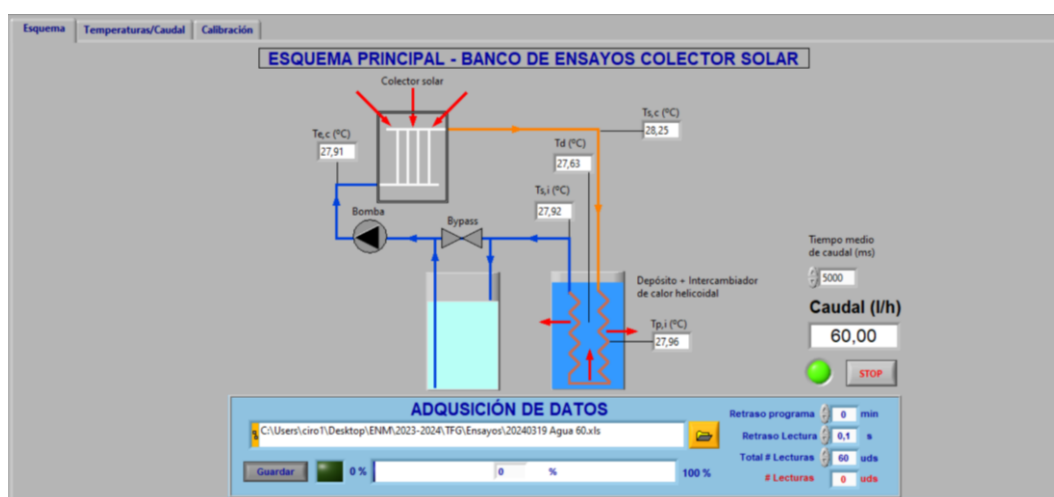


Figura 3-15 Temperaturas y caudal durante un ensayo con agua (elaboración propia)

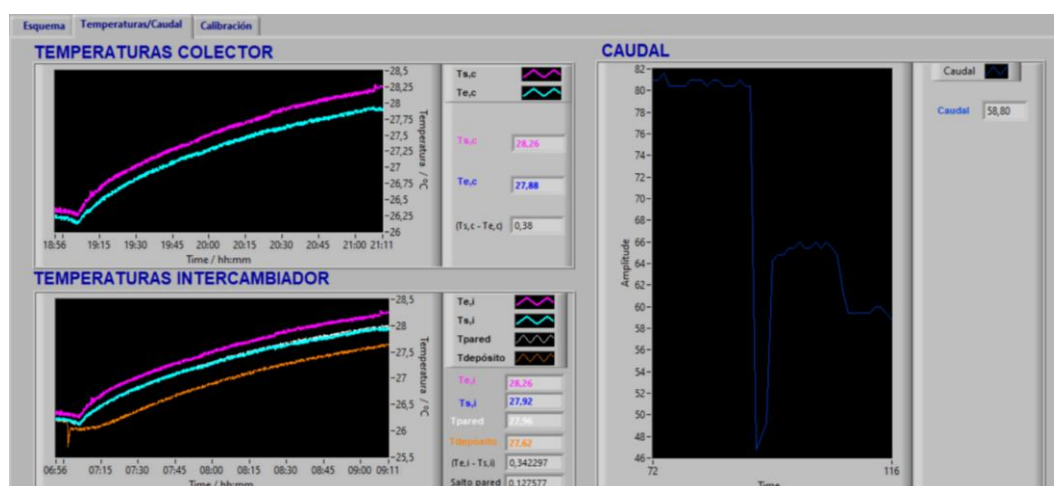


Figura 3-16 Evolución de las temperaturas durante el ensayo con agua (elaboración propia)

3.2 Fluidos térmicos estudiados

Para la realización de los ensayos se han utilizado varios fluidos caloportadores. Primero, para verificar el correcto funcionamiento del banco de ensayos, se realizó un ensayo con agua. Posteriormente se utilizó una mezcla de Propilenglicol (PG) y a Agua (A), PG:A 20:80, mezcla que mejora la temperatura de fusión del agua, pero que tiene peores propiedades como fluido caloportador. Finalmente se utilizaron dos nanofluidos preparados con diferentes concentraciones de nanopartículas de diamantes dispersadas en PG:A 20:80. Los nanofluidos resultantes son de color oscuro (ver Figura 3-17), por tanto, tendrán una mejor capacidad de absorción de radiación ya que se encuentra en una región de mayor frecuencia que el agua en el espectro electromagnético.

3.2.1 Agua

■ *Preparación*

Agua ultrapura, producida por Stack Pure Omnia Tap (Stakpure GmbH, Niederahr, Alemania)

■ *Propiedades termofísicas*

Las propiedades termofísicas necesarias para el análisis térmico realizado en este trabajo son: densidad (ρ), capacidad calorífica específica (c_p), conductividad térmica (k) y viscosidad dinámica (μ). Los valores de ρ , c_p , k y μ para el agua (en unidades del Sistema Internacional) a la temperatura de interés (T , en Kelvin) han sido calculados a partir de aquellos reflejados en la Tabla A4-1 del Anexo IV: Propiedades Termofísicas de los Fluidos [55]. Se han obtenido las siguientes ecuaciones cuadráticas:

$$\rho_A = -0,004122 \cdot T^2 + 2,207 \cdot T + 705,8 \quad (1)$$

$$c_{pA} = 0,005639 \cdot T^2 - 5,209 \cdot T + 5,215 \quad (2)$$

$$k_A = -0,000009673 \cdot T^2 + 0,007454 \cdot T - 0,7546 \quad (3)$$

$$\mu_A = 0,0000002693 \cdot T^2 - 0,0001822 \cdot T + 0,03130 \quad (4)$$

3.2.2 Propilenglicol:agua 20:80

■ *Preparación*

La mezcla PG:A 20:80 se ha preparado pesando las cantidades correspondientes de propilenglicol y agua en una balanza. El agua es ultrapura y el propilenglicol ha sido proporcionado por la empresa Merck (Darmstadt, Germany), con una pureza del 99,5%.

■ *Propiedades termofísicas*

Las mismas propiedades termofísicas serán necesarias para el análisis de la mezcla PG:A 20:80, los valores de ρ , c_p , k y μ para el mezcla (en unidades del Sistema Internacional) a la temperatura de interés (T , en Kelvin) han sido calculados a partir de aquellos reflejados en la Tabla A4-2 del Anexo IV: Propiedades Termofísicas de los Fluidos [56]. Se han obtenido las siguientes ecuaciones cuadráticas:

$$\rho_{PG:A} = -0,0022923 \cdot T^2 + 0,9662 \cdot T + 927,9 \quad (5)$$

$$c_{pPG:A} = -3,553 \cdot 10^{-15} \cdot T^2 + 2,000 \cdot T + 3,394 \quad (6)$$

$$k_{PG:A} = -0,000002127 \cdot T^2 + 0,0022992 \cdot T + 0,001262 \quad (7)$$

$$\mu_{PG:A} = 0,0000003963 \cdot T^2 - 0,0002853 \cdot T + 0,05178 \quad (8)$$

3.2.3 Nanofluidos: Nanodiamantes + PG:A 20:80

■ Preparación

Para la preparación de los nanofluidos se utilizarán concentraciones de 0,05% y de 0,1% en masa de nanodiamantes en base PG:A 20:80 se prepararon pesando las cantidades correspondientes de cada elemento de la dispersión en una balanza (ver Figura 3-17). El agua y el propilenglicol utilizados se han descrito previamente.



Figura 3-17 Preparación nanofluido de diamantes con $\phi_m = 0,0005$ (elaboración propia)

Los nanodiamantes han sido proporcionados por la empresa *PlasmaChem GmbH* (Berlín, Alemania) bajo el nombre comercial: “*Single-Digit Nanodiamonds (SDND), 5% in water*”. La Tabla 3-5 muestra las principales características de las nanopartículas, según el fabricante. Los tamaños declarados por el fabricante (3,5-5,2 nm) pueden ser confirmados en la Figura 3-18, donde se muestra una imagen de una microscopía electrónica de transmisión de las nanopartículas de diamante utilizadas tomada de un TFG previo, donde se estudió la estabilidad y las propiedades ópticas de estos nanofluidos [48].

Nanodiamantes SDND de PlasmaChem GmbH	
Color	Gris
Forma	Polvo
Punto de congelación	0 °C
Tamaño nanopartículas	3,5-5,2 nm
Superficie específica	320-350 m ² /g
Tamaño de partícula (DLS)	5-15 nm
Contenido de cenizas	< 0,4 %
Método de fabricación	Desintegración química

Tabla 3-5 Propiedades de los nanodiamantes SDND (basado en: [57])

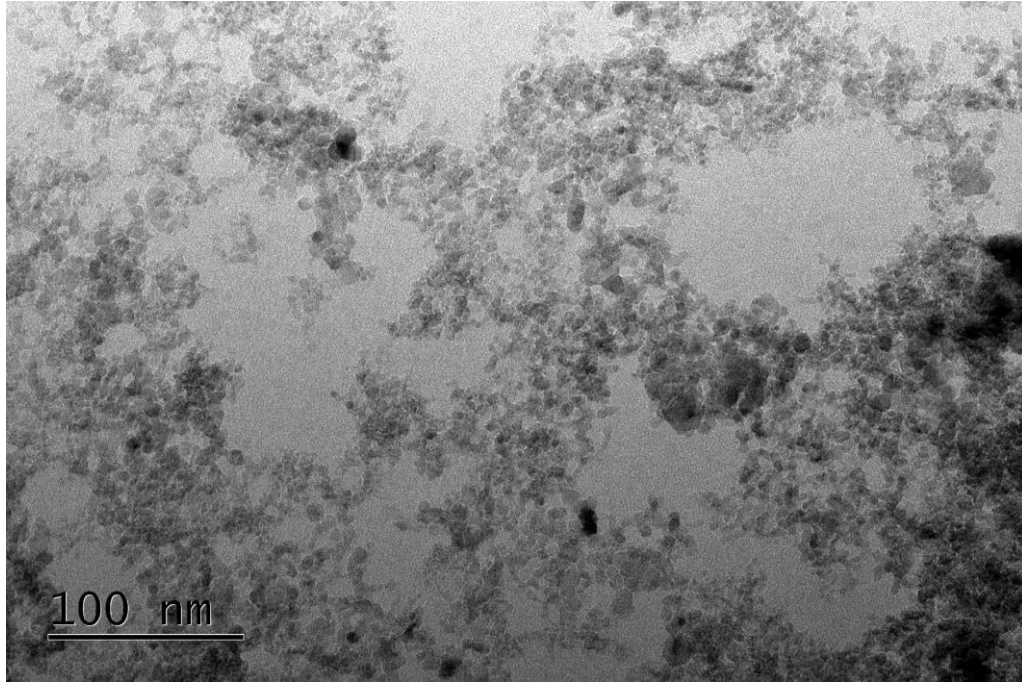


Figura 3-18 Microscopía electrónica de transmisión de las nanopartículas de diamante [48]

■ *Propiedades termofísicas*

Los valores de ρ , c_p , k y μ para cada nanofluido (nf) se han calculado a partir de modelos ampliamente utilizados en la literatura [58], [59]. Estas ecuaciones se basan en las propiedades del fluido base (PG:A 20:80) y las nanopartículas (np):

$$\rho_{nf} = \phi_v \cdot \rho_{np} + (1 - \phi_v) \cdot \rho_{PG:A\ 20:80} \quad (9)$$

$$c_{p\ nf} = \phi_m \cdot c_{p\ np} + (1 - \phi_m) \cdot c_{p\ PG:A} \quad (10)$$

$$k_{nf} = (1 + 3 \cdot \phi_v) \cdot k_{PG:A\ 20:80} \quad (11)$$

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5 \cdot \phi_v) \cdot \mu_{PG:A\ 20:80} \quad (12)$$

Donde:

- ϕ_v : Fracción volumétrica de nanopartículas
- ϕ_m : Fracción másica de nanopartículas

Las propiedades del fluido base a la temperatura correspondiente se han obtenido de las anteriores ecuaciones (5)-(9). En cuanto a las propiedades de las nanopartículas de diamante, se han usado valores de $\rho_{np} = 3500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y $c_{p\ np} = 575\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Este valor de la densidad se ha utilizado también para calcular las fracciones volumétricas, ϕ_v , de los nanofluidos 0,05% y 0,1% en masa. Las fracciones volumétricas resultantes son 0,00014 y 0,00029 respectivamente.

Cabe destacar que las concentraciones de nanopartículas utilizadas en este trabajo son muy bajas, por lo que las propiedades termofísicas de los nanofluidos son muy similares a las de la mezcla base PG:A 20:80. En este trabajo se pretende mejorar la capacidad de absorción del fluido sin alterar prácticamente sus propiedades fundamentales.

3.3 Procedimiento experimental

A continuación, se describe el procedimiento experimental para la realización de los ensayos en el banco previamente descrito. Los ensayos realizados tienen como finalidad estudiar la variación de los siguientes parámetros, en función del fluido de trabajo utilizado:

- Calor absorbido en el colector solar.
- Coeficientes de convección en el interior del intercambiador helicoidal.
- Parámetros adimensionales de transferencia de calor

3.3.1 Llenado del circuito con fluido térmico y verificación de su funcionamiento

Inicialmente el circuito hidráulico se encontrará vacío, los pasos a seguir para su llenado son:

1. Conexión de la adquisición de datos y verificación de la correcta lectura de los sensores de temperatura y caudal. Una vez verificada, por seguridad, desconectar de la corriente para evitar incidentes en caso de fugas durante el proceso de llenado.

Conexión de la bomba de llenado, siguiendo el montaje de la

2. Figura 3-19.
3. Arranque de la bomba de llenado. El aumento de la presión en el circuito debe ser progresivo, para ello se cerrará la válvula de circulación del circuito y se abrirá la descarga del circuito, la recirculación de la bomba y la válvula del purgador para evitar la formación de burbujas.
4. Una vez alcanzada una presión de ≈ 2 bar, se abrirá la válvula de circulación del circuito, se cerrarán descarga y recirculación y se apagará la bomba de simultáneamente.
5. Una vez que el circuito se encuentre cargado, se verificará que no existen burbujas de aire en su interior, y se cerrará la válvula del purgador de aire.

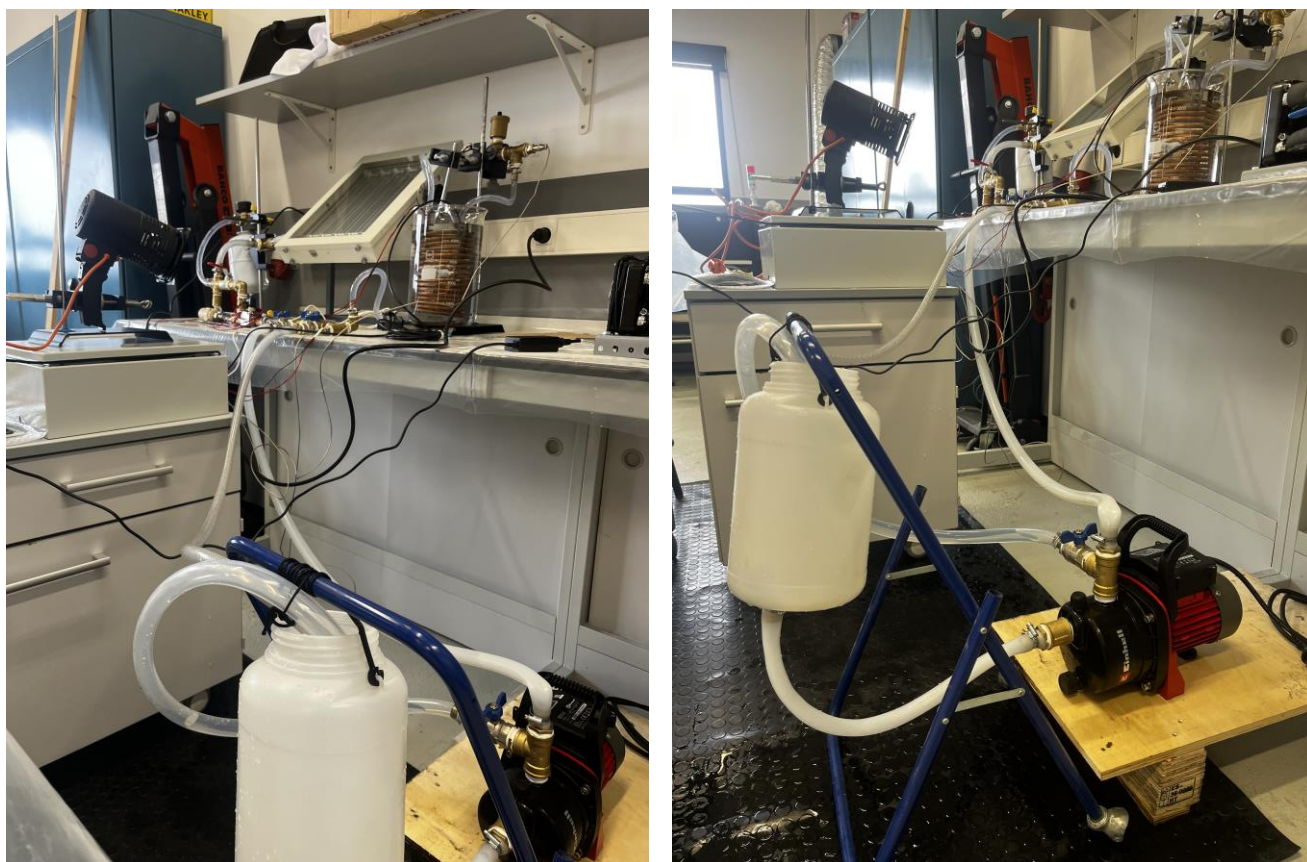


Figura 3-19 Montaje del sistema de llenado (elaboración propia)

3.3.2 Realización del experimento y recogida de datos

Con el circuito hidráulico lleno y verificado, se procederá con la realización del ensayo:

1. Reconexión de la tarjeta de adquisición de datos, verificación de temperaturas en el interior del circuito. Deben de ser coherentes con las condiciones iniciales.
2. Ubicación y encendido del foco. Se situará a 0,7 m y de manera perpendicular al panel solar.
3. Encendido del foco y arranque de la bomba de circulación del circuito con un caudal inicial.
4. Llenado del depósito con agua a temperatura ambiente.
5. En este punto se observará cómo las temperaturas comienzan a aumentar. Se dejará la bomba del circuito en funcionamiento, hasta alcanzar el estado estacionario; es decir, el momento en el que todas las temperaturas permanezcan relativamente constantes (ver Figura 3-20). Este tiempo de espera va a depender tanto del caudal como del fluido utilizados, siendo menor cuanto mayor sea el caudal.
6. Para cada fluido de trabajo se realiza la recogida de datos durante 5 min, realizando un total de 300 lecturas. Para todos los fluidos utilizados, se han analizado los siguientes caudales:
 - 40 L/h
 - 60 L/h
 - 80 L/h
 - 100 L/h

Entre cada caudal es necesario esperar hasta que se alcance de nuevo el estado estacionario, antes de proceder con el guardado de datos.

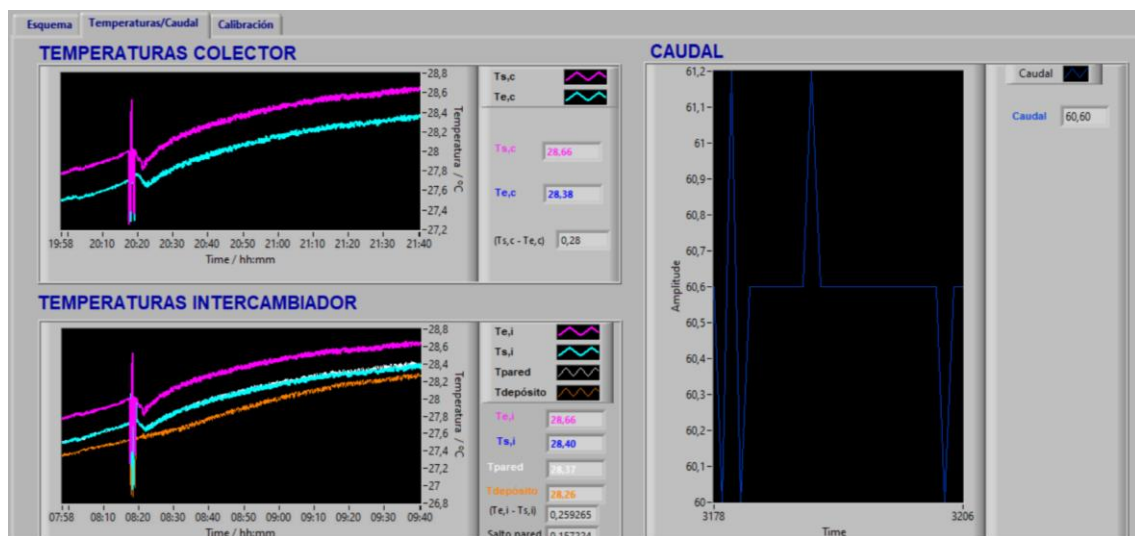


Figura 3-20 Alcance del estado estacionario durante el ensayo con PG:A (elaboración propia)

3.3.3 Vaciado del fluido térmico y mantenimiento del circuito

Para proceder con el vaciado del circuito es necesario abrir la válvula de vaciado situada en el baipás. Sin embargo, debido a que la diferencia de altura es pequeña, es probable que parte del fluido de trabajo se quede almacenado en el panel solar de tubos, en el intercambiador de calor helicoidal y en los codos de las mangueras del circuito. Es recomendable desconectar ciertos componentes del circuito y realizar una limpieza exhaustiva de los mismos, para evitar que una exposición prolongada produzca corrosión y daños.

3.4 Análisis de datos

En este apartado se describirán los principios teóricos y las ecuaciones utilizadas para el análisis de los resultados, así como la elaboración de conclusiones.

3.4.1 Calor absorbido en el colector y calor cedido en el intercambiador

La Ec. 1 se utiliza para calcular calor absorbido en el colector solar, Q_c :

$$Q_c = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot (T_{sc} - T_{ec}) \quad (13)$$

La Ec. 2, se utiliza para calcular el calor cedido en el intercambiador de calor, Q_i :

$$Q_i = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot (T_{si} - T_{ei}) \quad (14)$$

Donde:

- Q_c : Calor absorbido en el colector [W]
- Q_i : Calor cedido en el intercambiador [W]
- ρ : Densidad [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
- $\dot{V}$: Caudal [m^3/s]
- c_p : capacidad calorífica específica [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
- T_{ec} : Temperatura a la entrada del colector [K]
- T_{sc} : Temperaturas a la salida del colector [K]
- T_{ei} : Temperaturas a la entrada del intercambiador [K]
- T_{si} : Temperaturas a la salida del intercambiador [K]

3.4.2 Coeficiente de convección experimental en el interior del intercambiador

El coeficiente de convección en el interior del intercambiador, h_{int} , se calculará por el método de las resistencias térmicas. Para ello, es necesario obtener inicialmente el coeficiente global de transferencia de calor, U , que hace referencia al proceso de transferencia de calor en el intercambiador:

$$U = \frac{Q_i}{A_i \cdot LMTD} \quad (15)$$

$$LMTD = \frac{(T_{ei} - T_d) - (T_{si} - T_d)}{\ln \left(\frac{T_{ei} - T_d}{T_{si} - T_d} \right)} \quad (16)$$

Donde:

- U : Coeficiente global de transferencia de calor [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
- A_i : Área del intercambiador [m^2]
- LMTD: Diferencia de temperaturas media logarítmica (ver Figura 3-21)
- T_d : Temperatura del agua del depósito [K]

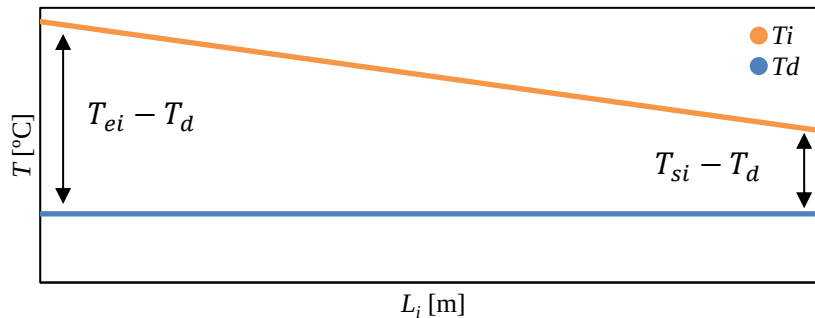


Figura 3-21 Variación de la temperatura del fluido caloportador a su paso por el intercambiador y del agua del depósito en función de la longitud del intercambiador (elaboración propia)

Como se muestra en la Figura 3-22, el proceso global de transferencia de calor incluye:

- Convección interior (fluido de trabajo - intercambiador de calor)
- Conducción material (pared del intercambiador, cobre en este caso)
- Convección exterior (intercambiador de calor - agua del depósito)

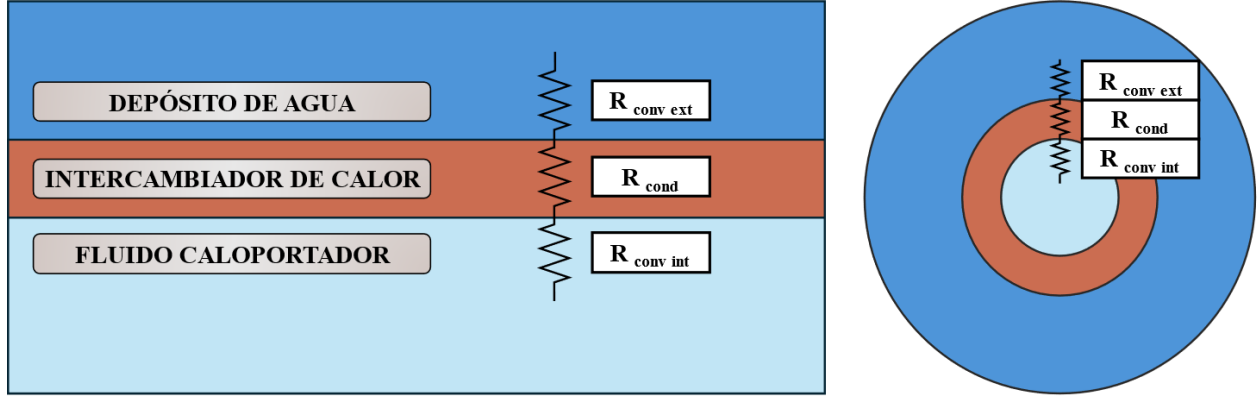


Figura 3-22 Proceso de transferencia de calor en el intercambiador (elaboración propia)

Así, según el modelo de las resistencias térmicas [60], [61]:

$$R_{total} = R_{conv\ int} + R_{cond} + R_{conv\ ext} \quad (17)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{d_{ext}}{d_{int} \cdot h_{int}} + \frac{d_{ext} \cdot \ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{int}}\right)}{k_p} + \frac{1}{h_{ext}} \quad (18)$$

Donde:

- R_{tot} : Resistencia térmica total [$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$]
- $R_{conv\ int}$: Resistencia térmica de convección en el interior del intercambiador [$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$]
- R_{cond} : Resistencia térmica de conducción a través de la pared [$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$]
- $R_{conv\ ext}$: Resistencia térmica de convección en el exterior del intercambiador [$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$]
- d_{int} : Diámetro interior del intercambiador [m]
- d_{ext} : Diámetro exterior del intercambiador [m]
- h_{int} : Coeficiente de convección experimental en el interior del intercambiador [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
- h_{ext} : Coeficiente de convección en el exterior del intercambiador [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
- k_p : Conductividad térmica de la pared del intercambiador [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

Por tanto, el coeficiente h_{int} se puede despejar como:

$$h_{int} = \frac{d_{ext}}{d_{int} \cdot \left(\frac{1}{U} - \frac{d_{ext} \cdot \ln\left(\frac{d_{ext}}{d_{int}}\right)}{k} - \frac{1}{h_{ext}} \right)} \quad (19)$$

Donde el coeficiente de convección en el exterior del intercambiador, h_{ext} , se calcula como [60], [61]:

$$h_{ext} = \frac{Q_i}{(T_d - T_{pi}) \cdot A_i} \quad (20)$$

3.4.3 Números adimensionales experimentales en el intercambiador

▪ 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:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_{int}}{\mu} \quad (21)$$

Siendo:

$$v = \frac{\dot{V}}{A_{sec\ i}} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} \cdot d_{int}^2} \quad (22)$$

Donde:

- v : Velocidad del fluido (m/s).
- μ : Viscosidad dinámica (Pa·s).
- $A_{sec, i}$: Área de la sección interna del intercambiador de calor (m²).

Para una tubería rectilínea el régimen de un fluido en función del número de Reynolds puede ser: laminar ($Re \leq 2300$), transitorio ($2300 < Re \leq 22000$) o turbulento ($Re > 22000$). Sin embargo, para intercambiadores de calor helicoidales el régimen laminar se extiende hasta un número de Reynolds crítico, Re_{crit} , que se calcula según la ecuación [62]:

$$Re_{crit} = 2300 \left[1 + 8,6 \left(\frac{d_{int}}{D} \right)^{0,45} \right] \quad (23)$$

Donde:

- D : Diámetro del intercambiador [m]

Por tanto, los regímenes de movimiento en los que se encuentra el fluido se clasifican como:

- $Re \leq Re_{crit}$: Régimen laminar
- $Re_{crit} < Re \leq 22000$: Régimen transitorio
- $Re > 22000$: Régimen turbulento

▪ Número de Nusselt

El número de Nusselt, Nu , es un parámetro adimensional que proporciona la relación entre la transferencia de por convección y por conducción. Se calcula según la ecuación:

$$Nu = \frac{h_{i\ exp} \cdot d_{int}}{k} \quad (24)$$

▪ Número de Prandtl

El número de Prandtl, Pr es un parámetro adimensional que proporciona la relación entre la viscosidad y la difusividad térmica de un fluido; es decir, la capacidad de movimiento de este frente a su capacidad de transferir calor. Se calcula según la ecuación:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad (25)$$

3.4.4 Determinación del coeficiente de convección interior teórico

Previamente se tiene que determinar el régimen en el que se está realizando el ensayo, cálculo del número de Reynolds Ec. 8. Una vez conocido se calcula el número de Nusselt, en función del régimen:

- Para régimen laminar, utilizar Ec.12 y Ec. 13.
- Para régimen transitorio, utilizar Ec. 13 y Ec.14.
- Para régimen turbulento, utilizar Ec. 15 y Ec. 16.

▪ Régimen laminar ($Re < Re_{crit}$)

$$Nu_{teo} = 3,66 + 0,08 \left[1 + 0,8 \left(\frac{d_{int}}{D} \right)^{0,9} \right] Re^m \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,14} \quad (26)$$

$$m = 0,5 + 0,2903 \left(\frac{d_{int}}{D} \right)^{0,194} \quad (27)$$

▪ Régimen transitorio ($Re_{crit} < Re \leq 22000$)

$$Nu_{teo} = \gamma \cdot Nu_{Re=Recrit} + (1 - \gamma) \cdot Nu_{turb, Re=22000} \quad (28)$$

$$a = \frac{22000 - Re}{2200 - Re_{crit}} \quad (29)$$

Donde:

- $Nu_{Re=Recrit}$: Se calcula con la Ec. 26 utilizando en Re el valor del Re_{crit} , $Nu (Re_{crit})$
- $Nu_{turb, Re=22000}$: Se calcular con la Ec. 26 sustituyendo Re por 22000, $Nu (Re = 22000)$

▪ Régimen turbulento ($Re > 22000$)

Utilizando la Ec. 14 y la Ec. 15:

$$Nu_{teo} = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,14} \quad (30)$$

$$\xi = \left[\frac{0,3164}{Re^{0,25}} + 0,03 \left(\frac{d_{int}}{d_{ext}} \right)^{0,5} \right] \left(\frac{\eta_w}{\eta} \right)^{0,14} \quad (31)$$

▪ Coeficiente de convección teórico

Finalmente, el coeficiente de convección teórico, $h_{int\ teo}$, se calcula a partir de la definición genérica del Número de Nusselt:

$$h_{int\ teo} = \frac{Nu_{teo} \cdot k}{d_{int\ i}} \quad (32)$$

4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

4.1 Validación de los resultados obtenidos

Con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del banco de ensayos y del procedimiento experimental se realizaron diversas comprobaciones con fluidos convencionales (agua y PG:A 20:80).

4.1.1 Validación de la calibración de los sensores de temperatura

La lectura de los 5 sensores de temperatura fue sometida a un proceso de calibración inicial, según se describe en el apartado 0, ajustando el “zero” y el “span” de la recta de conversión del correspondiente conversor para que el valor de 100 Ω se corresponda con 4 mA y el valor de 140 Ω se corresponda con 20 mA. Como resultado de este proceso, todos los sensores deberían devolver el mismo valor para una misma temperatura. Para comprobarlo, se realizó un ensayo con agua en el que, tras el llenado del circuito hidráulico, se dejó que esta alcanzara el estado estacionario sin el foco de luz ni la bomba circuladora en funcionamiento (ver Figura 4-1).

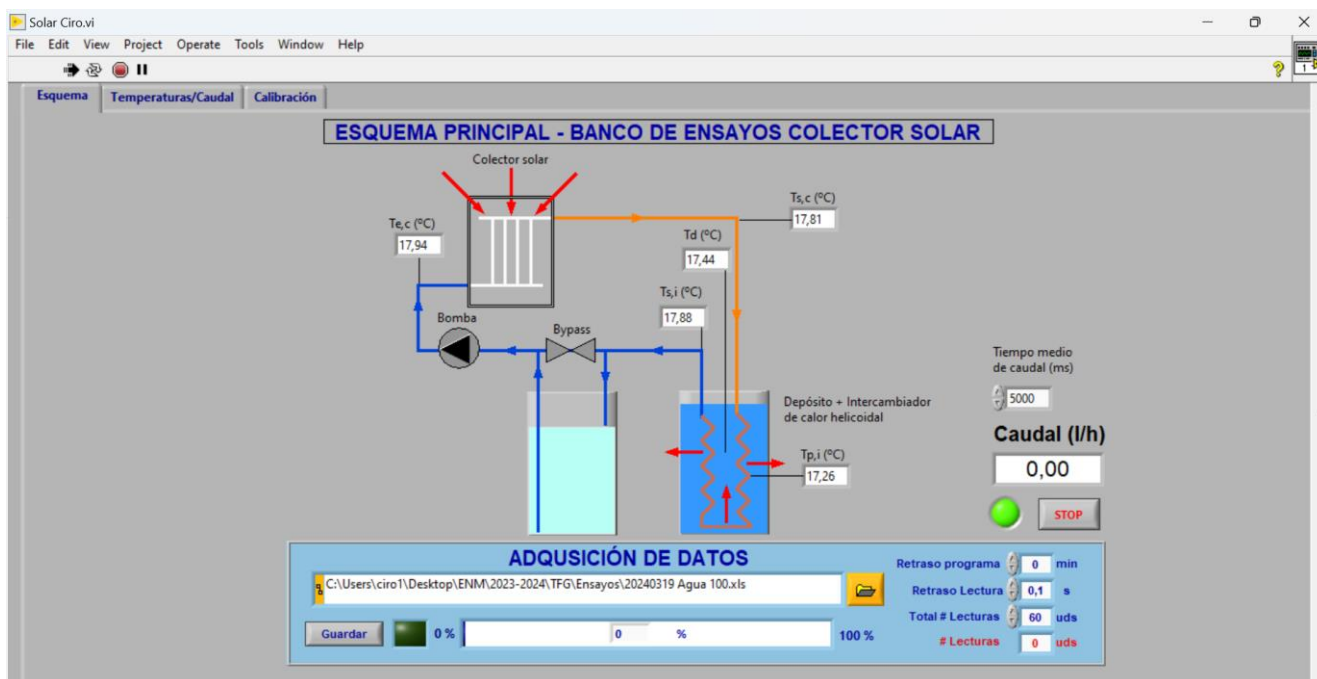


Figura 4-1 Estado del banco de ensayos al inicio de la verificación (elaboración propia)

En el estado inicial se detectaban mínimas diferencias entre las lecturas de los distintos sensores del circuito. Un sensor de temperatura Pt-100 Clase A como los de nuestra instalación presenta una precisión de $\pm 0,15$ °C $+0,2\% \cdot T$, por lo que para una lectura de 20 °C presentarían una precisión de aproximadamente $\pm 0,2$ °C. Por tanto, se puede concluir que los sensores del circuito hidráulico (T_{ec} , T_{sc}/T_{ei} y T_{si}) registraron temperaturas similares entre ellas con una diferencia de $\pm 0,13$ °C, inferior a la citada precisión de medida. Los sensores alejados (T_{pi} y T_d), registraban temperaturas ligeramente inferiores a los del circuito (debido al material del intercambiador y el intercambio del depósito con el ambiente), pero que resultaban lógicos para un sistema en equilibrio.

Tras esta comprobación, se puso en funcionamiento la bomba de circulación del circuito con el fin de obtener una mayor homogeneidad de las temperaturas. Después de 20 min de funcionamiento, los sensores de temperaturas registraban los valores recogidos en la Figura 4-2.

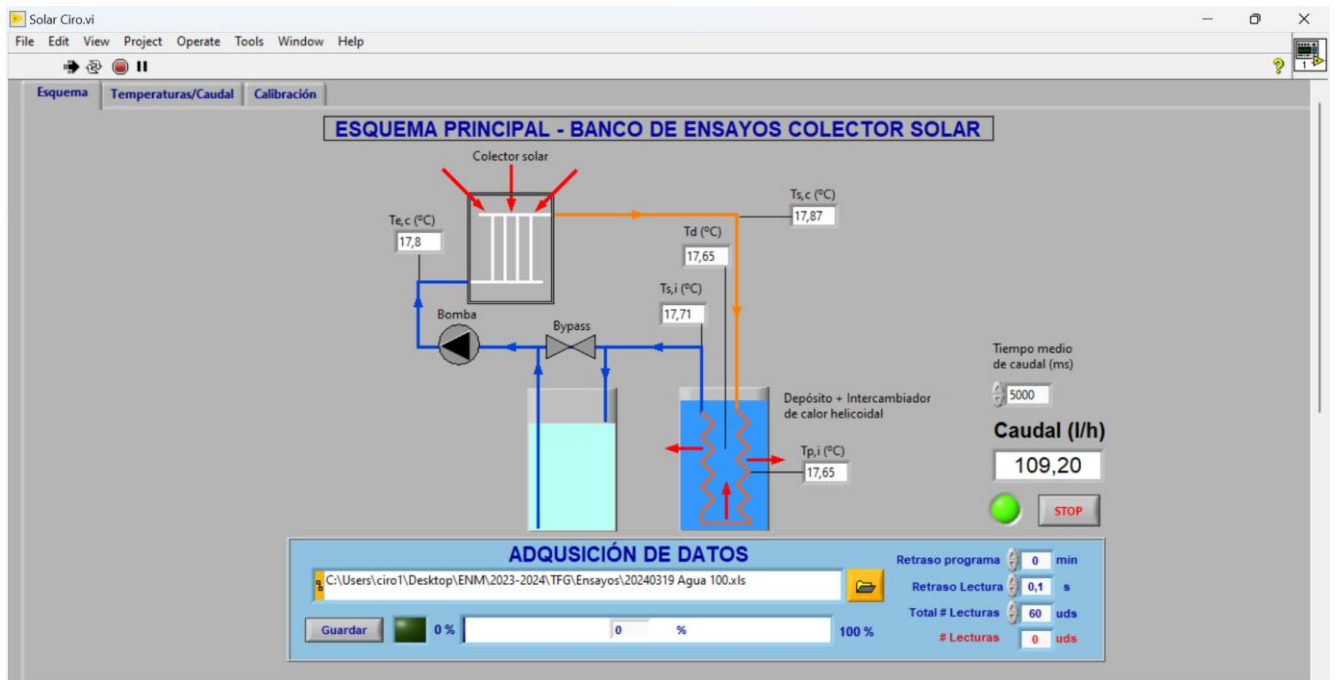


Figura 4-2 Estado del banco de ensayos al final de la verificación (elaboración propia)

En este caso, las temperaturas que anteriormente eran más bajas (T_{pi} y T_d), tienden a igualarse con el resto del circuito por el proceso de convección forzada en el interior del intercambiador. La discrepancia entre la temperatura más alta y la más baja registradas es ahora de 0,22 °C, un valor prácticamente idéntico al de la precisión de las medidas.

En conclusión, la toma de datos con la calibración actual de los sensores se considera adecuada para la realización de los experimentos.

4.1.2 Comprobación de balances energéticos

En nuestro banco de ensayos, idealmente se debe cumplir en cualquier ensayo que el valor absoluto del calor absorbido en el colector, Eq. (13), es igual al cedido en el intercambiador, Eq. (14), o de forma análoga $Q_c = -Q_i$. La Figura 4-3 muestra la comparativa de ambos valores para todos los ensayos con los fluidos convencionales (agua y PG:A 20:80).

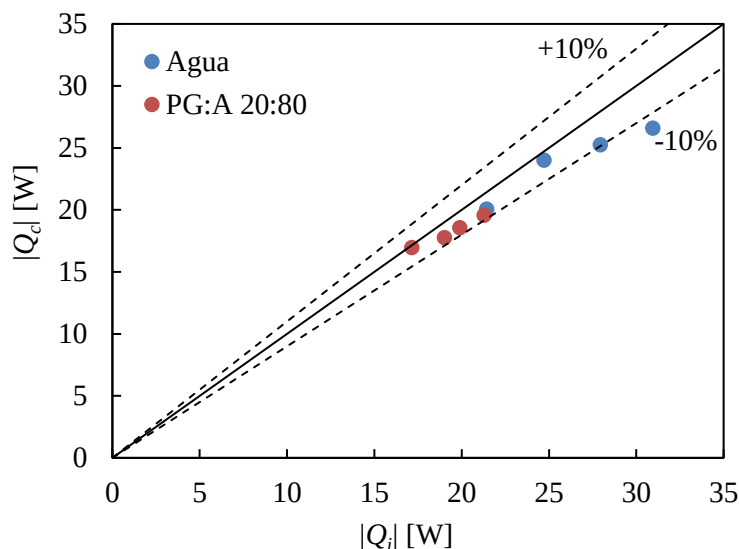


Figura 4-3 Análisis de la discrepancia entre el calor absorbido por el colector y el calor cedido en el intercambiador (elaboración propia)

Como se puede observar, las discrepancias entre el calor absorbido y cedido se encuentran mayoritariamente por debajo del 10%. En todos los casos el calor cedido se encuentra por debajo del calor absorbido, en promedio un 8,2% para el agua y un 5,6 % para el PG:A.

Estas pequeñas discrepancias se pueden atribuir a la falta de aislamiento entre las tuberías de conexión y el depósito de agua con el exterior. Se puede asumir que estas discrepancias se deben a las pérdidas de calor al ambiente.

4.1.3 Validación del método de análisis de los datos experimentales

Como último aspecto de comprobación, se han comparado los coeficientes de convección experimentales, obtenidos de acuerdo a lo descrito en el apartado 0, con los coeficientes de convección teóricos que predicen los conocidos modelos de Gnielinski para tubos helicoidales [62], obtenidos de acuerdo a lo descrito en el apartado 3.4.4, para los fluidos a los que les resulta de aplicación: el agua y la mezcla PG:A 20:80. La Figura 4-4 muestra la comparativa de ambos valor para todos los ensayos con los fluidos convencionales.

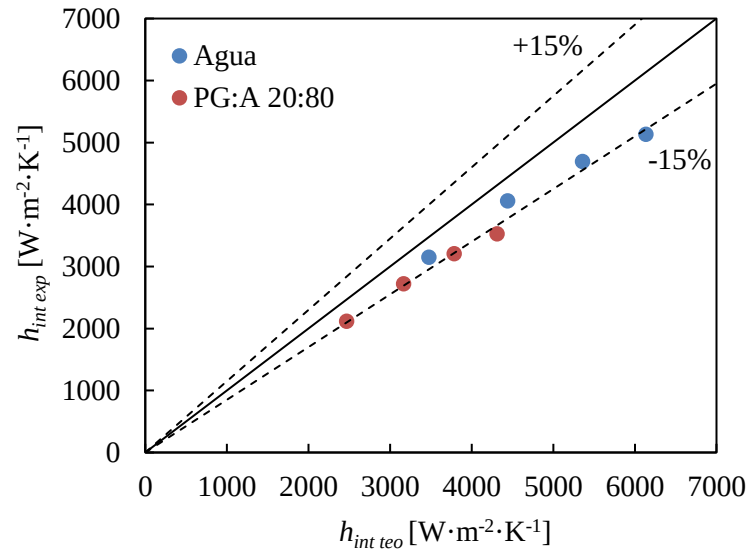


Figura 4-4 Coeficiente de convección experimental en función del teórico (elaboración propia)

En este caso se puede observar que las discrepancias entre el coeficiente de convección experimental y el teórico se encuentran mayoritariamente por debajo del 15%. Además, se aprecia que el valor experimental obtenido se encuentra por debajo del teórico, en promedio un 12% para el agua y un 15% para el PG:A.

Estas discrepancias se encuentran dentro del margen de error para este tipo de determinaciones experimentales [63], por lo que se pueden dar por válidos los resultados de coeficientes obtenidos del banco.

4.2 Análisis de los datos experimentales

4.2.1 Calor absorbido en el colector solar de absorción directa

El gráfico de la Figura 4-5 representa los resultados obtenidos tras analizar el calor absorbido en el colector solar, en función de los diferentes caudales y fluidos utilizados durante los 16 ensayos:

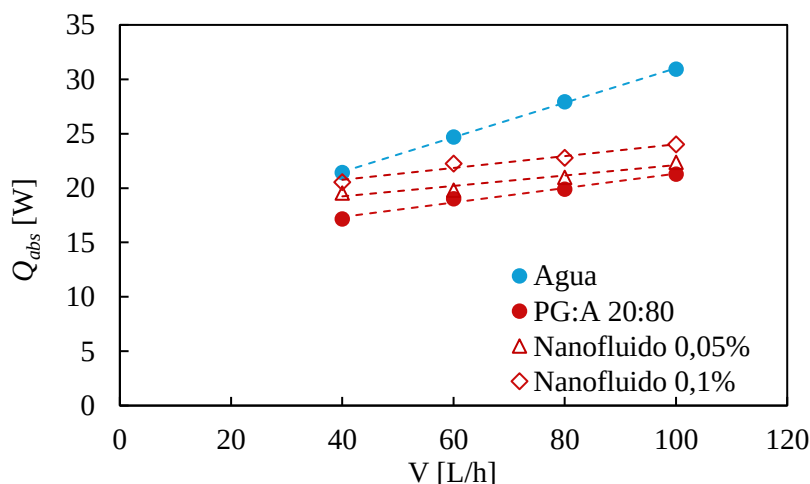


Figura 4-5 Calor absorbido en el colector en función del caudal para los fluidos analizados (elaboración propia)

En primer lugar, se puede observar que para todos los fluidos analizados el calor absorbido en el colector se incrementa con el caudal. Estos incrementos del calor absorbido por el aumento de caudal entre 40 y 100 L/h son del 45% para el agua y del 15-25% para el PG:A y los nanofluidos.

Si comparamos los fluidos analizados entre sí, se puede apreciar, como se comentaba en el apartado 2.4.1, que el agua es el fluido térmico que absorbe más calor, debido a que es el fluido convencional con mejores propiedades térmicas. Su gran capacidad de absorción de calor se debe a su alta conductividad térmica y su baja viscosidad. Por otro lado, se aprecia que la mezcla PG:A 20:80 presenta, en promedio, unos calores absorbidos un 30% menores a los del agua. A cambio de esta pérdida en la eficiencia de absorción, se consigue una menor temperatura de fusión, como se ha comentado en el apartado 2.4.1.

Si ponemos el foco ahora en los nanofluidos de nanodiamantes y su comparativa con su fluido base (PG:A 20:80), ver Figura 4-6, se observan mejoras promedio del 7,2% y del 16% para las concentraciones 0,05% y 0,1%, respectivamente. Estas mejoras son especialmente relevantes, ya que se consiguen con cantidades muy pequeñas de nanopartículas y sin alterar prácticamente las propiedades termofísicas del fluido original. Por tanto, se puede atribuir esta mejora íntegramente al oscurecimiento del fluido y su mayor capacidad de absorción de luz. Esto implica que la principal causa de este incremento es el oscurecimiento del fluido, y que los nuevos fluidos no supondrán mayores potencias de bombeo, ya que la viscosidad no se ha visto prácticamente alterada.

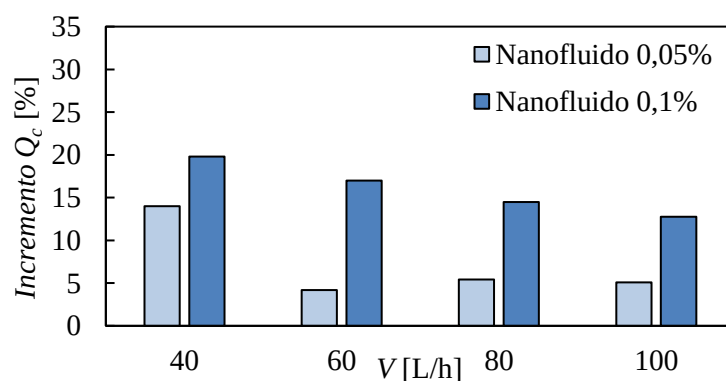


Figura 4-6 Incremento del calor absorbido por los nanofluidos con respecto al PG:A 20:80 en función del caudal utilizado (elaboración propia)

4.2.2 Coeficiente de convección en el interior del intercambiador

El gráfico de la Figura 4-7 representa los resultados de los cálculos obtenidos tras calcular el coeficiente de convección en el interior del intercambiador de calor helicoidal; es decir, el calor transferido por convección del fluido de trabajo a la pared interior del intercambiador, en función de los diferentes caudales y fluidos utilizados durante los ensayos:

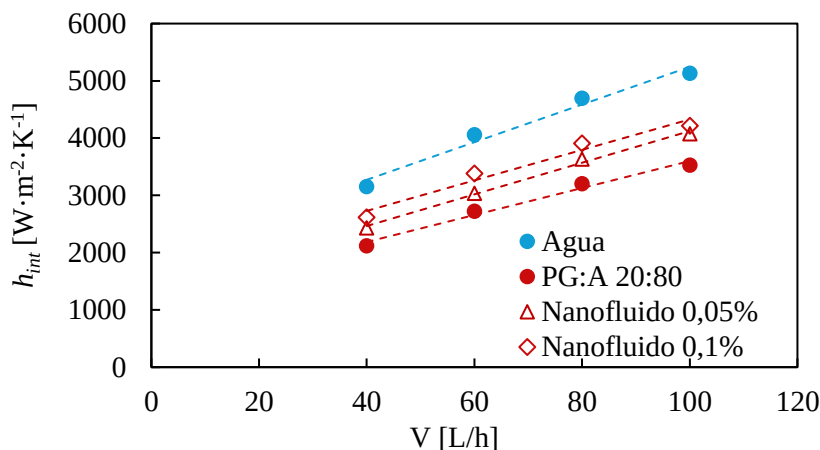


Figura 4-7 Coeficientes de convección en el intercambiador en función del caudal para los fluidos analizados (elaboración propia)

En primer lugar, se puede observar que para todos los fluidos analizados el coeficiente de convección se incrementa con el aumento del caudal. Esto resulta coherente, ya que, por definición, la convección es el transporte de calor debido al movimiento del fluido. Por tanto, cuanto mayor sea velocidad del fluido, mayor será el fenómeno convectivo. Estos incrementos del coeficiente de convección por el aumento de caudal entre 40 y 100 L/h son del 60-70% para todos los fluidos.

Comparando los fluidos analizados entre sí, se aprecia también, como se comentaba en el apartado 2.4.1, que el agua vuelve a ser el fluido térmico convencional con mejores resultados, ya que presenta las mejores propiedades termofísicas. Por otro lado, se aprecia que la mezcla PG:A 20:80 presenta, en promedio, coeficientes de convección un 33% menores que el agua. Esta disminución se debe a su menor conductividad térmica y su mayor viscosidad dinámica. Como se ha comentado, esta disminución de la transferencia de calor se produce a cambio de un mayor rango de temperaturas de trabajo.

Poniendo el foco en los nanofluidos y su comparativa con el fluido base (ver Figura 4-8), se pueden observar mejoras promedio del 14% y del 22% para las concentraciones 0,05% y 0,1%, respectivamente. Al igual que en el apartado anterior, es relevante que se consigan mejoras con concentraciones tan pequeñas de nanopartículas, ya que estas prácticamente no modifican las propiedades termofísicas del fluido base. La mejora en el fenómeno de convección podría explicarse en este caso por el propio efecto del movimiento y choques de las nanopartículas en el interior del fluido.

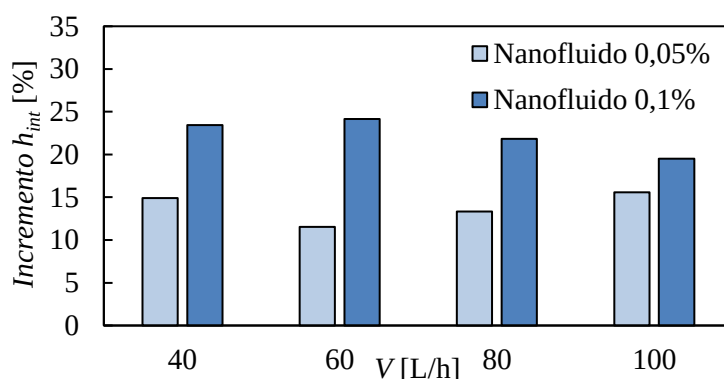


Figura 4-8 Incremento del coeficiente de convección de los nanofluidos respecto a PG:A 20: 80 en función del caudal utilizado (elaboración propia)

4.2.3 Resultados adimensionales

Los resultados previamente presentados sobre el rendimiento de convección son aplicables al intercambiador de calor helicoidal de este trabajo. Un análisis adimensional de los datos en función del número de Nusselt y Reynolds permite la extrapolación de estos resultados a otras aplicaciones. La Figura 4-9 muestra la relación entre el número de Nusselt y el número de Reynolds para todos los fluidos utilizados y ensayos realizados.

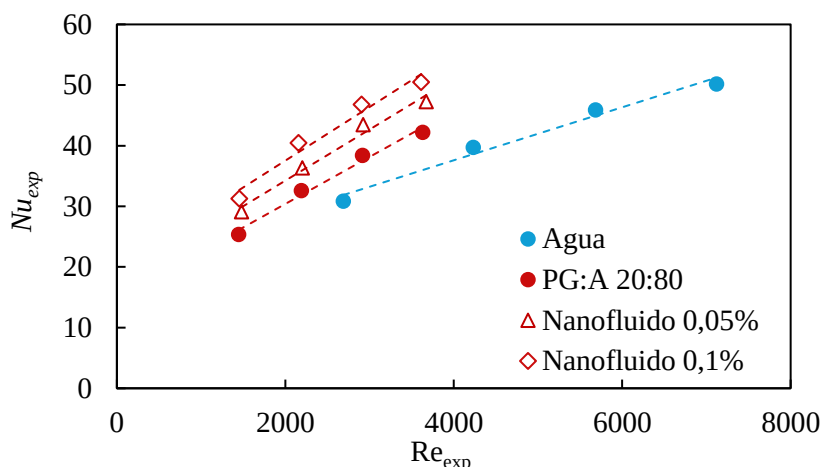


Figura 4-9 Número de Nusselt en función del número de Reynolds para los fluidos analizados (elaboración propia)

En primer lugar, se puede observar que para todos los fluidos analizados el número de Nusselt aumenta paulatinamente con el número de Reynolds. El número de Reynolds es consecuencia directa del caudal y de la viscosidad del fluido. Si se comparan los efectos del incremento del número de Reynolds en el número de Nusselt para PG:A 20:80 y los nanofluidos 0,05% y 0,01%, se puede observar un incremento promedio del 40% en Nu por aumento de Re entre 1400 y 3600.

Como se comentaba en el apartado anterior, la adición de nanopartículas no altera las propiedades termofísicas del fluido base, por lo que los números de Reynolds obtenidos para estos fluidos son similares para un mismo caudal. Sin embargo, sí se observan incrementos sustanciales en cuanto al número de Nusselt a medida que aumenta la concentración de nanopartículas. Como se muestra en la Figura 4-10, se puede observar un incremento promedio del 12% y del 22% con respecto al PG:A para las concentraciones 0,05% y 0,01% de nanodiamantes, respectivamente. Esto resulta relevante dada la baja de concentración de nanopartículas. Este incremento del número de Nusselt sin modificaciones relevantes en la conductividad térmica, se debe principalmente a la mejora del coeficiente de convección ocasionado por la utilización de nanopartículas.

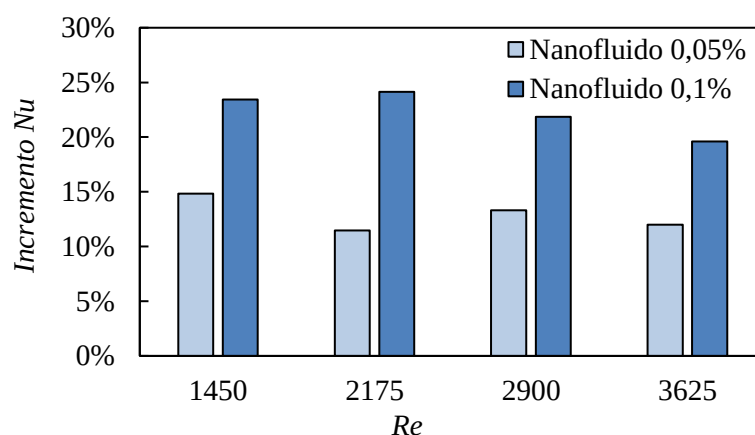


Figura 4-10 Incremento del número de Nusselt de los nanofluidos respecto a PG:A 20: 80 en función del número de Reynolds (elaboración propia)

4.3 Correlación para el número de Nusselt

Para la familia de nanofluidos “Nanodiamantes + PG:A 20:80” se ha propuesto una correlación que relaciona el número de Nusselt, Nu , con el número de Reynolds, Re , y de la fracción volumétrica, ϕ_v , de acuerdo con la siguiente estructura:

$$Nu = c_1 \cdot (1 + 100 \cdot \phi_v)^{c_2} \cdot Re^{c_3} \quad (33)$$

Para obtener los coeficientes de correlación c_1 , c_2 y c_3 se han utilizados métodos iterativos mediante el módulo “Solver” de *Microsoft Excel*, con el fin de minimizar la desviación promedio respecto a los valores experimentales, con el siguiente resultado:

$$Nu = 0,490 \cdot (1 + 100 \cdot \phi_v)^{7,410} \cdot Re^{0,545} \quad (34)$$

Esta correlación se considera apropiada para predecir el comportamiento de la familia de nanofluidos dentro del rango de valores utilizados en el presente trabajo:

- $0 < \phi_v < 0,000295$
- $1400 < Re < 3700$

La Tabla 4-1 recogen los valores de las desviaciones asociadas a la comparación entre los resultados obtenidos de las correlaciones con los datos experimentales. Como se puede observar, la desviación relativa media alcanza un valor inferior al 1,5%, por lo que se concluye la validez del modelo.

Desviación absoluta máxima	2,1
Desviación absoluta media	0,61
Desviación estándar	0,96
Desviación relativa media [%]	1,4%

Tabla 4-1 Desviaciones entre los valores de Nu obtenidos mediante la correlación (Ec. 34) y los experimentales (elaboración propia)

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Este trabajo pretende el montaje, validación y puesta a punto de un banco de ensayos centrado en un colector solar de absorción directa de tubos de metacrilato y su posterior utilización para el análisis del rendimiento de distintos fluidos en los distintos procesos de transferencia de calor (radiación, convección). Se realizaron 16 ensayos, en los cuales se analizaron distintos fluidos: agua, una mezcla propilenglicol:agua 20:80 y dos nanofluidos de diamantes basados en la última mezcla.

Las conclusiones obtenidas tras la realización de los ensayos y el posterior análisis de resultados se dividen en 3 ámbitos: validación, ...

5.1.1 Validación

La validación del banco de ensayos y del método de cálculo se han podido confirmar de acuerdo con los siguientes resultados:

- La discrepancia entre los valores proporcionados por los sensores determinada en un ensayo de verificación con agua a temperatura homogénea es de 0,22 °C, un valor similar a la precisión de las medidas.
- La discrepancia entre calor absorbido en el colector solar y el calor cedido en el intercambiador de calor son del 8,2% para el agua y del 5,6% para el PG:A. Los resultados obtenidos son coherentes con la falta de aislamiento en las tuberías del circuito y con la discrepancia de los sensores.
- La discrepancia entre los coeficientes de convección experimentales y teóricos en el interior del intercambiador presentan valores promedio del 12% para el agua y del 15% para el PG:A. Estos resultados obtenidos son aceptables para un análisis experimental de estas características, de acuerdo con la literatura.

5.1.2 Análisis del rendimiento de transferencia de calor

Los ensayos de rendimiento de los distintos procesos de transferencia de calor (radiación, convección) con agua, la mezcla propilenglicol:agua 20:80 y dos nanofluidos de diamantes basados en esta última, han permitido obtener las siguientes conclusiones:

- Calor absorbido en el colector solar (radiación): El agua es el fluido térmico con mejor capacidad de absorción de calor, mientras que el PG:A tiene una capacidad un 30% menor. La adición de nanopartículas de diamante a la mezcla PG:A, mejora su eficiencia de absorción un 7,6% y un 16% para las fracciones másicas de nanopartículas 0,05% y 0,1%, respectivamente. Esta mejora es consecuencia del oscurecimiento del fluido base debido a la utilización de nanopartículas.
- Coeficientes en el intercambiador helicoidal (convección): El agua presenta los coeficientes de convección más altos, mientras que en el PG:A se reducen hasta un 33%. La dispersión de nanopartículas consigue mejoras de hasta el 14% y el 22% para las fracciones másicas de nanopartículas 0,05% y 0,1%, respectivamente. Estas mejoras se consiguen con propiedades termofísicas muy similares a las del fluido base, y son consecuencia directa de los choques y movimientos de las nanopartículas en el interior del intercambiador.

5.1.3 Análisis adimensional y correlaciones

Los resultados previos del rendimiento de convección son aplicables al intercambiador de calor helicoidal de este trabajo. Un análisis adimensional de los datos permite la extrapolación de resultados a otras aplicaciones. Se ha observado que la dispersión de nanodiamantes en PG:A consigue aumentar el número de Nusselt hasta un 11% y un 18% para las fracciones másicas de 0,05% y 0,1%, respectivamente.

Además, se ha propuesto una correlación que relaciona el número de Nusselt, Nu , con el número de Reynolds, Re , y de la fracción volumétrica, ϕ_v , para la familia de nanofluidos “Nanodiamantes + PG:A 20:80”, obteniendo el siguiente resultado:

$$Nu = 0,490 \cdot (1 + 100 \cdot \phi_v)^{7,410} \cdot Re^{0,545} \quad (35)$$

Esta correlación se considera apropiada para el rango de valores:

- $0 < \phi_v < 0,000295$
- $1400 < Re < 3700$

La desviación relativa media entre los valores que predice esta correlación y los experimentales alcanza un valor inferior al 1,5%.

5.2 Líneas futuras

Finalmente, como líneas futuras que permitan continuar el presente trabajo, se proponen las siguientes mejoras y ámbitos de experimentación:

- Mejora del control sobre la temperatura del depósito de agua caliente sanitaria.
- Mejora del aislamiento térmico de los componentes del circuito, en especial del soporte del panel solar y del depósito de agua caliente, para las pérdidas por convección con el exterior.
- Reducción del efecto de la radiación en el resto de los componentes del circuito hidráulico.
- Estudio del efecto de la cubierta en el calor absorbido (radiación).
- Comparación de la eficiencia térmica del colector volumétrico de absorción directa frente a un colector superficial de placa plana.
- Estudio del efecto de la modificación del material de los tubos del colector de absorción directa en la eficiencia de absorción. Por ejemplo, empleo de tubos de policarbonato en lugar de los de metacrilato.
- Estudio del efecto debido al aumento de la concentración de nanopartículas de diamante.
- Estudio de otros nanofluidos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Gadonneix, M.-J. Nadeau, Y. D. Kim, L. Birnbaum, H. Cho, y A. R. Choudhury, «Officers of the World Energy Council».
- [2] «Origen y evolución», Descubre La Energía. Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://descubrelaenergia.fundaciondescubre.es/sobre-la-energia/origen-y-evolucion/>
- [3] S. R. Paramati, U. Shahzad, y B. Doğan, «The role of environmental technology for energy demand and energy efficiency: Evidence from OECD countries», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 153, p. 111735, ene. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111735.
- [4] H. Ritchie, P. Rosado, y M. Roser, «Energy Production and Consumption», *Our World Data*, ene. 2024, Accedido: 17 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>
- [5] J. Hansen, M. Sato, y R. Ruedy, «Perception of climate change», *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 109, n.º 37, pp. E2415-E2423, sep. 2012, doi: 10.1073/pnas.1205276109.
- [6] E. Institute, «Home», Statistical review of world energy. Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.energyinst.org/statistical-review/home>
- [7] Y. Tian y C. Y. Zhao, «A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications», *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 538-553, abr. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.051.
- [8] «Global Energy Budget | Precipitation Education». Accedido: 23 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://gpm.nasa.gov/education/lesson-plans/global-energy-budget>
- [9] N. Kannan y D. Vakeesan, «Solar energy for future world: - A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1092-1105, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>.
- [10] F. Fraga, «Energías renovables: ¿la energía del futuro?», 2007. doi: 10.13140/2.1.4844.8324.
- [11] «Energía Solar Térmica de Concentración». Accedido: 22 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/csp_2009_spanish.pdf
- [12] P. G. V. Sampaio y M. O. A. González, «Photovoltaic solar energy: Conceptual framework», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, pp. 590-601, jul. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.081.
- [13] E. Mazria, «Passive Solar Energy Book», ene. 1979, Accedido: 23 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.osti.gov/biblio/5473955>
- [14] P. Littlefair, «Passive solar urban design: ensuring the penetration of solar energy into the city», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 2, n.º 3, pp. 303-326, sep. 1998, doi: 10.1016/S1364-0321(97)00009-9.
- [15] «Ventajas y desventajas de la energía solar: guía completa», Tectonic. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tectonic.es/energia-solar/ventajas-y-desventajas-de-la-energia-solar-guia-completa/>

- [16] J. Ham, Y. Shin, y H. Cho, «Comparison of thermal performance between a surface and a volumetric absorption solar collector using water and Fe₃O₄ nanofluid», *Energy*, vol. 239, p. 122282, ene. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122282.
- [17] Q. Li, C. Zheng, S. Mesgari, Y. L. Hewkuruppu, N. Hjerrild, F. Crisostomo, G. Rosengarten, J. A. Scott, R. A. Taylor, «Experimental and numerical investigation of volumetric versus surface solar absorbers for a concentrated solar thermal collector», *Sol. Energy*, vol. 136, pp. 349-364, oct. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.07.015.
- [18] N. Goel, R. A. Taylor, y 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, doi: 10.1016/j.renene.2019.06.097.
- [19] P. Phelan, T. Otanicar, R. Taylor, y H. Tyagi, «Trends and Opportunities in Direct-Absorption Solar Thermal Collectors», *J. Therm. Sci. Eng. Appl.*, vol. 5, n.º 021003, may. 2013, doi: 10.1115/1.4023930.
- [20] M. Khoukhi y S. Maruyama, «Theoretical approach of a flat plate solar collector with clear and low-iron glass covers taking into account the spectral absorption and emission within glass covers layer», *Renew. Energy*, vol. 30, n.º 8, pp. 1177-1194, jul. 2005, doi: 10.1016/j.renene.2004.09.014.
- [21] A. Shareef y M. Abood, «Experimental investigation on a flat plate solar collector using Al₂O₃ nanofluid as a heat transfer agent», *Int J Energy Env.*, vol. 6, n.º 4, pp. 317-330, ene. 2015.
- [22] A. Khelifa, K. Touafek, H. B. Moussa, I. Tabet, H. B. cheikh E. hocine, y H. Haloui, «Analysis of a Hybrid Solar Collector Photovoltaic Thermal (PVT)», *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 835-843, ago. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.819.
- [23] B. J. Huang, T. H. Lin, W. C. Hung, y F. S. Sun, «Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems», *Sol. Energy*, vol. 70, n.º 5, pp. 443-448, ene. 2001, doi: 10.1016/S0038-092X (00)00153-5.
- [24] B. Robles-Ocampo, E. Ruíz-Vasquez, H. Canseco-Sánchez, R. C. Cornejo-Meza, G. Trapaga, F. García-Rodríguez, J. González-Hernández, Y. Vorobiev, «Photovoltaic/thermal solar hybrid system with bifacial PV module and transparent plane collector», *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 91, pp. 1966-1971, dic. 2007, doi: 10.1016/j.solmat.2007.08.005.
- [25] X. Wei, Z. Lu, Z. Wang, W. Yu, H. Zhang, y Z. Yao, «A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant», *Renew. Energy*, vol. 35, n.º 9, pp. 1970-1975, sep. 2010, doi: 10.1016/j.renene.2010.01.026.
- [26] «Heliostats - an overview | ScienceDirect Topics». Accedido: 25 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/heliostats>
- [27] Y. Zhang, B. Lin, y J. Chen, «Optimum performance characteristics of an irreversible solar-driven Brayton heat engine at the maximum overall efficiency», *Renew. Energy*, vol. 32, n.º 5, pp. 856-867, abr. 2007, doi: 10.1016/j.renene.2006.02.008.
- [28] A. R. Tavakolpour, A. Zomorodian, y A. Akbar Golneshan, «Simulation, construction and testing of a two-cylinder solar Stirling engine powered by a flat-plate solar collector without regenerator», *Renew. Energy*, vol. 33, n.º 1, pp. 77-87, ene. 2008, doi: 10.1016/j.renene.2007.03.004.
- [29] «Parabolic Dish - an overview | ScienceDirect Topics». Accedido: 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/parabolic-dish>
- [30] H. Olia, A. Torabi, M. Bahræi, M. Ahmadi, M. Goodarzi, y M. R. Safaei, «Application of Nanofluids in Thermal Performance Enhancement of Parabolic Trough Solar Collector: State-of-the-Art», *Appl. Sci.*, vol. 9, p. 463, ene. 2019, doi: 10.3390/app9030463.
- [31] «Canal Parabólico y Fresnel». Accedido: 25 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://concentrationsolar.org.mx/concentracion-solar/canal-parabolico-y-fresnel>
- [32] J. E. Minardi y H. N. Chuang, «Performance of a “black” liquid flat-plate solar collector», *Sol. Energy*, vol. 17, n.º 3, pp. 179-183, jul. 1975, doi: 10.1016/0038-092X (75)90057-2.

- [33] T. B. Gorji y A. A. Ranjbar, «A review on optical properties and application of nanofluids in direct absorption solar collectors (DASCs)», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 10-32, may. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.015.
- [34] M. Karami, M. Bozorgi, y S. Delfani, «Effect of design and operating parameters on thermal performance of low-temperature direct absorption solar collectors: a review», *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 146, n.º 3, pp. 993-1013, nov. 2021, doi: 10.1007/s10973-020-10043-z.
- [35] V. Bhalla, V. Khullar, y H. Tyagi, «Investigation of factors influencing the performance of nanofluid-based direct absorption solar collector using Taguchi method», *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 135, n.º 2, pp. 1493-1505, ene. 2019, doi: 10.1007/s10973-018-7721-x.
- [36] H. Tyagi, P. Phelan, y R. Prasher, «Predicted Efficiency of a Low-Temperature Nanofluid-Based Direct Absorption Solar Collector», *J. Sol. Energy Eng.-Trans. Asme - J SOL ENERGY ENG*, vol. 131, nov. 2009, doi: 10.1115/1.3197562.
- [37] «Sistemas de fluido térmico: la guía completa», Pirobloc. Accedido: 8 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.pirobloc.com/sistemas-de-fluido-termico-la-guia-completa/>
- [38] PubChem, «Ethylene Glycol». Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/174>
- [39] PubChem, «Propylene Glycol». Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1030>
- [40] G. Sekrani y S. Poncet, «Ethylene- and Propylene-Glycol Based Nanofluids: A Literature Review on Their Thermophysical Properties and Thermal Performances», *Appl. Sci.*, vol. 8, n.º 11, Art. n.º 11, nov. 2018, doi: 10.3390/app8112311.
- [41] P. P. Luque, (adivsor) J. P. Lucena, «Análisis de los Nanofluidos y su Aplicación como Fluido HTF», 2016.
- [42] «Propylene Glycol based Heat-Transfer Fluids». Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/propylene-glycol-d_363.html
- [43] «Ethylene Glycol Heat-Transfer Fluid Properties». Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_146.html
- [44] J. P. Vallejo, L. Mercatelli, M. R. Martina, D. Di Rosa, A. Dell'Oro, L. Lugo, E. Sani, «Comparative study of different functionalized graphene-nanoplatelet aqueous nanofluids for solar energy applications», *Renew. Energy*, vol. 141, pp. 791-801, oct. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.075.
- [45] E. Sani, J. P. Vallejo, D. Cabaleiro, y L. Lugo, «Functionalized graphene nanoplatelet-nanofluids for solar thermal collectors», *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 185, pp. 205-209, oct. 2018, doi: 10.1016/j.solmat.2018.05.038.
- [46] A. Spiliotopoulou, «Photolysis and secondary formation of disinfection by-products by UV treatment of swimming pool water», 2013.
- [47] L. V. Nguyen, P. Kosinski, B. V. Balakin, y A. Kosinska, «Direct absorption solar collector: Use of nanofluids and biodegradable colloids», *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 190, p. 108292, ago. 2023, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108292.
- [48] I. Garau Rabadán, J. (advisor) Pérez Vallejo, y L. (advisor) González Gil, «Desarrollo y caracterización de nuevos fluidos nanoestructurados para aplicaciones de energía solar», abr. 2023, Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/720>
- [49] S. Anu Mary Ealia y M. P. Saravanakumar, «A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 263, p. 032019, nov. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/263/3/032019.
- [50] M. Chen, Y. He, J. Zhu, y D. Wen, «Investigating the collector efficiency of silver nanofluids based direct absorption solar collectors», *Appl. Energy*, vol. 181, pp. 65-74, nov. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.08.054.

- [51] H. K. Gupta, G. D. Agrawal, y J. Mathur, «Investigations for effect of Al₂O₃-H₂O nanofluid flow rate on the efficiency of direct absorption solar collector», *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 5, pp. 70-78, mar. 2015, doi: 10.1016/j.csite.2015.01.002.
- [52] «Pt-100 RTD Sensor», Components101. Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://components101.com/sensors/pt100-rtd-temperature-sensor>
- [53] «Caudalímetro RS PRO para Líquido, 0.6 L/min → 10 L/min, 10bar, 4.5 → 24 V dc, Ø tubería 3/8 in | RS». Accedido: 23 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.rs-online.com/web/p/caudalimetros/5114772>
- [54] «USB-6210 Specifications - NI», <https://www.ni.com>. Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ni.com/docs>
- [55] E. Lemmon, M. L. Huber, y M. O. McLinden, «NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 8.0», NIST, abr. 2007, Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nist.gov/publications/nist-standard-reference-database-23-reference-fluid-thermodynamic-and-transport-0>
- [56] Å. Melinder, *Properties of Secondary Work Fluids*/for Indirect Systems: */Secondary Refrigerants or Coolants, Heat Transfer Fluids*. International Institute of refrigeration, 2010.
- [57] «Single-Digit Nanodiamonds, grade “SDND”, 5 wt.% aq. susp. », PlasmaChem GmbH. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://shop.plasmachem.com/nano-diamonds-and-carbon/45-187-single-digit-nanodiamonds-grade-sdnd-5-wt-aq-susp.html>
- [58] J. P. Vallejo, L. Febrero-Garrido, A. Cacabelos, A. González-Gil, y L. Lugo, «Influence of crystal structure on the thermophysical properties and figures-of-merit of propylene glycol: water-based SiC nanofluids», *Powder Technol.*, vol. 433, p. 119299, Ene. 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2023.119299.
- [59] A. Y. M. Ali, A. H. El-Shazly, M. F. El-Kady, y S. E. Abdelhafez, «Evaluation of Surfactants on Thermo-Physical Properties of Magnesia-Oil Nanofluid», *Mater. Sci. Forum*, vol. 928, pp. 106-112, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.928.106.
- [60] J. Fernández-Seara, R. Diz, F. J. Uhia, J. Sieres, y A. Dopazo, *Thermal analysis of a helically coiled tube in a domestic hot water storage tank*. International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, 2007. Accedido: 27 de Marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.up.ac.za/handle/2263/45760>
- [61] J. Fernández-Seara, C. Piñeiro-Pontevedra, y J. A. Dopazo, «On the performance of a vertical helical coil heat exchanger. Numerical model and experimental validation», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 62, n.º 2, pp. 680-689, ene. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.09.054.
- [62] V. Gnielinski, «G3 Heat Transfer in Helically Coiled Tubes», en *VDI Heat Atlas*, 2010.
- [63] L. G. Asirvatham, B. Raja, D. Mohan Lal, y S. Wongwises, «Convective heat transfer of nanofluids with correlations», *Particuology*, vol. 9, n.º 6, pp. 626-631, dic. 2011, doi: 10.1016/j.partic.2011.03.014.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

La investigación y el desarrollo en el ámbito de la energía solar tiene como objetivo optimizar su eficiencia, accesibilidad y sostenibilidad en el corto-medio plazo. Para materializar este objetivo deberán superarse una serie de desafíos, anteriormente comentados en el apartado 2.2.3. La superación de estos desafíos conllevará las siguientes implicaciones sociales, económicas y medioambientales:

■ *Implicaciones sociales*

Accesibilidad mundial: Muchos países en el mundo sufren deficiencias en la generación eléctrica debido a los costes ocasionados por la importación de materias primas. Debido a su disponibilidad global, la energía solar podría suponer una solución efectiva para estos países, cuando su desarrollo consiga reducir los costes iniciales asociados a esta.

Independencia energética: Relacionado con el punto anterior, los países dejarían de depender energéticamente de terceros países, favoreciendo su desarrollo económico.

Creación de empleo: Tanto en la industria (investigación, desarrollo y fabricación) como para su instalación y mantenimiento. Esto impulsaría la economía y fomentaría el desarrollo sostenible.

Salud global “One Health”: La utilización de fuentes de energía no contaminantes reduciría el riesgo de sufrir enfermedades respiratorias asociadas a la contaminación existentes en las ciudades. Además, la accesibilidad a esta energía podría mejorar la calidad de vida de los países en desarrollo, permitiéndoles la disponibilidad de agua potable y de electricidad.

■ *Implicaciones económicas*

Reducción de costes: Si bien su coste inicial es actualmente más elevado que el de las fuentes de energía convencionales, se observa que a largo plazo es una alternativa energética mucho más barata.

Seguridad energética: Generalizar la utilización de esta energía modificaría el mercado energético de cada país, permitiendo evitar imprevistas subidas de precios, asociadas al aumento de precios de las materias primas exportadas por terceros países.

Desarrollo de nuevas tecnologías: Investigación acerca de posibles mejoras en la eficiencia de absorción como la utilización de los DASC o de los nanofluidos como fluidos caloportadores.

■ *Implicaciones ambientales*

Combate contra el cambio climático: La utilización de energía solar como alternativa a las fuentes convencionales reduciría la huella de carbono, frenando el efecto climático generado por estas.

Mejora de la calidad del aire: Reducción de la contaminación en las ciudades.

Conservación de recursos naturales: La energía solar es un recurso renovable, que permitiría conservar los recursos naturales como el carbón, el petróleo, el gas...

Protección de la biodiversidad: La fabricación de células solares genera impactos medioambientales negativos debido a los materiales y procesos de fabricación empleados (silicio, telurio de cadmio, arseniuro de galio, seleniuro de galio). Como resultado, los colectores solares, especialmente los DASC, se perfilan como una de las alternativas más prometedoras para la obtención de energía de forma inocua para el medioambiente.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Aunque la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías suelen conseguir mejoras sustanciales en la eficiencia, en ocasiones, conllevan unos costes muy elevados. En el caso de la energía solar, su costoso desarrollo inicial puede incluso ser contradictorio con su objetivo, dado que se requieren diversos recursos materiales y energéticos que no solo elevan los costes, sino que también pueden ser perjudiciales para el medioambiente. La tecnología necesaria para el desarrollo de nanopartículas utilizadas en nanofluidos, son un ejemplo de esta reflexión ética.

Como se mencionaba en el apartado 2.5, la investigación experimental con colectores solares de absorción directa es escasa, y la que existe se centra en la utilización de colectores de placa transparente. Este TFG busca aumentar la literatura existente en este ámbito, mediante la utilización de un banco de ensayos de fabricación propia, centrado en un colector solar tubos transparentes de metacrilato. Mediante este banco de ensayos, se ha verificado la mejora de absorción gracias a la utilización de un fluido oscuro y de la adicción de nanopartículas en el fluido caloportador.

El avance en la eficiencia de los colectores solares es crucial, especialmente en España, donde desde el 2019 el “Código Técnico de la Edificación” (CTE) exige la instalación de colectores solares para la producción de ACS en nuevas construcciones o grandes reformas. Además, el “Real Decreto 736/2020” establece la obligatoriedad de cumplir ciertos porcentajes de producción de ACS mediante la utilización de energía solar térmica en estas construcciones:

- 30-70% del ACS: Para construcciones de uso residencial
- 20-60% del ACS: Para construcciones de uso no residencial.

Este TFG supone un punto de partida para la investigación y experimentación de los DASC, contribuyendo, modestamente, en el objetivo de convertir la energía solar en la principal fuente de energía mundial. Para esto debe asegurarse su desarrollo responsable y sostenible desde el punto de vista ético y social.

ANEXO III: NOMENCLATURA

Nomenclatura		Subíndices	
A	Área [m^2]	A	Agua
c_i	Coefficiente i de correlación para Nu	abs	Calor absorbido
c_p	Capacidad calorífica [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	c	Colector solar
d	Diámetro [m]	ced	Calor cedido
D	Diámetro total [m]	crit	Crítico
H	Altura [m]	cu	Cobre
h	Coefficiente de convección [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	d	Depósito
k	Conductividad térmica [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	ec	Entrada al colector
K	Factor de escalación del caudalímetro	ei	Entrada al intercambiador
L	Longitud [m]	exp	Exponencial
$LMTD$	Diferencia T media logarítmica	ext	Exterior
m	Coefficiente para Nusselt laminar	i	Intercambiador de calor
n	Número de espiras	ic	Calor intercambiado
Nu	Número de Nuselt	int	Interior
p	Paso de la bobina [m]	nf	Nanofluido
Pr	Número de Prandtl	np	Nanopartículas
Q	Calor [W]	PG:A	Propilenglicol:agua, 20:80 % m/m
Re	Número de Reynolds	pi	Pared del intercambiador
k	Conductividad térmica [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	sc	Salida del colector
T	Temperatura [K]	sec	Sección
U	Coefficiente global [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	si	Salida del intercambiador
v	Velocidad del fluido [m/s]	teo	Teórico
$\dot{V}$	Caudal [m^3]		
Caracteres especiales (símbolos griegos)		Abreviaturas	
ϕ_v	Fracción másica de nanopartículas	A	Agua
ϕ_m	Fracción volumétrica de nanopartículas	ACS	Agua Caliente Sanitaria
γ	Coefficiente para Nusselt transitorio	CA	Corriente alterna
μ	Coefficiente de viscosidad, [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	CB	Carbon Black
ξ	Coefficiente para Nusselt turbulento	CC	Corriente Continua
ρ	Densidad [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	CNT	Carbon NanoTubes
		CSPP	Colectores Solares de Placa Plana
		DASC	Direct Absorption Sollar Collector
		PG	Propilenglicol
		PVT	PhotoVoltaic Thermal
		SDND	Single-Digit NanoDiamonds
		SDS	Sodium Dodecyl Sulfate

Tabla A3-1 Nomenclatura utilizada (elaboración propia)

ANEXO IV: PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LOS FLUIDOS

■ Agua

Las propiedades del agua utilizadas [55] para obtener las ecuaciones cuadráticas del apartado 3.2 y posteriormente utilizadas para realizar el análisis de los resultados, se recogen en la Tabla A4-1:

Temperatura, T [K]	Densidad, ρ [kg·m ⁻³]	Capacidad calorífica, c_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Conductividad térmica, k [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Coefficiente de viscosidad, μ [Pa·s]
283,15	1000,1	4193	0,581	0,00130
293,15	998,6	4172	0,599	0,00100
303,15	996,0	4154	0,616	0,00078
313,15	992,6	4137	0,631	0,00065
323,15	988,4	4121	0,644	0,00055
333,15	983,6	4105	0,655	0,00047

Tabla A4-1 Propiedades termofísicas del agua (modificado de: [55])

■ Propilenglicol:agua 20:80

Las propiedades del propilenglicol utilizadas [56] para obtener las ecuaciones cuadráticas del apartado 3.2 y posteriormente utilizadas para realizar el análisis de los resultados, se recogen en la Tabla A4-2:

Temperatura, T [K]	Densidad, ρ [kg·m ⁻³]	Capacidad calorífica, c_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Conductividad térmica, k [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Coefficiente de viscosidad, μ [Pa·s]
283,15	1017,3	3960	0,482	0,00290
293,15	1014,5	3980	0,492	0,00207
313,15	1006,0	4020	0,513	0,00120
333,15	995,2	4060	0,531	0,00079
353,15	982,8	4100	0,548	0,00055
373,15	969,5	4140	0,563	0,00043

Tabla A4-2 Propiedades termofísicas de la mezcla PG:A 20:80 (modificado de: [56])