



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Caracterización térmica e hidráulica de un colector
solar térmico de bajo coste

Autor: Iñigo de Carlos Lardiés

Directores: Luis Mochón Castro

Pablo Ayala Santamaría

Madrid

AGOSTO de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

**CARCTERIZACIÓN TÉRMICA E HIDRÁULICA DE UN COLECTOR SOLAR
TÉRMICO DE BAJO COSTE**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: IÑIGO DE CARLOS LARDIÉS

Fecha: 25/agosto/2025

Autorizada la entrega del proyecto

DIRECTORES DEL PROYECTO



Fdo.: LUIS MANUEL MOCHÓN CASTRO

Fecha: 26/08/2025



Fdo.: PABLO AYALA SANTAMARÍA

Fecha: 26/08/2025

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA E HIDRÁULICA DE UN COLECTOR SOLAR TÉRMICO DE BAJO COSTE

Autor: DE CARLOS, IÑIGO.

Director: MOCHON, LUIS MANUEL y AYALA SANTAMARÍA, PABLO

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto consiste en el diseño, construcción y ensayo de un colector solar térmico eficiente a la vez que económico y accesible. Para ello, en primer lugar, se diseña el sistema hidráulico que permita impulsar el agua por el colector, y calentarla. Posteriormente, se procederá con su construcción. Y, por último, se realizarán los ensayos que sean necesarios para evaluar su eficiencia.

1. Introducción

En la actualidad, la transición hacia energías renovables que garanticen la sostenibilidad y combatan el cambio climático es crucial. En este contexto, la energía solar térmica se presenta como una solución eficaz y una alternativa al uso de combustibles fósiles, con gran impacto medioambiental. La energía solar (térmica o fotovoltaica) es limpia y eficiente, y puede ser utilizada en aplicaciones rurales, industriales y domésticas.

Es así como surge este proyecto, buscando una manera de aprovechar al máximo la energía solar térmica. Este proyecto se centra en el diseño, construcción y ensayo de un colector solar térmico de baja temperatura, accesible, eficiente y de bajo coste. La radiación solar para calentar agua y almacenarla en un tanque diseñado para maximizar su aprovechamiento. La idea de partida es un colector de policarbonato, un material más económico y liviano que el cobre. El agua caliente producida será almacenada en un tanque, para garantizar la máxima eficiencia térmica del sistema.

Para caracterizar térmicamente el colector (efectividad), se requiere medir las temperaturas de entrada y de salida, la temperatura ambiente y la radiación solar. Para la caracterización hidráulica se precisa medir la presión diferencial o pérdida de carga

del colector. En base a proyectos similares, la eficiencia esperada está entre el 60% y el 70%, aunque se podría llegar hasta el 75%-80%.

Este trabajo a su vez forma parte de un proyecto más grande en colaboración con la escuela de ICAI-Comillas, por lo que hay parte del proyecto del colector que no corresponde a este trabajo.

En esta memoria se describirán las etapas del desarrollo del proyecto, desde la concepción del diseño, pasando por la construcción, montaje en banco, ensayo del panel, y finalmente evaluación de resultados, situando el proyecto en su contexto técnico y social. Además, se analizarán los aspectos que alinean este trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (NACIONES UNIDAS), subrayando su relevancia en la lucha por un futuro más sostenible mediante el uso de energías limpias y renovables.

2. Definición del proyecto

Este proyecto trata sobre el diseño, montaje y ensayo de un colector solar térmico, económico al mismo tiempo que eficaz. Tiene como objetivo suministrar agua caliente para uso agrícola, sanitario o domestico en zonas rurales o con dificultades económicas que impiden su fácil obtención. Para ello, se ha realizado en tres etapas diferenciadas.

En la primera etapa, este proyecto se enfoca en estudiar y diseñar un modelo del colector. Para ello, se estudiarán cada una de las partes necesarias que componen el sistema hidráulico, se buscara un soporte de todo el conjunto de elementos del colector y se analizara como ensamblar todos los elementos dentro del soporte

Los elementos que se emplearan en el sistema hidráulico del colector solar son:

- Bomba hidráulica: este elemento se utiliza con el fin de impulsar y mover el agua a lo largo del circuito hidráulico. Se ha seleccionado el modelo Copreci 2KEBS111/147. Es capaz de generar una altura efectiva máxima de 2,3m y un caudal máximo de 393l/h.

-
- Caudalímetro: este elemento sirve para medir el flujo de agua a través de la instalación. Se ha seleccionado de la marca Tecfluid, con un rango de Caudal de 0 a 250l/h.
 - Manómetro: es utilizado para medir la presión de entrada en el colector.
 - Sensores de temperatura: Son utilizados para medir de forma precisa la temperatura de entrada y de salida del colector. Sensores tipo Pt100 clase B de 3 hilos. Tienen un rango de temperatura desde -100°C hasta +200°C.
 - Colector solar: Es el elemento principal de la instalación. Se trata de un panel de policarbonato de 1x1m. Se utiliza para calentar el agua utilizando la radiación solar.
 - Válvulas: Estos elementos se utilizan para cortar el flujo de agua en los lugares requeridos. Una de estas se utilizará para eliminar burbujas de aire atrapadas en el circuito. Otra se empleará para controlar el flujo de agua a través de toda la instalación.
 - Vaso de expansión: Se empleará para controlar la presión en la instalación. Se selecciona el modelo 5 AMR-E, código AC 04 001, de la marca Salvador Escoda.
 - Termo/tanque: Sirve para almacenar el agua que útil que puede ser empleada. Consta de una capacidad de 30L.
 - Manómetro hidráulico diferencial: Se emplea para medir el salto de presión a través del colector. Fabricado a partir de una tubería de PVC flexible.
 - Termómetro: Este elemento se emplea para medir la temperatura ambiente. Tipo Pt100, clase B de 3 hilos y con un rango de temperatura de -30°C hasta +150°C.
 - Datalogger: Se emplea para recolectar los datos de variación de temperatura ambiente y el salto de temperatura entre la entrada y la salida del colector solar.

Seguidamente, se diseña un soporte que permita instalar todos los elementos necesarios. Para ello se emplean perfiles de aluminio, ligero y económico al mismo tiempo que resistente. Este diseño permite calcular la cantidad de perfiles, y su longitud que se emplearan en el montaje.

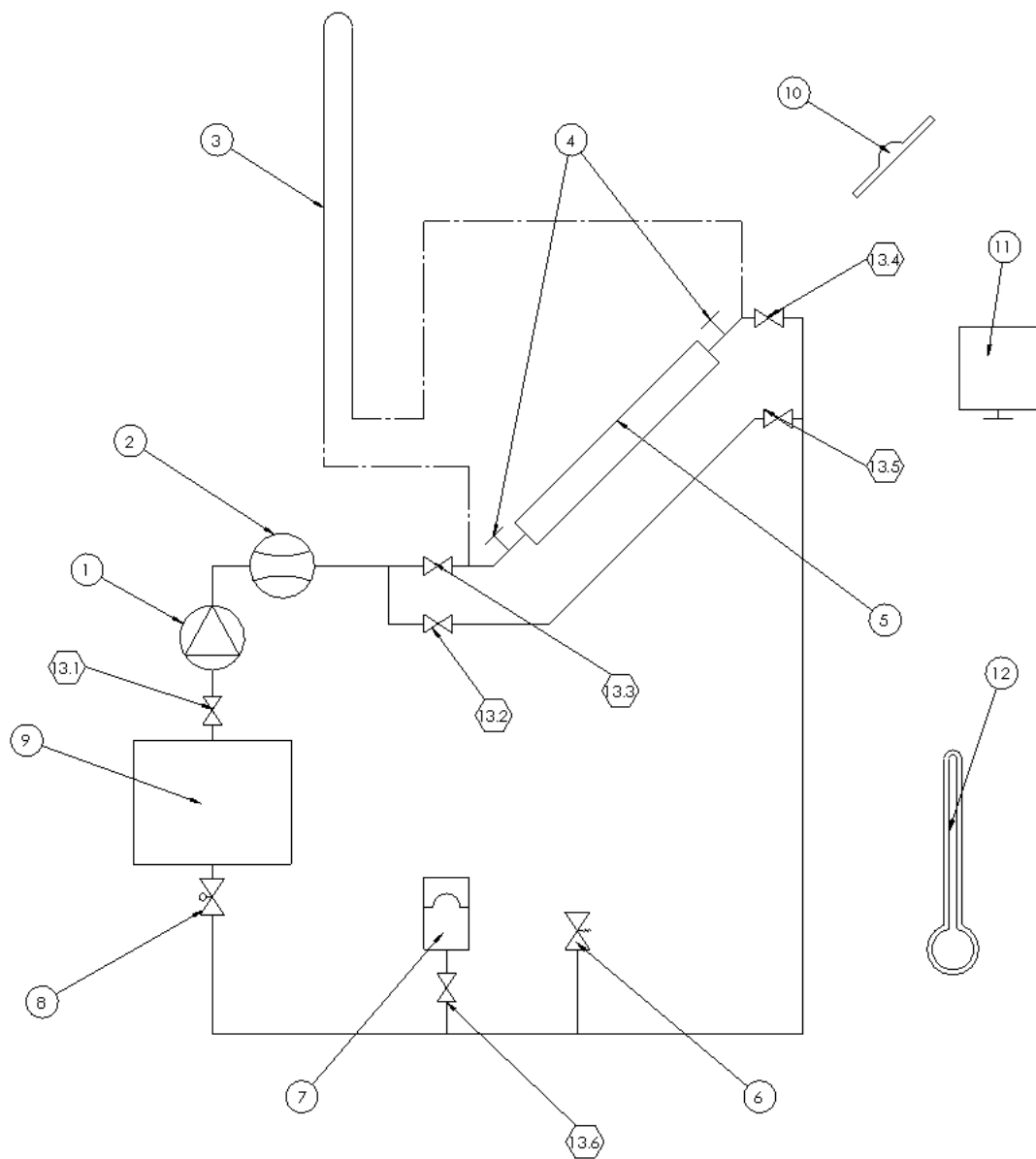


Figura 1: Esquema del circuito hidráulico

Tabla 1: Elementos del sistema hidráulico

ETIQUETA	NOMBRE	CANTIDAD
1	Bomba Hidráulica	1
2	Caudalímetro	1
3	Piezómetro diferencial	1
4	Sensor de temperatura	2
5	Colector solar	1
6	Válvula de purga	1
7	Vaso de expansión	1
8	Válvula de control de caudal	1
9	Termo	1
10	Piranómetro	6
11	Datalogger	1
12	Termómetro	1
13	Válvulas de corte	1

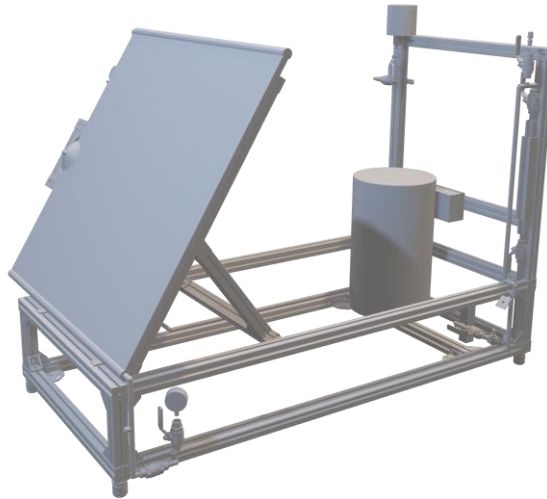


Figura 2:Esquema 3D del prototipo

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Para las distintas fases del proyecto, distintos modelos, sistemas o herramientas son requeridos.

En primer lugar, para la fase de diseño del sistema hidráulico, se utilizará el sistema de modelado en 3D SolidEdge y SolidWorks (SolidWorks, s.f.). Estas herramientas permiten crear un diseño completo de todo el sistema hidráulico. Permite también visualizar los elementos necesarios, y la disposición concreta de cada uno dentro del sistema hidráulico. En lo que corresponde a este trabajo, el diseño se enfoca únicamente en el diseño 3D del sistema hidráulico, excluyendo la parte estructural del banco de soporte.

Otra herramienta necesaria durante esta fase es AutoCad, (AutoDesk, s.f.) herramienta de diseño gráfico y de planos en 2D. Esta herramienta es necesaria para diseñar un primer dibujo esquemático del sistema hidráulico completo. Este esquema permite una visualización rápida de los elementos que configuran el sistema, y su disposición en él.

Para la fase de construcción, se procederá primeramente con la construcción del soporte para el sistema hidráulico completo. Para ello, es necesario construir una estructura firme y estable, que permita sostener el peso del colector, el tanque, y los distintos elementos en su posición concreta. Para ello, se emplearán perfiles de aluminio 45x45 UL, además de otros elementos necesarios para la construcción del banco. Para los distintos ensayos del colector, este debe poder inclinarse y declinarse libremente, según sea necesario. Por ello, el diseño del banco permitirá las diferentes inclinaciones necesarias, desde 15° hasta los 90°.

Para el sistema hidráulico, se emplearán tuberías flexibles transparentes de PVC. Estas tuberías son económicas a la vez que eficientes para transportar el fluido de un elemento a otro de la instalación. También se emplearán elementos adaptadores para unir los elementos con las tuberías o los elementos entre ellos. Estos adaptadores son componentes de PVC duro.

Por último, se procede con la fase de ensayo del colector, la última fase del proyecto. Para ello, primeramente, se coloca el colector en una zona despejada y bien iluminada. De esta manera, se permite que el colector este directamente expuesto a la radiación solar.

Para proceder con los ensayos, se seguirá la norma UNE-EN 12975:202. (AENOR, 2022)

4. Resultados

Se ensaya un prototipo de colector solar térmico de 1m^2 en un lugar claro y despejado. El caudal de operación se ajusta a 72 l/h , siguiendo la norma correspondiente.

Se seguirá un riguroso procedimiento:

- Captador a 55° respecto al suelo.
- Arrancar la bomba, abrir el caudalímetro unos minutos y fijar un caudal constante de $72\text{ cm}^3/\text{min}$.
- Esperar $\geq 5\text{ min}$ para estabilizar y registrar temperaturas.
- Una vez en régimen permanente y con datos suficientes, encender el calentador del termo, volver a esperar la estabilización y tomar de nuevo las temperaturas.

Las mediciones recogidas durante el ensayo presentan tres etapas diferenciadas:

Una primera etapa de estabilización de medidas. Los datos recogidos durante esta etapa todavía no son útiles dado que el colector está empezando a funcionar. Estos datos están alterados por las condiciones previas al inicio del ensayo.

Una segunda etapa de obtención de medidas útiles. En esta etapa, el colector está funcionando plenamente. Las medidas obtenidas en esta etapa son usadas para calcular el rendimiento óptico y la temperatura de estancamiento del colector.

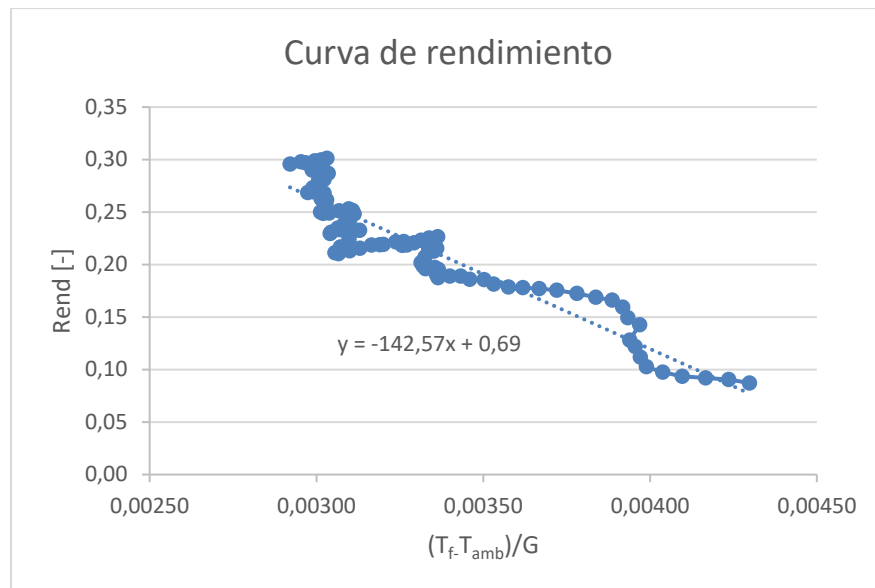


Figura 3: Rendimiento del colector

Donde

G: radiación solar incidente sobre la superficie del colector solar (medido en W/m^2)

T_f : Temperatura media del fluido en el colector, entre la entrada y la salida ($^{\circ}\text{C}$)

T_{amb} : Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

Se observa, en la figura 3, como el rendimiento de funcionamiento del colector durante el ensayo es de aproximadamente 0,3 = 30% al principio y decae del colector durante el ensayo. El rendimiento se aproxima a la recta:

$$\eta = -142,57 \cdot x + 0,69$$

Se obtiene que el rendimiento óptico del colector es de: 0,69 = 69%.

La temperatura de estancamiento del colector es de: 36,84 $^{\circ}\text{C}$.

La última etapa de datos corresponde al momento en el que se enciende el calentador de agua del termo. Se procede de esta forma para ensayar el colector tanto con temperaturas

frías como con temperaturas calientes. Al encender el calentador de agua, la temperatura que llega a la entrada del colector es más elevada que la que sale de él. Por ello, mientras el calentador está en funcionamiento, los rendimientos observados son negativos (alcanzando un mínimo de -1,7) y, por tanto, no son útiles para la caracterización del colector. Al apagar el calentador de agua, se observa como los rendimientos aumentan, pero el ensayo finaliza antes de que estos se estabilicen completamente. Por ello, no se obtienen mediciones útiles con temperaturas calientes para la caracterización del colector.

5. Conclusiones

Se extrae como conclusión que es posible diseñar, construir y ensayar un colector solar térmico de bajo coste con materiales accesibles (policarbonato y polipropileno negro). Se ha seguido la norma UNE-EN 12975:2022, fijando un caudal de 72 L/h·m² para el prototipo de 1 m². Se desarrolla el circuito hidráulico, el soporte regulable y los procedimientos de ensayo y cálculo (modelos y scripts en MATLAB (MathWorks, s.f.)).

El colector presenta pérdidas de carga muy bajas (0,011 mca). La bomba Bosch Copreci cubre con holgura el rango de caudales y se ha dimensionado un vaso de expansión de 5 L, acorde a las necesidades del sistema.

El rendimiento óptico del colector es acorde a los materiales ($\eta_0 \approx 0,69$), con $\tau_{PC} \approx 0,82$ y $\alpha_{PP} \approx 0,95$. Durante el ensayo a baja temperatura, se observan rendimientos instantáneos ~30 %. Por el contrario, el coeficiente global de pérdidas resultó elevado (principalmente debido a las condiciones de viento durante el ensayo), lo que deriva en una temperatura de estancamiento baja (~36,8 °C con $T_{amb} = 32$ °C), limitando el salto térmico. Se registran eficiencias negativas al ensayar con el calentador del depósito encendido ($T_{entrada} > T_{salida}$), por lo que esos datos no son válidos. Las ecuaciones y resultados se incluyen en la memoria.

En comparación con colectores planos metálicos vidriados convencionales, los parámetros típicos son: un rendimiento óptico $\eta_0 \approx 0,75$ –0,85 y coeficiente de pérdidas $c_1 \approx 3$ –6 W/m²K. La temperatura de estancamiento suele alcanzar del orden de 150–200

°C. Como referencia, modelos comerciales alcanzan 152 °C, y guías técnicas sitúan los planos en el rango 200–250 °C en condiciones estándar de estancamiento. El prototipo ensayado queda todavía lejos de estos valores de modelos comerciales. (Kingspan) (European Commission, 2014)

Comparando con modelos de bajo coste similares, los colectores poliméricos sin cubierta para piscina trabajan muy cerca de la temperatura ambiente, operando típicamente por debajo de ~32 °C y, a ΔT baja, alcanzan eficiencias instantáneas altas ($\approx 70\text{--}80\%$) gracias a sus pérdidas frontales elevadas. Las temperaturas de estancamiento de estos tipos de colectores son comparables con la del prototipo ensayado. (outletPiscinas)

Se concluye que el prototipo no es hoy apto para ACS o calefacción, pero sí como precalentador o para climatización de agua, donde el salto térmico exigido es menor. Se aporta una arquitectura replicable, documentada y de muy bajo coste, con datos trazables y metodología compatible con la norma.

En términos económicos, el prototipo de laboratorio (banco + instrumentación) tiene un coste total de 1.666,58 €. Un modelo simplificado orientado al uso práctico (sin instrumentación ni banco regulable para el ensayo) puede reducirse a CAPEX ≈ 210 €. Con $\eta \approx 0,25$ y $H_t \approx 1500$ kWh/año·m², la energía útil anual es ~ 375 kWh/año. Con un OPEX bajo, el beneficio neto estimado es ~ 15 €/año. Técnica y económicamente, la base es viable para seguir mejorando.

Se han cumplido los objetivos de diseño, construcción, banco de ensayo, modelización, caracterización térmica e hidráulica y evaluación técnico-económica. El prototipo cuenta con un diseño polimérico reproducible, metodología de ensayo basada en la norma, pérdidas hidráulicas mínimas, identificación de pérdidas convectivas y radiantes, y estimación económica de un futuro modelo comercial.

Es necesaria la reducción de pérdidas, elevar la temperatura de estancamiento y refinar la campaña de ensayos antes de avanzar con el futuro modelo comercial.

Para ello, se plantean opciones de mejora:

-
- Doble cubierta de policarbonato (cámara de aire) o lámina interior además de una revisión de recubrimientos, sellados y acabados.
 - Deflectores frontales contra el viento y repetir ensayos en días de viento bajo.
 - Plan de ensayos separado con y sin apoyo térmico del calentador de agua.
 - Ensayos de durabilidad: ciclos térmicos, llenado/vaciado y exposición UV prolongada.

Con estas acciones, el prototipo puede mejorar su temperatura de estancamiento y el rendimiento, habilitando usos más exigentes y sentando la base de un modelo comercial simple y replicable.

6. Referencias

AENOR. (2022). *UNE-EN 12975:2022 - Captadores solares térmicos para calentamiento de fluidos. Requisitos generales.*

AutoDesk. (s.f.). *AutoCad*. Obtenido de https://www.autodesk.com/es/products/autocad/overview?mktvar002=afc_es_nmpi_ppc&AID=11043037&PID=8227014&gclsrc=aw.ds&&cjevent=CjwKCAjwtrXFBhBiEiwAEKen1z2Zltpvwk7RDjQkx-2ViTMll47f8cEkQPChALXNnF7ToEFY4rN8yRoCwEwQAvD_BwE&click_id=CjwKCAjwtrXFBhBiEiwAEKen1z2

European Commission. (2014). *Development of a modular, all-POLYmer SOLar thermal collector for domestic hot water preparation and space heating.* Luxemburgo.

Kingspan. (s.f.). *Kingspan-DF100-data-sheet*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.powernaturally.co.uk/working/content/uploads/2015/07/Kingspan-DF100-data-sheet.pdf

MathWorks. (s.f.). *Matlab*. Obtenido de <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

NACIONES UNIDAS. (s.f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

outletPiscinas. (s.f.). Obtenido de http://outlet-piscinas.com/paneles-solares-heliocol?utm_source

SolidWorks. (s.f.). *SolidWorks*. Obtenido de <https://www.solidworks.com/es>

THERMAL AND HYDRAULIC CHARACTERIZATION OF A LOW-COST SOLAR THERMAL COLLECTOR

Author: DE CARLOS, IÑIGO.

Director: MOCHON, LUIS MANUEL and AYALA SANTAMARÍA, PABLO
Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

PROJECT SUMMARY

This project consists of the design, construction, and testing of a solar thermal collector that is both efficient and economical as well as accessible. To this end, first, the hydraulic system is designed to allow the water to be driven through the collector and heated. Subsequently, the construction will be carried out. Finally, the necessary tests will be performed to evaluate its efficiency.

1. Introduction

At present, the transition towards renewable energies that guarantee eco-sustainability and combat climate change is crucial. In this context, solar thermal energy is presented as an effective solution and an alternative to the use of fossil fuels, which have a great environmental impact. Solar energy (thermal or photovoltaic) is clean and efficient, and can be used in rural, industrial, and domestic applications.

This is how this project arises, seeking a way to make the most of solar thermal energy. This project focuses on the design, construction, and testing of a low-temperature solar thermal collector that is accessible, efficient, and low-cost. Solar radiation is used to heat water and store it in a tank designed to maximize its utilization. The starting idea is a polycarbonate collector, a material that is cheaper and lighter than copper. The hot water produced will be stored in a tank to ensure maximum thermal efficiency of the system.

To thermally characterize the collector (effectiveness), it is necessary to measure the inlet and outlet temperatures, the ambient temperature, and the solar radiation. For the hydraulic characterization, it is necessary to measure the differential pressure or pressure drop of the collector. Based on similar projects, the expected efficiency is between 60% and 70%, although it could reach up to 75%–80%.

This work is part of a larger project in collaboration with the ICAI-Comillas School, and therefore some parts of the collector project are not included within the scope of this work.

This report will describe the stages of the project's development, from the design conception, through construction, bench mounting, panel testing, and finally the evaluation of results, placing the project in its technical and social context. In addition, the aspects that align this work with the Sustainable Development Goals (SDGs) will be analyzed, highlighting its relevance in the fight for a more sustainable future through the use of clean and renewable energies.

2. Project Definition

This Project deals with the design, assembly, and testing of a solar thermal collector, economical while at the same time effective. Its objective is to supply hot water for agricultural, sanitary, or domestic use in rural areas or with economic difficulties that prevent its easy acquisition.

It consists of 3 distinct stages:

In the first stage, this project focuses on studying and designing a model of the collector. To this end, each of the necessary parts that make up the hydraulic system will be studied, a support for the entire set of collector elements will be sought, and how to assemble all the elements within the support will be analyzed.

The elements used in the hydraulic system of the solar collector are:

- Flowmeter: this element is used to measure the flow of water through the installation.
- Manometer: it is used to measure the inlet pressure in the collector.
- Temperature sensors: They are used to accurately measure the inlet and outlet temperature of the collector.

-
- Solar collector: It is the main element of the installation. It is a 1x1 m polycarbonate panel. It is used to heat the water using solar radiation.
 - Valves: These elements are used to cut off the flow of water in the required places. One of these will be used to remove air bubbles trapped in the circuit. Another will be used to control the flow of water throughout the installation.
 - Expansion vessel: It will be used to control the pressure in the installation.
Water heater/tank: It serves to store the useful water that can be used.
 - Differential hydraulic manometer: It is used to measure the pressure drop across the collector.
 - Thermometer: This element is used to measure the ambient temperature.
 - Datalogger: It is used to collect the data of variation of ambient temperature and the temperature rise between the inlet and outlet of the solar collector.

Next, a support is designed that allows installing all the necessary elements. For this, aluminum profiles are used, light and economical while at the same time resistant. This design allows calculating the amount of profiles, and their length that will be used in the assembly.

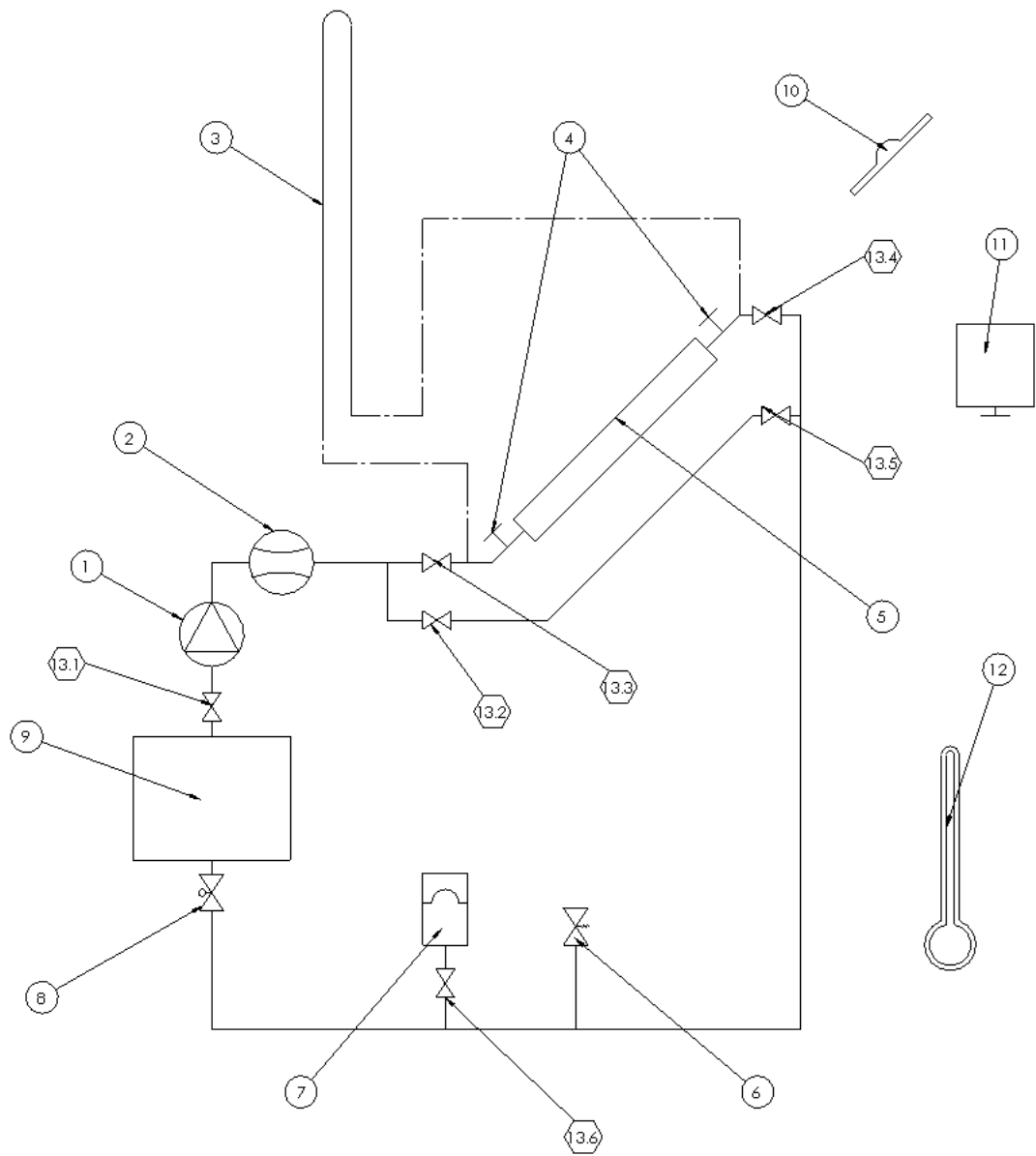


Figure 4: Scheme of the hydraulic circuit

Table 2:Hydraulic System Components

ETIQUETA	NOMBRE	CANTIDAD
1	Bomba Hidráulica	1
2	Caudalímetro	1
3	Piezómetro diferencial	1
4	Sensor de temperatura	2
5	Colector solar	1
6	Válvula de purga	1
7	Vaso de expansión	1
8	Válvula de control de caudal	1
9	Termo	1
10	Piranómetro	6
11	Datalogger	1
12	Termómetro	1
13	Válvulas de corte	1

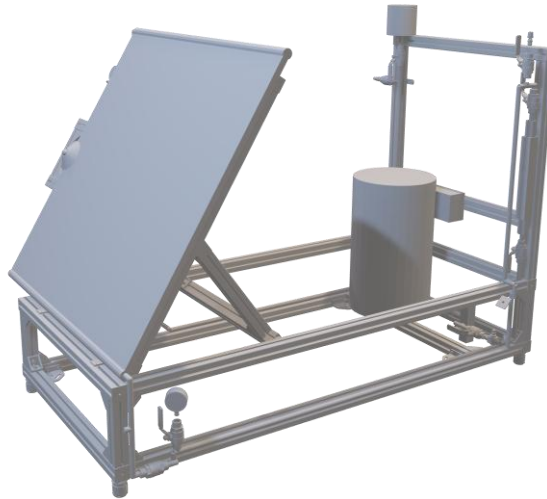


Figure 5: 3D Scheme of the prototype

3. Description of the model/system/tool

For the different phases of the project, various models, systems, or tools are required.

First, for the design phase of the hydraulic system, the 3D modeling systems SolidEdge and SolidWorks will be used. These tools allow the creation of a complete design of the entire hydraulic system. They also allow visualization of the necessary elements and the specific arrangement of each within the hydraulic system.

Another tool required during this phase is AutoCAD, a graphic design and 2D drawing tool. This tool is necessary to design an initial schematic drawing of the complete hydraulic system. This scheme allows a quick visualization of the elements that make up the system and their arrangement in it.

For the construction phase, the first step will be the construction of the support for the complete hydraulic system. For this purpose, it is necessary to build a firm and stable structure that can support the weight of the collector, the tank, and the different elements

in their specific positions. For this, 45x45 UL aluminum profiles will be used, in addition to other elements necessary for the construction of the test bench. For the different tests of the collector, it must be possible to tilt and decline freely, as required. Therefore, the bench design will allow the different inclinations needed, from 15° up to 90°.

For the hydraulic system, transparent flexible PVC pipes will be used. These pipes are economical while at the same time efficient for transporting the fluid from one element to another of the installation. Adapter elements will also be used to connect the components with the pipes or the elements between them. These adapters are made of rigid PVC.

Finally, the collector testing phase, the last phase of the project, will be carried out. For this, the collector is first placed in a clear and well-lit area. In this way, the collector is directly exposed to solar radiation.

To carry out the tests, the UNE-EN 12975:202 standard will be followed.

4. Results

A 1 m² prototype of a solar thermal collector is tested in a clear and unobstructed location. The operating flow rate is adjusted to 72 l/h, following the corresponding standard.

A rigorous procedure is followed:

- Collector at 55° with respect to the ground.
- Start the pump, open the flowmeter for a few minutes, and set a constant flow rate of 72 cm³/min.
- Wait ≥ 5 min to stabilize and record temperatures.
- Once steady state is reached and sufficient data are collected, switch on the water heater, wait again for stabilization, and record the temperatures once more.

The measurements collected during the test present three distinct stages:

A first stabilization stage of the measurements. The data collected during this stage are not yet useful since the collector is just beginning to operate. These data are affected by the conditions prior to the start of the test.

A second stage of obtaining useful measurements. In this stage, the collector is fully operating. The measurements obtained here are used to calculate the optical efficiency and the stagnation temperature of the collector.

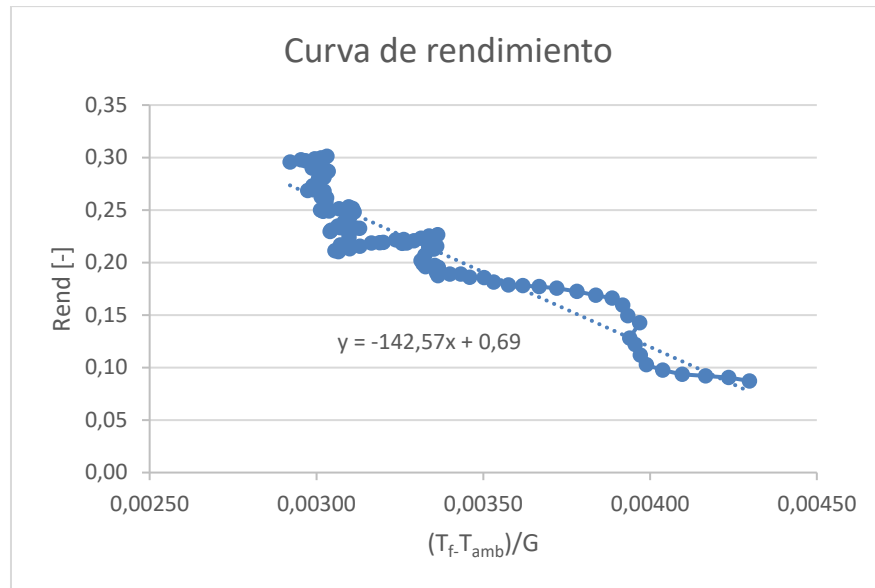


Figure 6: Collector efficiency.

Where:

G : Solar radiation (W/m^2)

T_f : Mean temperature of the water through the collector ($^{\circ}\text{C}$)

T_{amb} : Ambient temperature($^{\circ}\text{C}$)

It can be observed, in figure 3, how the operating efficiency of the collector during the test is approximately 0.3 = 30% at the beginning and decreases during the test. The efficiency approaches the line:

$$\eta = -142,57 \cdot x + 0,69$$

It is obtained that the optical efficiency of the collector is: 0.69 = 69%.

The stagnation temperature of the collector is: 36.84 $^{\circ}\text{C}$.

The last stage of data corresponds to the moment when the water heater of the tank is switched on. This is done in order to test the collector with both cold and hot

temperatures. When the water heater is turned on, the temperature entering the collector is higher than the temperature leaving it. Therefore, while the heater is operating, the observed efficiencies are negative (reaching a minimum of -1.7) and are thus not useful for the characterization of the collector. When the water heater is turned off, it is observed that the efficiencies increase, but the test ends before they stabilize completely. For this reason, no useful measurements with hot temperatures are obtained for the characterization of the collector.

5. Conclusions

It can be concluded that it is possible to design, build, and test a low-cost solar thermal collector with accessible materials (polycarbonate and black polypropylene). The UNE-EN 12975:2022 standard has been followed, setting a flow rate of 72 L/h·m² for the 1 m² prototype. The hydraulic circuit, the adjustable support, and the test and calculation procedures (models and scripts in MATLAB) have been developed.

The collector presents very low pressure losses (0.011 m.w.c.). The Bosch Copreci pump comfortably covers the flow rate range, and a 5 L expansion vessel has been sized according to the system requirements.

The optical efficiency of the collector is consistent with the materials ($\eta_0 \approx 0.69$), with $\tau_{PC} \approx 0.82$ and $\alpha_{PP} \approx 0.95$. During the low-temperature test, instantaneous efficiencies of ~30% were observed. On the other hand, the overall heat loss coefficient turned out to be high (mainly due to wind conditions during the test), which resulted in a low stagnation temperature (~36.8 °C with $T_{amb} = 32$ °C), limiting the thermal gain. Negative efficiencies were recorded when testing with the tank heater switched on ($T_{inlet} > T_{outlet}$), so those data are not valid. The equations and results are included in the report.

In comparison with conventional glazed flat plate metal collectors, the typical parameters are: an optical efficiency $\eta_0 \approx 0.75$ –0.85 and a heat loss coefficient $c_1 \approx 3$ –6 W/m²K. The stagnation temperature usually reaches around 150–200 °C. As a reference, commercial models reach 152 °C, and technical guides place flat plates in the range of

200–250 °C under standard stagnation conditions. The tested prototype is still far from these values of commercial models.(Kingspan) (European Commission, 2014)

Compared with similar low-cost models, uncovered polymeric pool collectors operate very close to ambient temperature, typically below ~ 32 °C, and at low ΔT they achieve high instantaneous efficiencies (≈ 70 – 80%) thanks to their high frontal losses. The stagnation temperatures of these types of collectors are comparable to that of the tested prototype.(outletPiscinas)

It is concluded that the prototype is not currently suitable for DHW or heating, but it can be used as a preheater or for water conditioning, where the required temperature rise is lower. A replicable, documented, and very low-cost architecture is provided, with traceable data and a methodology compatible with the standard.

In economic terms, the laboratory prototype (test bench + instrumentation) has a total cost of €1,666.58. A simplified model aimed at practical use (without instrumentation or adjustable test bench) can be reduced to CAPEX $\approx$ €210. With $\eta \approx 0.25$ and $H_t \approx 1500$ kWh/year·m², the useful annual energy is ~ 375 kWh/year. With low OPEX, the estimated net benefit is $\sim$ €15/year. Technically and economically, the basis is viable for further improvement.

The objectives of design, construction, test bench, modeling, thermal and hydraulic characterization, and technical-economic evaluation have been achieved. The prototype features a reproducible polymeric design, test methodology based on the standard, minimal hydraulic losses, identification of convective and radiative losses, and an economic estimate of a future commercial model.

It is necessary to reduce losses, increase the stagnation temperature, and refine the testing campaign before advancing with the future commercial model.

For this purpose, improvement options are proposed:

- Double polycarbonate cover (air chamber) or inner sheet, along with a review of coatings, seals, and finishes.

-
- Front deflectors against the wind and repeat tests on low-wind days.
 - Separate test plan with and without thermal support from the water heater.
 - Durability tests: thermal cycles, filling/emptying, and prolonged UV exposure.

With these actions, the prototype can improve its stagnation temperature and performance, enabling more demanding applications and laying the foundation for a simple and replicable commercial model.

6. References

AENOR. (2022). *UNE-EN 12975:2022 - Captadores solares térmicos para calentamiento de fluidos. Requisitos generales.*

AutoDesk. (s.f.). *AutoCad.* Obtenido de https://www.autodesk.com/es/products/autocad/overview?mktvar002=afc_es_nmpi_ppc&AID=11043037&PID=8227014&gclsrc=aw.ds&&cjevent=CjwKCAjwtrXFBhBiEiwAEKen1z2Zltpvwk7RDjQkx-2ViTMlI47f8cEkQPChALXNnF7ToEFY4rN8yRoCwEwQAvD_BwE&click_id=CjwKCAjwtrXFBhBiEiwAEKen1z2

European Commission. (2014). *Development of a modular, all-POLYmer SOLar thermal collector for domestic hot water preparation and space heating.* Luxemburgo.

Kingspan. (s.f.). *Kingspan-DF100-data-sheet.* Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.powernaturally.co.uk/working/content/uploads/2015/07/Kingspan-DF100-data-sheet.pdf

MathWorks. (s.f.). *Matlab.* Obtenido de <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

NACIONES UNIDAS. (s.f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible.* Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

outletPiscinas. (s.f.). Obtenido de http://outlet-piscinas.com/paneles-solares-heliocol?utm_source

SolidWorks. (s.f.). *SolidWorks*. Obtenido de <https://www.solidworks.com/es>

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	9
2.1 Tecnologías Solares Térmicas.....	9
2.2 Materiales empleados	10
2.2.1 Policarbonato	10
2.2.2 Polipropileno negro.....	10
2.2.3 Aislamiento térmico.....	11
2.2.4 Perfiles estructurales.....	11
2.3 Instrumentación y sensores	11
2.3.1 Sondas de temperatura Pt100	12
2.3.2 Piranómetro.....	12
2.3.3 Rotámetro	12
2.3.4 Piezómetro diferencial.....	12
2.4 Normativas aplicadas	13
2.5 Herramientas de diseño y simulación.....	14
2.5.1 AutoCAD y Solid Edge	14
2.5.2 MATLAB.....	15
2.6 Trabajo experimental y de construcción.....	16
2.6.1 Montaje del sistema hidráulico	16
2.6.2 Construcción del colector.....	16
2.6.3 Montaje sobre el banco de ensayo	17
2.6.4 Ajustes y mejoras prácticas	17
Capítulo 3. Estado de la Cuestión.....	18
3.1 Proyectos Destacados.....	18
3.1.1 El proyecto europeo POLYSOL.....	18
3.1.2 Performance evaluation of the Senergy polycarbonate and asphalt carbon nanotube solar water heating collectors for building integration	20
3.1.3 Norma UNE-EN 12975:2022	21

3.2	Tipos de captadores solares térmicos	22
3.3	Paneles fotovoltaicos	23
3.4	Conclusión.....	24
Capítulo 4.	Definición del Trabajo	26
4.1	Justificación.....	26
4.2	Objetivos	27
4.3	Metodología.....	30
4.4	Planificación y Estimación Económica	32
4.4.1	Estimación económica – Banco de ensayo.....	32
4.4.2	Estimación económica – Colector solar.....	33
4.4.3	Estimación económica – Sistema hidráulico e instrumentación	34
4.4.4	Estimación económica – Materiales de unión y sellado	35
4.4.5	Estimación económica – Resumen global del proyecto	36
Capítulo 5.	Sistema/Modelo Desarrollado.....	37
5.1	Introducción Técnica.....	37
5.2	Componentes del Sistema	38
5.2.1	Esquema general del sistema hidráulico.....	38
5.2.2	Tanque de almacenamiento.....	41
5.2.3	Bomba hidráulica	42
5.2.4	Vaso de expansión.....	44
5.2.5	Caudalímetro (rotámetro)	48
5.2.6	Sensores de temperatura del flujo de agua	52
5.2.7	Sensor de temperatura Ambiente.....	53
5.2.8	Piranómetro.....	54
5.2.9	Piezómetro diferencial.....	55
5.2.10	Otros elementos auxiliares	64
5.3	El Colector Solar	65
5.3.1	Importancia del colector dentro del sistema	65
5.3.2	Geometría y disposición constructiva	66
5.3.3	Sentido del flujo, ubicación de sensores y criterios de instalación	67
5.4	Análisis Energético del Colector	68
5.4.1	Introducción teórica	68

5.4.2 Teoría Radiación.....	69
5.4.3 Teoría Conducción.....	73
5.4.4 Teoría Convección.....	75
5.4.5 Propiedades térmicas de los materiales.....	78
5.4.6 Radiación solar sobre el colector.....	82
5.4.7 Calentamiento por conducción y convección.....	89
5.4.8 Pérdida de calor.....	95
5.4.9 Resumen del modelo térmico de panel solar.....	101
5.5 Ensayo y Validación.....	109
5.5.1 Procedimiento.....	109
5.5.2 Toma de datos.....	109
5.5.3 Resultados.....	110
5.5.4 Evaluación del rendimiento obtenido.....	111
5.5.5 Temperatura de estancamiento del panel sometido a insolación.....	112
Capítulo 6. Análisis de Resultados.....	113
6.1 Estudio económico.....	115
6.2 Comparación con trabajos y productos similares.....	118
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	120
Capítulo 8. Bibliografía.....	123
ANEXO I: Propiedades del aire.....	128
ANEXO II: Código de Matlab, Calor por Conducción.....	129
ANEXO II: Código de Matlab, Pérdidas por Radiación.....	131
ANEXO III: Código de Matlab, Pérdidas por Convección.....	133
ANEXO IV: Código de Matlab, Radiación Incidente sobre Colector Inclinado.....	135
ANEXO V: Tabla de mediciones.....	138

Índice de figuras

Figura 1: Esquema del circuito hidráulico.....	VI
Figura 2:Esquema 3D del prototipo.....	VIII
Figura 3:Rendimiento del colector	XI
Figure 4: Scheme of the hydraulic circuit	XIX
Figure 5: 3D Scheme of the prototype	XXI
Figure 6: Collector efficiency.....	XXIV
Figura 7:Esquema general del circuito hidráulico	39
Figura 8:Esquema 3D circuito hidráulico.....	40
Figura 9: Esquema del tanque (Mecalia energy systems, s.f.)	41
Figura 10: Esquema de caracterización de la bomba Bosch (N.Meegoda, s.f.)	42
Figura 11: Curva característica de la bomba a partir de los puntos de ensayo.....	43
Figura 12: Esquema del rotámetro (iAgua, s.f.)	49
Figura 13: Esquema manómetro hidráulico	56
Figura 14: esquema completo del manómetro de líquido dentro del sistema hidráulico	57
Figura 15:Dibujo esquemático del colector.....	66
Figura 16:Seccion placa de policarbonato celular (Leroy Merin, s.f.)	67
Figura 17:Radiación electromagnética de la luz (Universitat Oberta de Catalunya)	69
Figura 18:Irradiancia solar según longitud de onda (λ) (Wikiwand, 2025)	72
Figura 19: Tabla de número de Nusselt (Çengel, 2015).....	78
Figura 20:Emisividad según longitud de onda del Policarbonato	79
Figura 21:Reflectancia, transmitancia y absortancia (canal Cecierj, s.f.)	80
Figura 22:Transmitancia, reflectancia y transmitancia del policarbonato.....	81
Figura 23:ángulos de incidencia solar (J.A. Acosta, s.f.)	84
Figura 24:Declinación según día del año (J.A. Acosta, s.f.)	85
Figura 25:Esquema interno del colector solar (AutoDesk, s.f.)	91
Figura 26:Pérdidas por radiación según temperatura (MathWorks, s.f.).....	98
Figura 27:Pérdidas por convección natural (MathWorks, s.f.).....	101
Figura 28:Interior colector solar térmico (HOGARSENSE).....	103

Figura 29:Rendimiento	107
Figura 30: Rendimiento simplificado	108
Figura 31:Rendimiento del colector	111
Figura 32:Distribucion de costes del prototipo de laboratorio	116

Índice de tablas

Tabla 1:Elementos del sistema hidráulico	VII
Table 2:Hydraulic System Components	XX
Tabla 3: Estimación de costes del banco de ensayo	32
Tabla 4: Estimación económica colector solar	33
Tabla 5:Estimación económica instrumentación	34
Tabla 6: Estimación económica materiales de unión y sellado	35
Tabla 7: Estimación coste total del proyecto	36
Tabla 8:Elementos del sistema hidráulico	40
Tabla 9:Coeficiente de pérdida de carga de elementos	63
Tabla 10:Medidas del ensayo	109
Tabla 11: Resultados y medidas del ensayo	110
Tabla 12:CAPEX.....	116

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La transición hacia modelos de generación de energía más limpia y sostenible ya no es una opción, sino una necesidad urgente. El uso responsable de los recursos, la reducción de emisiones de CO₂ y la transición a tecnologías limpias son pilares fundamentales para afrontar los retos medioambientales, sociales y económicos actuales. En este contexto, la energía solar térmica se presenta como una alternativa real, sencilla y eficaz.

Este proyecto nace con el objetivo de demostrar que es posible construir un sistema solar térmico funcional, eficiente y accesible. El proyecto trata sobre diseñar y fabricar un colector solar de baja temperatura utilizando materiales económicos, fáciles de conseguir y trabajar, como el policarbonato. La intención es que esta solución pueda aplicarse en contextos donde el acceso a agua caliente no es sencillo: viviendas con recursos limitados, zonas rurales o situaciones de emergencia.

Lo que se busca con este prototipo no es competir con las grandes instalaciones industriales, sino ofrecer una alternativa viable para pequeñas aplicaciones domésticas. Algo que funcione, que se pueda replicar, y que no dependa de tecnología compleja ni de grandes inversiones. A lo largo del desarrollo del proyecto, se ha intentado mantener ese equilibrio entre simplicidad, eficiencia y coste.

Además del enfoque práctico, este trabajo está alineado con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente con el ODS 7, que promueve el acceso a energía asequible y limpia; el ODS 11, centrado en el desarrollo de comunidades sostenibles; y el ODS 13, que llama a actuar frente al cambio climático. Todos ellos son puntos de referencia constantes en este trabajo.

Este proyecto no pretende ser un producto final cerrado, sino una base sobre la que construir mejoras. Se ha priorizado ensayar y validar, dejando abiertas posibles líneas de optimización

para el futuro. Porque, al final, la ingeniería no consiste solo en resolver problemas técnicos, sino en buscar soluciones que tengan sentido en el mundo real.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

2.1 TECNOLOGÍAS SOLARES TÉRMICAS

La energía solar térmica constituye una de las vías más directas y eficientes para aprovechar la radiación solar con fines de generación de calor. A diferencia de la conversión fotovoltaica (que transforma la luz en electricidad), los sistemas solares térmicos convierten la radiación solar en energía térmica, habitualmente para el calentamiento de agua o de un fluido caloportador. Se trata de una tecnología madura, con décadas de desarrollo, que ha demostrado ser robusta, escalable y adaptable a contextos muy diversos: desde aplicaciones domésticas hasta usos industriales. (Wikiwand, 2025)

Los captadores solares térmicos se clasifican, de forma general, según su rango de temperatura de operación y el grado de concentración de la radiación. Entre ellos destacan, por un lado, los captadores de concentración (p. ej., cilindro-parabólicos o de torre central), capaces de alcanzar temperaturas elevadas, y, por otro, los captadores de placa plana y los de tubos de vacío, orientados a aplicaciones de baja y media temperatura. (Agencia Internacional de Energía (IEA), 2024)

En este proyecto se ha optado por el diseño y desarrollo de un captador solar de baja temperatura, sin concentración, destinado al calentamiento de agua mediante radiación directa. La elección responde a criterios de simplicidad constructiva, coste reducido y facilidad de implementación en entornos con recursos limitados. El objetivo no es competir en eficiencia absoluta con soluciones comerciales de alta complejidad, sino demostrar la viabilidad de un captador funcional, fiable y económicamente accesible, construido con materiales disponibles y técnicas sencillas de montaje.

Este enfoque permite, además de validar experimentalmente el funcionamiento del sistema, sentar las bases para su replicación en contextos donde el acceso a agua caliente constituye todavía una necesidad básica no cubierta.

2.2 MATERIALES EMPLEADOS

La selección de materiales ha sido un aspecto clave en este proyecto, ya que el objetivo principal es desarrollar un colector solar térmico de bajo coste que alcance un rendimiento óptimo. Para ello, se ha buscado un equilibrio entre propiedades térmicas adecuadas, facilidad de manipulación en el laboratorio, resistencia a la intemperie y disponibilidad económica.

2.2.1 POLICARBONATO

El elemento principal de la estructura del colector es una placa de policarbonato compacto, seleccionada por su buena transmitancia en el espectro solar (alrededor del 82 %) y su alta resistencia al impacto, lo que lo convierte en una alternativa muy robusta frente a materiales más frágiles como el vidrio. Además, su ligereza facilita tanto el transporte como el montaje, algo importante en instalaciones modestas o provisionales. Su comportamiento como material cubriente permite la entrada de radiación en el rango visible y actúa como barrera para la radiación infrarroja, ayudando a retener el calor en el interior del sistema (efecto invernadero).

2.2.2 POLIPROPILENO NEGRO

En el interior del colector se ha utilizado una lámina o elemento absorbente de polipropileno negro como superficie absorbente. Este material tiene una absorptancia muy alta ($\alpha \approx 0.95$) y una reflectancia muy baja, lo que permite aprovechar al máximo la radiación que atraviesa el policarbonato. Además, se trata de un material económico, resistente a la temperatura y fácil de fijar sobre superficies plásticas, lo que ha permitido su integración en el diseño sin necesidad de adhesivos complejos ni tratamientos adicionales.

2.2.3 AISLAMIENTO TÉRMICO

La parte posterior y los cantos del colector se han aislado térmicamente para minimizar pérdidas por conducción. Se ha empleado un aislante térmico de fácil adquisición, lo suficientemente ligero como para no comprometer la estructura, y con buena resistencia térmica. Aunque no es el foco principal del proyecto, este detalle contribuye de manera significativa al rendimiento global del sistema y ha permitido ensayar el colector en condiciones más representativas.

2.2.4 PERFILES ESTRUCTURALES

Para el soporte del colector y su integración en el banco de ensayo, se han utilizado perfiles de aluminio. Estos ofrecen una buena relación entre rigidez y peso, son fáciles de mecanizar en laboratorio y permiten variar la inclinación del colector de forma precisa y segura durante los ensayos.

En conjunto, los materiales seleccionados permiten mantener bajos los costes de construcción sin comprometer la funcionalidad ni la durabilidad del sistema. Además, han demostrado ser adecuados para trabajar en condiciones reales de laboratorio, tanto durante el montaje como en las fases de ensayo al aire libre.

(Incropera, 2011)

2.3 INSTRUMENTACIÓN Y SENSORES

Para caracterizar el rendimiento del colector solar, ha sido necesario dotar al sistema de una serie de sensores e instrumentos que permiten registrar las variables más relevantes: temperaturas, radiación solar, caudal y presión. La elección de estos elementos se ha hecho buscando el equilibrio entre precisión, sencillez de uso y coste, siempre teniendo en cuenta las limitaciones de un proyecto académico con recursos limitados.

2.3.1 SONDAS DE TEMPERATURA Pt100

Se han utilizado sondas Pt100 clase B de tres hilos, tanto para medir la temperatura del fluido a la entrada y salida del colector como para registrar la temperatura ambiente. Estas sondas son muy utilizadas en aplicaciones industriales y de laboratorio por su buena precisión y fiabilidad, incluso en condiciones variables. El uso de la configuración de tres hilos permite minimizar los errores debidos a la resistencia de los cables, algo importante al trabajar con diferencias de temperatura relativamente pequeñas.

2.3.2 PIRANÓMETRO

Para medir la irradiancia solar global incidente sobre el colector, se ha empleado un piranómetro de primera clase, modelo LPPYRA02. Este sensor permite registrar tanto la radiación directa como la difusa y proporciona datos en tiempo real de la cantidad de energía solar disponible. La información obtenida es clave para calcular el rendimiento del colector en condiciones reales y para validar los modelos teóricos con datos experimentales.

2.3.3 ROTÁMETRO

La medición del caudal del fluido caloportador se ha realizado mediante un rotámetro. Este dispositivo sencillo y mecánico permite obtener una lectura directa del caudal volumétrico con buena precisión (error inferior al 2 %), sin necesidad de alimentación eléctrica ni configuración compleja. Su uso ha resultado especialmente adecuado en este proyecto por su simplicidad, bajo coste y fiabilidad en rangos bajos de caudal como los requeridos.

2.3.4 PIEZÓMETRO DIFERENCIAL

Para determinar la pérdida de carga en el colector, se ha construido un piezómetro diferencial (manómetro en U invertido) de aire-agua. Aunque sencillo, este sistema permite medir de forma precisa la diferencia de presión entre la entrada y la salida del colector. Además, es fácilmente calibrable, no requiere mantenimiento y se adapta bien a la escala del proyecto.

Este tipo de medición es fundamental para caracterizar hidráulicamente el panel y evaluar si la resistencia al paso del fluido es aceptable para un sistema de baja potencia de bombeo.

Todos estos elementos se han integrado en el banco de ensayo con una disposición que permite recoger datos fiables sin interferir en el funcionamiento del colector. El conjunto de sensores e instrumentos ha demostrado ser suficiente para analizar con rigor el comportamiento térmico del sistema, sin recurrir a equipos de alto coste o complejidad innecesaria.

2.4 *NORMATIVAS APLICADAS*

Aunque este proyecto tiene un enfoque académico y experimental, se ha considerado fundamental seguir los criterios establecidos por la normativa vigente en el ámbito de los captadores solares térmicos. En particular, se ha tomado como referencia la norma UNE-EN 12975:2022, que establece los requisitos generales para captadores solares dedicados al calentamiento de fluidos.

Esta norma, de carácter europeo y con equivalencia directa a la EN 12975, regula aspectos clave como:

- Rendimiento térmico: define cómo debe calcularse el rendimiento bruto del captador en distintas condiciones de temperatura y localización, así como los indicadores que deben reportarse.
- Ensayos térmicos y mecánicos: especifica los procedimientos de ensayo para evaluar la durabilidad, fiabilidad y seguridad del captador.
- Condiciones de instalación y etiquetado: exige que los colectores incluyan información clara sobre dimensiones, presión de trabajo, temperatura máxima, instrucciones de montaje, etc.

- Familias de captadores: permite agrupar versiones similares de un mismo diseño bajo una misma certificación, siempre que se respeten ciertas tolerancias de diseño y rendimiento.

Atendiendo a la norma UNE-EN 12975:2022 (AENOR, 2022), se han considerado los siguientes ítems:

- Caudales de ensayo recomendados (entre 72 y 180 l/h·m²).
- Medición de temperaturas de entrada, salida y ambiente.
- Medición de radiación incidente.
- Cálculo del rendimiento térmico.
- Consideración de la temperatura de estancamiento como parámetro relevante.

La inclusión de esta normativa en el desarrollo del proyecto no solo aporta rigor técnico, sino que también facilita la comparación de resultados con otros sistemas comerciales o prototipos documentados en literatura científica. Además, permite valorar el comportamiento del colector en un marco común y reconocible dentro del ámbito de la energía solar térmica.

2.5 HERRAMIENTAS DE DISEÑO Y SIMULACIÓN

Durante el desarrollo del proyecto se ha hecho uso de varias herramientas de diseño asistido por ordenador y de simulación numérica. Estas herramientas han sido fundamentales tanto para la fase de diseño del sistema como para la evaluación de su comportamiento térmico en distintas condiciones de funcionamiento.

2.5.1 AUTOCAD Y SOLID EDGE

Para la elaboración de los esquemas hidráulicos, planos técnicos y modelos en tres dimensiones se han utilizado dos herramientas principales: AutoCAD (AutoDesk, s.f.) y SolidWorks (SolidWorks, s.f.). Estas aplicaciones han permitido diseñar de forma precisa tanto la geometría del colector como la estructura del banco de ensayo, incluyendo el

posicionamiento de los sensores, la inclinación del panel y la distribución de los distintos elementos del circuito.

Gracias a estas herramientas se han generado:

- Planos detallados del circuito hidráulico.
- Esquemas de conexión entre sensores e instrumentos.
- Modelos 3D del soporte estructural en perfiles de aluminio.
- Representaciones visuales del colector en su configuración final.

Este trabajo ha sido muy útil no solo como guía durante la fase de construcción, sino también para comunicar con claridad el diseño en esta memoria.

2.5.2 MATLAB

Para el análisis térmico y el modelado del comportamiento del colector se ha empleado el software MATLAB (MathWorks, s.f.). En concreto, se ha utilizado para:

- Calcular el flujo de calor útil absorbido por el sistema.
- Simular las pérdidas térmicas por convección natural y radiación.
- Estimar la temperatura del fluido y de la superficie del colector a lo largo del tiempo.
- Representar gráficamente resultados (como la evolución del rendimiento o la curva de temperatura de estancamiento).

El uso de MATLAB ha permitido validar teóricamente los datos experimentales y mejorar la comprensión de cómo influyen distintas variables (radiación, caudal, temperatura ambiente) en el rendimiento del sistema. Además, ha facilitado el cálculo de parámetros que no son medibles directamente en el laboratorio, como el coeficiente global de pérdidas o el número de Nusselt.

Estas herramientas han sido esenciales para estructurar el proyecto de forma rigurosa, facilitando la conexión entre la parte teórica, el diseño físico y los resultados experimentales.

2.6 TRABAJO EXPERIMENTAL Y DE CONSTRUCCIÓN

Uno de los pilares fundamentales de este proyecto ha sido el trabajo práctico realizado en laboratorio. Más allá del diseño teórico y de los cálculos, ha sido necesario construir, montar y ajustar físicamente cada parte del sistema, enfrentándose a los problemas reales que surgen en el proceso.

2.6.1 MONTAJE DEL SISTEMA HIDRÁULICO

El primer paso fue montar el circuito hidráulico completo, que incluye la bomba, el colector, el tanque de acumulación, el vaso de expansión y la instrumentación. Se utilizaron tuberías flexibles de PVC, unidas mediante adaptadores y conexiones roscadas que permitieran modificar o desmontar partes del circuito fácilmente. La colocación de válvulas de cierre y purga en puntos estratégicos facilitó tanto el montaje como la operación posterior.

2.6.2 CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR

La construcción del colector fue uno de los retos principales. Se partió de una plancha de policarbonato compacto, sobre la cual se montó un elemento absorbente negro de polipropileno como superficie absorbente. Se diseñó un sistema de cierre para los extremos que garantizase tanto la estanqueidad como la correcta circulación del agua por el interior del panel. El sellado de las conexiones, el ajuste de los racores y la colocación precisa de los sensores exigieron un trabajo minucioso y varias pruebas hasta lograr un montaje robusto y funcional.

Además, se añadió aislamiento térmico en la parte trasera y los laterales del colector para minimizar las pérdidas, y se cuidó especialmente la fijación de los sensores de temperatura en la entrada y salida del fluido, tal y como recomienda la norma UNE-EN 12975 (AENOR, 2022).

2.6.3 MONTAJE SOBRE EL BANCO DE ENSAYO

Una vez construido el colector, se instaló sobre una estructura ajustable de perfiles de aluminio, diseñada específicamente para este proyecto. Esta estructura permite modificar la inclinación del colector durante los ensayos, lo que ha sido clave para estudiar cómo varía su rendimiento según la orientación solar.

El sistema de adquisición de datos se completó con la conexión del piranómetro y los sensores a un datalogger, lo que ha permitido recoger información en tiempo real sin interferir con el funcionamiento hidráulico.

2.6.4 AJUSTES Y MEJORAS PRÁCTICAS

Durante el montaje surgieron numerosos detalles no previstos en los planos: pequeñas fugas, tolerancias entre piezas, necesidad de refuerzos o de adaptar los sensores a condiciones reales. Cada uno de estos ajustes aportó valor al diseño y permitió mejorar la fiabilidad del sistema. Esta parte del trabajo, aunque menos visible, ha sido clave para que los ensayos pudieran realizarse con éxito y seguridad.

En resumen, la fase experimental ha servido para validar el diseño en condiciones reales, enfrentarse a las limitaciones prácticas de los materiales y poner a prueba todo el sistema. Esta experiencia ha sido especialmente enriquecedora, ya que ha permitido aplicar de forma directa los conocimientos de ingeniería adquiridos durante el grado, cerrando así el ciclo completo del proyecto: desde la idea hasta el prototipo operativo.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La creciente necesidad de sustituir los combustibles fósiles por fuentes de energía más sostenibles ha motivado el desarrollo de múltiples tecnologías solares térmicas. Dentro de este marco, los colectores solares térmicos se han consolidado como una solución eficiente y accesible para la generación de calor, especialmente en aplicaciones domésticas, sanitarias, agrícolas e industriales de baja temperatura.

En el mercado actual, existen distintos tipos de colectores solares térmicos, clasificados principalmente según su temperatura de operación, materiales, y presencia de elementos de concentración solar. Los colectores de placa plana y los de tubos de vacío son los más ampliamente utilizados para aplicaciones de baja y media temperatura. A nivel comercial, se han perfeccionado con materiales metálicos como el cobre o el aluminio, incorporando vidrios templados, recubrimientos selectivos y estructuras optimizadas térmicamente.

Sin embargo, en paralelo al desarrollo industrial, han surgido investigaciones orientadas a la reducción de costes mediante el uso de materiales poliméricos y técnicas de fabricación más simples. Esto ha dado lugar a soluciones innovadoras que, aunque con rendimientos algo inferiores, permiten democratizar el acceso a esta tecnología en contextos con menos recursos.

Entre los proyectos de referencia que inspiran este trabajo destacan:

3.1 PROYECTOS DESTACADOS

3.1.1 EL PROYECTO EUROPEO POLYSOL

Uno de los antecedentes más relevantes en el ámbito de los colectores solares de bajo coste es el proyecto europeo POLYSOL (*Development of a modular, all-polymer solar thermal*

collector for domestic hot water preparation and space heating), financiado por la Comisión Europea en el marco del programa CORDIS (ID: 262149). Este proyecto planteó un enfoque innovador: desarrollar un colector solar térmico íntegramente fabricado con materiales poliméricos, con el objetivo de reducir costes, mejorar la facilidad de instalación y aumentar la durabilidad frente a la corrosión y el envejecimiento. Su aplicación estaba orientada tanto a la producción de agua caliente sanitaria como a la calefacción de espacios.

En lugar de los tradicionales metales como el cobre o el aluminio, POLYSOL apostó por materiales plásticos como el policarbonato, el polipropileno o polímeros técnicos como el PBT y ciertas poliamidas reforzadas. Estos materiales fueron seleccionados por su resistencia térmica, mecánica y a los rayos UV, además de su bajo peso y facilidad de procesado. Los colectores desarrollados en este proyecto estaban formados por módulos ensamblables que facilitaban su transporte y montaje, prescindiendo completamente del vidrio y de estructuras metálicas. Esta solución ofrecía una ventaja clara en contextos donde el coste, el peso y la accesibilidad son factores críticos.

Desde el punto de vista del rendimiento, el sistema POLYSOL consiguió eficiencias térmicas en el rango del 50 al 60 %, valores adecuados para aplicaciones de baja temperatura como el calentamiento de agua en viviendas o instalaciones rurales. Aunque estas cifras están por debajo de los colectores metálicos de alta gama, el balance entre eficiencia y coste resultaba favorable. Además, los colectores superaron ensayos de durabilidad, resistencia a la presión, impactos y ciclos térmicos acelerados, con estimaciones de vida útil superiores a diez años. Si bien el proyecto se basó en la normativa europea previa (EN 12975:2006), muchos de los ensayos son compatibles con los principios recogidos en la norma UNE-EN 12975:2022.

En el ámbito económico, el proyecto POLYSOL requirió de una inversión que alcanzó prácticamente 1,5 millones de euros. Gran parte de este capital fue aportado por el departamento de Energías Renovables Aplicadas, de la UE. Aportando un total de 1 115 500€.

Se crearon varios modelos diferentes, y se enviaron a ser ensayados a diferentes lugares:

- 1 unidad permaneció en Macedonia
- 1 unidad se envió a ERA (España)
- 2 unidades fueron enviadas a ITW (Alemania)
- 1 unidad se envió Ezinc (Turquía)

La experiencia de POLYSOL valida, por tanto, el planteamiento técnico de utilizar materiales plásticos como alternativa viable en colectores solares térmicos de bajo coste. También refuerza la elección del policarbonato como material estructural y transparente, así como del polipropileno negro como superficie absorbente. El proyecto demuestra que, con un diseño adecuado, es posible obtener soluciones funcionales y eficientes para contextos donde las soluciones comerciales estándar no son viables. Su enfoque se alinea directamente con los objetivos de este trabajo: ofrecer una alternativa accesible, eficiente y replicable para la producción de agua caliente mediante energía solar en entornos con recursos limitados. (European Commission, 2014)

3.1.2 PERFORMANCE EVALUATION OF THE SENERGY POLYCARBONATE AND ASPHALT CARBON NANOTUBE SOLAR WATER HEATING COLLECTORS FOR BUILDING INTEGRATION

En este estudio se desarrolló y analizó experimentalmente un colector solar térmico destinado a la integración en edificios, basado en policarbonato transparente como cubierta y un recubrimiento interno de nanotubos de carbono sobre una base de asfalto como superficie absorbente. El enfoque del proyecto se orientaba a crear una solución de bajo coste, resistente y con prestaciones térmicas competitivas para aplicaciones urbanas.

El elemento distintivo de este trabajo fue el uso de nanotubos de carbono (CNTs) como aditivo en la capa absorbente. Los CNTs se caracterizan por su altísima absorción en el espectro solar ($\alpha > 0.97$), excelente conductividad térmica y estabilidad química, lo que los convierte en un material prometedor para mejorar la eficiencia de captación sin recurrir a

metales caros. La combinación de estos nanotubos con una matriz bituminosa permitió una fabricación sencilla, por medio de técnicas de recubrimiento por deposición.

El colector desarrollado estaba compuesto por una placa frontal de policarbonato de doble pared (honeycomb) con alta transmitancia ($\tau \approx 0.82$) y elevada resistencia al impacto, un aspecto clave para instalaciones exteriores. Bajo esta cubierta se situaba el absorbente compuesto por una mezcla de asfalto y CNTs, aplicada sobre una base metálica delgada. El diseño incluía una cámara de circulación de agua por tubos de polietileno, fijados directamente al absorbente.

Durante los ensayos en condiciones reales, el colector mostró una eficiencia máxima del 62 %, con valores estables en el rango del 55–60 % bajo radiación de 700–900 W/m². Los coeficientes de pérdida térmica obtenidos fueron moderados (6–8 W/m²·K), lo que indica un buen aislamiento y comportamiento térmico aceptable para aplicaciones de baja temperatura (≤ 70 °C). Las pruebas se realizaron a caudales de entre 0.5 y 1 L/min·m², en línea con lo establecido en normas como la UNE-EN 12975:2022, que recomienda trabajar en el intervalo de 72 a 180 L/h·m².

Desde el punto de vista constructivo, el sistema demostró ser robusto, económico y de fácil integración arquitectónica. Se destacaron también las ventajas del policarbonato como cubierta: bajo peso, buena resistencia UV (cuando incluye aditivo protector), y suficiente capacidad estructural para entornos exteriores sin necesidad de marcos metálicos pesados.

Para el presente proyecto, este caso proporciona datos relevantes: confirma la viabilidad de emplear policarbonato como material frontal, y valida el uso de materiales absorbentes alternativos de bajo coste, como compuestos de matriz polimérica mejorados con nanotubos.(Otanicar, 2013)

3.1.3 NORMA UNE-EN 12975:2022

Asimismo, la norma UNE-EN 12975:2022 (AENOR, 2022), de referencia obligatoria en el ámbito de los captadores solares térmicos, recoge los criterios que deben cumplir estos dispositivos para asegurar su durabilidad, fiabilidad y seguridad. Incluye especificaciones para su rendimiento térmico bruto bajo distintas condiciones climáticas, así como ensayos mecánicos, de impacto, estanquidad, resistencia térmica y etiquetado técnico. Si bien

muchos de los ensayos recogidos en la norma están pensados para certificación industrial, su estructura ofrece una excelente base metodológica para proyectos académicos como el presente.

3.2 TIPOS DE CAPTADORES SOLARES TÉRMICOS

Colectores de placa plana

Son los más comunes en aplicaciones domésticas. Están compuestos por una carcasa aislada, una cubierta transparente (habitualmente vidrio) y una placa absorbente en contacto con tubos por los que circula el fluido caloportador. Presentan un rendimiento eficiente con un coste razonable, trabajando en rangos típicos de 30 a 80 °C. Su eficiencia disminuye en climas fríos o con baja radiación, y sus pérdidas térmicas por convección y radiación son moderadas. (Olczak, Matuszewska, & Zabagło, 2020)

Colectores de tubos de vacío

Compuestos por tubos de vidrio dobles al vacío que encierran un absorbedor metálico. Estos colectores reducen drásticamente las pérdidas térmicas al eliminar la convección y la mayoría de la conducción. Son más eficientes que los de placa plana, especialmente en condiciones frías o nubosas, y permiten alcanzar temperaturas superiores (hasta 150 °C). Su principal desventaja es el precio elevado y la fragilidad de los tubos de vidrio.

Colectores sin cubierta (no vidriados)

Se trata de sistemas sencillos, sin cubierta transparente ni aislamiento, normalmente fabricados con tubos plásticos negros. Son baratos y fáciles de instalar, pero solo adecuados para climas cálidos, ya que tienen pérdidas térmicas elevadas. Se usan típicamente para calentar agua en piscinas.

Colectores de concentración (CSP)

Estos sistemas utilizan superficies reflectantes (espejos o lentes) para concentrar la radiación solar en un punto o línea focal, elevando la temperatura del fluido a valores muy altos

(incluso $>400\text{ }^{\circ}\text{C}$). Los más conocidos son los cilindro-parabólicos y las torres solares. Son adecuados para generación eléctrica a gran escala, pero no son viables en aplicaciones domésticas o de bajo presupuesto, como la del presente proyecto.

Colectores híbridos (PV-T)

Integran células fotovoltaicas con un sistema de refrigeración mediante fluido, generando simultáneamente electricidad y calor. Aunque prometedores, son más complejos y costosos, y requieren una gestión térmica optimizada para evitar el sobrecalentamiento de las células.

Además de los captadores solares térmicos, en el ámbito de la energía solar existen los paneles solares fotovoltaicos, que transforman directamente la radiación solar en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico. Aunque su principio de funcionamiento es muy distinto al de los colectores térmicos, es importante mencionarlos para delimitar claramente el campo de aplicación del presente proyecto y evitar confusiones, ya que ambas tecnologías comparten componentes como el plano de captación, la necesidad de orientación solar, y una creciente presencia en entornos residenciales y rurales.

3.3 PANELES FOTOVOLTAICOS

Los paneles fotovoltaicos están compuestos por células solares, normalmente de silicio, que al ser expuestas a la luz solar generan una corriente eléctrica. Las células se conectan en serie o paralelo para formar módulos capaces de entregar una tensión y una potencia aprovechables. El rendimiento típico de conversión eléctrica de una célula fotovoltaica comercial ronda entre el 15 % y el 22 %, aunque en condiciones de laboratorio se han alcanzado eficiencias superiores al 40 % con células multijunción.

A diferencia de los colectores térmicos, cuyo rendimiento puede superar el 60 % bajo buenas condiciones, los paneles fotovoltaicos ofrecen menos eficiencia energética total, pero con la ventaja de que la electricidad generada puede almacenarse, transformarse o transportarse fácilmente. Esto los hace muy adecuados para aplicaciones donde la prioridad es la

generación de energía eléctrica, como iluminación, alimentación de electrodomésticos o carga de baterías.

En términos constructivos, los paneles fotovoltaicos suelen estar encapsulados en estructuras de vidrio templado y polímeros (como EVA y tedlar) que protegen las células de la humedad y los impactos. Pueden instalarse sobre tejados, fachadas, o en estructuras independientes. Existen también versiones flexibles, semitransparentes o integradas arquitectónicamente (BIPV), aunque con mayores costes.

Desde el punto de vista del mercado, los paneles fotovoltaicos han alcanzado un grado de madurez industrial y estandarización superior al de los captadores térmicos. Sin embargo, para aplicaciones que requieren agua caliente sanitaria, calefacción por suelo radiante, o apoyo térmico en procesos industriales, la opción térmica sigue siendo más eficiente y directa, especialmente en climas con buena irradiación solar y donde se prioriza la producción de calor sobre la electricidad.

Por ello, aunque en ocasiones se plantea la sustitución de los sistemas solares térmicos por paneles fotovoltaicos conectados a resistencias eléctricas, esta solución conlleva una pérdida de rendimiento global y una mayor dependencia de componentes electrónicos, lo cual puede resultar menos conveniente en contextos donde la simplicidad, el coste y la autonomía energética son prioritarios. (Fernández-Solas, Micheli, Almonacid, & Fernández, 2021)

3.4 CONCLUSIÓN

El presente trabajo se sitúa claramente en el ámbito de los colectores solares térmicos de baja temperatura, específicamente de tipo placa plana, aunque con una particularidad: el uso de materiales plásticos (policarbonato y polipropileno) en lugar de los habituales metales y vidrio. Esto permite reducir costes sin renunciar a un diseño funcional que siga los principios básicos de la transferencia térmica por radiación, conducción y convección interna.

Por tanto, el estado actual de la cuestión revela dos líneas principales: por un lado, una industria consolidada basada en metales y componentes de alta calidad, orientada a instalaciones duraderas y eficientes; y por otro, una línea emergente de proyectos experimentales que, utilizando materiales como el policarbonato, buscan soluciones accesibles y replicables.

En este contexto se sitúa el presente proyecto, cuyo objetivo es diseñar, construir y ensayar un colector solar térmico de bajo coste, basado en materiales poliméricos y técnicas sencillas, sin renunciar a una caracterización técnica rigurosa. Aprovechando el conocimiento previo, se busca validar un sistema funcional para aplicaciones donde la disponibilidad de agua caliente es esencial, pero los recursos económicos son limitados.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

La revisión del estado de la cuestión ha puesto de manifiesto una realidad dual en el sector de los captadores solares térmicos. Por un lado, existen soluciones comerciales altamente optimizadas, con altos rendimientos y materiales de primera calidad como el vidrio templado y el cobre, pero cuyo coste, complejidad de instalación y dependencia de infraestructura industrial las hacen inaccesibles para muchas aplicaciones. Por otro lado, algunos trabajos experimentales, como el proyecto europeo POLYSOL o los diseños con nanotubos de carbono, han demostrado que es posible fabricar colectores funcionales y duraderos utilizando materiales plásticos, pero estas soluciones no han llegado a consolidarse en el mercado ni están disponibles para su réplica a pequeña escala.

En este vacío de mercado es donde se sitúa y se justifica el presente proyecto. Hoy en día no existe un modelo de colector solar térmico de bajo coste, fácil de replicar y técnicamente caracterizado, que pueda construirse con herramientas y materiales de fácil acceso por parte de usuarios no especializados. En otras palabras, hay una carencia clara de soluciones prácticas y documentadas que ofrezcan una alternativa real a comunidades rurales, viviendas con recursos limitados, pequeñas explotaciones agrícolas o entornos de emergencia humanitaria, donde el acceso a agua caliente no está garantizado.

La propuesta de este proyecto no es competir en eficiencia con los captadores de gama alta, sino ofrecer una solución técnica viable, funcional y replicable, que funcione con materiales económicos y disponibles comercialmente como el policarbonato celular y el polipropileno negro, sin necesidad de procesos industriales ni conocimientos avanzados para su construcción.

El diseño desarrollado está basado en criterios de ingeniería térmica y cumple los principios fundamentales establecidos en la norma UNE-EN 12975:2022, lo que garantiza una aproximación rigurosa tanto en los ensayos como en el análisis del rendimiento.

Este proyecto es, por tanto, una respuesta concreta a una necesidad: disponer de un colector solar térmico de bajo coste, validado técnicamente, que pueda ser montado con medios modestos, que funcione de verdad, y que pueda tener un impacto real en zonas donde otras soluciones no llegan. Desde la perspectiva comercial o de inversión, el valor está en su potencial de escalado, adaptación y multiplicación: cualquier comunidad, ONG, institución educativa o particular con necesidades térmicas básicas podría beneficiarse de este diseño sin tener que recurrir a sistemas costosos o dependientes de la red eléctrica.

4.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es diseñar, construir y ensayar un colector solar térmico de bajo coste, que sea funcional, eficiente y replicable, utilizando materiales accesibles y una metodología de fabricación sencilla. Esta solución se plantea como alternativa práctica para contextos en los que el acceso a agua caliente es limitado por razones económicas, logísticas o sociales.

Para alcanzar este objetivo general, se han definido los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar un colector solar térmico basado en materiales plásticos y poliméricos.

Concretamente policarbonato transparente para la cubierta y estructura, y polipropileno negro como superficie absorbente. La geometría del sistema se definirá con criterios de simplicidad, eficiencia térmica y facilidad de fabricación.

Para diseñarlo correctamente, se deberán fijar a su vez varios objetivos:

Se diseñará en primer lugar un colector de dimensiones reducidas para comprobar el funcionamiento del aislante y la estanquidad del colector antes de construir el modelo a tamaño real.

El colector destinado al ensayo deberá tener unas dimensiones estándar, 1m x 1m. Esto permite la replicación y la comparación con diferentes ensayos y proyectos.

2. Desarrollar un banco de ensayo hidráulico y térmico completo.

Permite evaluar el comportamiento del colector en condiciones reales de operación, incluyendo sistema de bombeo, sensores de temperatura, caudalímetro, piranómetro y adquisición de datos.

El banco deberá soportar el peso de todos los elementos en su lugar de funcionamiento de forma estable.

La estructura que sostiene el colector solar debe permitir la inclinación de este. El ángulo que debe poder alcanzar el colector varío desde los 90° hasta los 10° con la horizontal del suelo.

3. Construir el prototipo físico del colector.

Implementando soluciones de unión, sellado e integración con el circuito hidráulico, optimizadas para garantizar estanqueidad, robustez y rendimiento térmico sin comprometer la economía del diseño.

El colector final deberá superar una prueba de estanquidad que asegure que está preparado para funcionar durante los ensayos sin llegar a fugar. Esta prueba se realizará con el colector separado del circuito, y se repetirá con el colector funcionando en su lugar en el circuito hidráulico, con el flujo de agua recorriendo el colector.

La parte posterior del colector deberá estar aislada térmicamente del exterior, para evitar flujos de calor indeseados, y que afectarían a la precisión de las medidas.

4. Realizar ensayos experimentales para caracterizar térmicamente el colector.

Se medirá la temperatura de entrada y salida del fluido, la temperatura ambiente, la radiación solar incidente y el caudal circulante. A partir de estos datos, se calculará la eficiencia térmica del sistema.

El lugar destinado al ensayo deberá ser un lugar abierto al ambiente, sin sombras que puedan interferir con las medidas.

Durante los ensayos, el colector deberá estar orientado hacia el sur geográfico.

Los ensayos se realizarán durante días despejados, en verano, y durante las horas de máxima incidencia solar.

5. Comparar los resultados obtenidos con los estándares técnicos de referencia

Se compararán los resultados con proyectos similares y otros tipos de colectores para verificar si el comportamiento del colector cumple con los criterios mínimos aceptables en términos de rendimiento y diseño.

6. Analizar las pérdidas térmicas del sistema

Por radiación, convección y conducción. Estimar la temperatura de estancamiento y el rendimiento óptico, para comprender los límites operativos del colector y su comportamiento en diferentes condiciones climáticas.

7. Evaluar la viabilidad técnica y económica del prototipo

Proponiendo posibles mejoras de diseño, materiales o configuración que permitan su adaptación a diferentes entornos o necesidades específicas.

A través de estos objetivos, el proyecto pretende demostrar que es posible construir un sistema solar térmico eficaz y de bajo coste con medios sencillos, contribuyendo así al acceso universal a tecnologías energéticas limpias y asequibles.

4.3 METODOLOGÍA

La metodología adoptada para el desarrollo del presente proyecto se estructura en tres fases diferenciadas: diseño, construcción y ensayo y análisis de resultados. Cada una de ellas responde a los objetivos definidos previamente, y se aborda con criterios de ingeniería experimental, aplicando herramientas de diseño, selección racional de materiales y métodos de validación técnica basados en normativa.

Fase de diseño

En esta etapa se lleva a cabo el estudio técnico de viabilidad, la definición funcional del sistema y el diseño detallado del colector solar térmico y del banco de ensayo asociado. Para ello se emplean herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD), como AutoCAD y Solid Edge, con las que se generan:

- Esquemas hidráulicos y planos técnicos del circuito completo.
- Modelos 3D del colector y de su estructura soporte.
- Planificación geométrica de sensores, conexiones y puntos de medición.

Se seleccionan los materiales y componentes comerciales atendiendo a criterios de coste, disponibilidad, propiedades térmicas y facilidad de integración. Además, se definen las condiciones de ensayo y las variables de interés conforme a la norma UNE-EN 12975:2022.

Fase de construcción

Una vez finalizado el diseño, se procede a la fabricación del prototipo y al montaje del banco de ensayo. Esta fase contempla:

- Fabricación del colector a partir de una placa de policarbonato celular, sellado perimetral, integración de la superficie absorbente de polipropileno y aplicación de aislamiento térmico en zonas críticas.

- Montaje de conexiones hidráulicas, incluyendo válvulas, tuberías de PVC flexible, adaptadores y sensores de temperatura mediante racores estancos.
- Instalación de instrumentación, entre la que se incluyen sensores Pt100, piranómetro, rotámetro y manómetro de columna líquida, conectados a un sistema de adquisición de datos (datalogger).
- Construcción de la estructura soporte, a base de perfiles de aluminio regulables en inclinación, que permite orientar el colector en diferentes ángulos durante los ensayos.

Fase de ensayo y análisis de resultados

El prototipo se somete a una campaña de ensayos experimentales en condiciones reales de radiación solar. Durante los ensayos:

- Se miden de forma continua la temperatura de entrada y salida del fluido, la temperatura ambiente, el caudal y la radiación solar incidente sobre el plano del colector.
- Se evalúa la potencia térmica útil transferida al fluido y se calcula la eficiencia térmica instantánea del sistema para distintos regímenes de funcionamiento.
- Se emplea el software MATLAB para el tratamiento de datos, el ajuste de modelos y la representación gráfica de resultados.

Adicionalmente, se estiman las pérdidas térmicas por radiación y convección mediante formulaciones teóricas y simulaciones numéricas, lo que permite comparar el rendimiento experimental con el comportamiento térmico previsto.

Finalmente, se realiza una comparación técnica con los criterios establecidos en la norma UNE-EN 12975:2022 (AENOR, 2022), con el fin de situar el rendimiento del prototipo en un marco técnico normalizado y evaluar su viabilidad como solución de bajo coste para aplicaciones reales.

4.4 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

4.4.1 ESTIMACIÓN ECONÓMICA – BANCO DE ENSAYO

Para el desarrollo del banco de ensayo del colector solar térmico, se ha llevado a cabo una selección de componentes estructurales basada en perfiles de aluminio y accesorios normalizados de ensamblaje mecánico. Esta solución permite una estructura modular, resistente y fácilmente ajustable, que soporta de forma segura tanto el colector como los elementos hidráulicos e instrumentación asociada.

A continuación, se presenta el desglose económico detallado del banco de ensayo, incluyendo el número de unidades necesarias, precio unitario sin IVA y coste total por partida:

Tabla 3: Estimación de costes del banco de ensayo

Elemento	Cantidad	Precio unitario (€)	Coste total (€)
Guía para puerta plegable	2	17,75	35,50
Perfil de aluminio 45x45 UL (m)	22,373	15,12	338,28
Pie regulable 30 compacto	4	4,99	19,96
Tapa 45x45 aluminio	22	3,75	82,50
Escuadra 45 GD con tuerca con freno	39	3,90	152,10
Asa 135 gris	1	4,73	4,73
Bisagra desmontable L 45/45	4	10,45	41,80
Tornillo M8x16 cabeza plana (cincado)	71	0,20	14,20
Tuerca deslizante M8 (cincada)	71	0,35	24,85
Tope fin de recorrido 25	4	1,99	7,96
Placa de adaptación 30	4	17,15	68,60

Elemento	Cantidad	Precio unitario (€)	Coste total (€)
Rail LR 6 compact	1	71,50	71,50
Carro deslizante LR 6 compact (PEUHMW)	1	45,20	45,20
TOTAL (sin IVA)			907,18 €

Este coste corresponde exclusivamente a la estructura soporte del sistema, es decir, el banco sobre el que se instala el colector y el circuito hidráulico, incluyendo las guías, el sistema de inclinación ajustable y los elementos mecánicos auxiliares.

4.4.2 ESTIMACIÓN ECONÓMICA – COLECTOR SOLAR

El coste del colector solar se determina a partir de los materiales principales que lo componen: la placa de policarbonato que actúa como cuerpo estructural y cubierta transparente, los elementos absorbentes de polipropileno negro que funcionan como superficie absorbente, y el material aislante situado en la parte posterior y laterales del panel. A continuación, se presenta el desglose económico correspondiente:

Tabla 4: Estimación económica colector solar

Elemento	Cantidad	Precio unitario (€)	Coste total (€)
Placa de policarbonato celular	1 unidad (1 m × 1 m)	35,00	35,00
Elemento absorbente de polipropileno negro	5 m (aprox.)	1,80 €/m	9,00
Aislante térmico (trasera y bordes)	1 unidad (panel)	7,00	7,00
TOTAL (sin IVA)			51,00 €

Esta estimación incluye exclusivamente los materiales principales que conforman el colector. No contempla aún los elementos de unión, fijación o sellado (adhesivos, masillas, racores), que se reflejarán en una tabla adicional si se desea un desglose completo.

4.4.3 ESTIMACIÓN ECONÓMICA – SISTEMA HIDRÁULICO E INSTRUMENTACIÓN

El sistema hidráulico y de instrumentación constituye el núcleo funcional del colector solar térmico. Está compuesto por los elementos necesarios para hacer circular el fluido caloportador a través del colector, controlar el caudal, registrar las temperaturas y medir la radiación solar incidente. Además, incorpora el sistema de acumulación térmica, la expansión del volumen de agua, y todos los sensores e interfaces necesarios para la caracterización térmica del panel.

La selección de componentes responde a criterios de precisión, fiabilidad, compatibilidad con el diseño del banco y, especialmente, contención de costes. A continuación, se detalla el coste estimado de cada uno de los elementos principales del sistema:

Tabla 5: Estimación económica instrumentación

Elemento	Cantidad	Precio unitario (€)	Coste total (€)
Bomba hidráulica (Bosch Copreci)	1	23,50	23,50
Tanque acumulador 30 L (con resistencia y termostato)	1	78,00	78,00
Vaso de expansión 5 L (modelo 5 AMR-E)	1	18,00	18,00
Caudalímetro (rotámetro 0–250 l/h)	1	42,00	42,00
Manómetro de columna líquida	1	9,00	9,00
Sensor de temperatura Pt100 (entrada)	1	18,00	18,00
Sensor de temperatura Pt100 (salida)	1	18,00	18,00
Sensor de temperatura Pt100 (ambiente)	1	18,00	18,00
Piranómetro (modelo LPPYRA02)	1	210,00	210,00
Datalogger multicanal	1	145,00	145,00

Elemento	Cantidad	Precio unitario (€)	Coste total (€)
Termómetro analógico ambiente	1	5,00	5,00
Válvulas de cierre y purga	8 (total)	3,50	28,00
Tuberías de PVC flexible (16 mm Ø)	5 m	2,20	11,00
Racores, adaptadores, tuercas	Conjunto	25,00	25,00
TOTAL (sin IVA)			648,50 €

4.4.4 ESTIMACIÓN ECONÓMICA – MATERIALES DE UNIÓN Y SELLADO

Para asegurar la integridad hidráulica y mecánica del colector, se emplean adhesivos y selladores técnicos compatibles con policarbonato, PVC y polipropileno. Se han realizado pruebas con distintos productos hasta encontrar las combinaciones más eficaces. A continuación, se presenta la estimación económica de los productos finalmente utilizados:

Tabla 6: Estimación económica materiales de unión y sellado

Elemento	Cantidad estimada	Precio unitario (€) °	Coste total (€)
Adhesivo híbrido TOTAL TECH (Ceys)	2 tubos	9,50	19,00
Masilla bicomponente TEROSON MS939	1 cartucho	16,00	16,00
Masilla epoxi para plásticos	1 unidad	7,50	7,50
Silicona neutra transparente (acabados)	1 cartucho	5,90	5,90
Limpiador de superficies técnicas	1 bote	6,50	6,50
Guantes, espátulas y consumibles	Lote	5,00	5,00
TOTAL (sin IVA)			59,90 €

4.4.5 ESTIMACIÓN ECONÓMICA – RESUMEN GLOBAL DEL PROYECTO

Tabla 7: Estimación coste total del proyecto

Partida	Coste total (€)
Banco de ensayo (estructura y soporte)	907,18
Colector solar (materiales principales)	51,00
Sistema hidráulico e instrumentación	648,50
Materiales de unión y sellado	59,90
TOTAL, GENERAL (sin IVA)	1.666,58 €

Este presupuesto representa el coste técnico total del prototipo, excluyendo la mano de obra, herramientas ya disponibles en el laboratorio y costes indirectos (como transporte, electricidad o horas de ensayo). El coste final confirma que el sistema completo (incluido banco, colector e instrumentación) se ha desarrollado con una inversión muy contenida, alineada con el objetivo principal del proyecto: demostrar la viabilidad técnica de un colector solar térmico funcional y de bajo coste.

Capítulo 5. SISTEMA/MODELO DESARROLLADO

5.1 INTRODUCCIÓN TÉCNICA

El presente capítulo describe el sistema completo desarrollado para la caracterización térmica e hidráulica de un colector solar térmico de bajo coste. Este sistema constituye el núcleo experimental del proyecto, y ha sido diseñado con el objetivo de permitir la evaluación rigurosa del rendimiento térmico del colector en condiciones reales, siguiendo los principios establecidos por la norma UNE-EN 12975:2022.

El sistema desarrollado está compuesto por un conjunto de componentes hidráulicos, instrumentación de medida, sensores, estructura soporte y un banco de ensayo regulable en inclinación. Todos los elementos han sido cuidadosamente seleccionados para garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos, al tiempo que se mantiene el enfoque de bajo coste y accesibilidad que define este trabajo.

El colector solar térmico, fabricado principalmente en policarbonato y polipropileno, constituye el elemento central del sistema. Alrededor de él se organiza un circuito hidráulico cerrado que permite la circulación controlada de un fluido caloportador (agua), la medición de temperaturas en distintos puntos clave, el registro de caudal y presión diferencial, así como la captación de la radiación solar incidente sobre el plano del captador.

La estructura de soporte permite variar la inclinación del colector para estudiar su comportamiento bajo diferentes ángulos de incidencia solar, y se ha construido mediante perfiles de aluminio por su facilidad de montaje, resistencia y bajo peso.

En las siguientes secciones se describen en detalle todos los componentes del sistema, sus especificaciones técnicas, su disposición dentro del circuito y su papel dentro de la caracterización experimental. Se abordan también aspectos de diseño, selección de

materiales, criterios normativos y cálculos técnicos que justifican cada una de las elecciones realizadas.

5.2 COMPONENTES DEL SISTEMA

5.2.1 ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA HIDRÁULICO

En primer lugar, es crucial comprender el circuito hidráulico completo, los elementos por los que este está formado y su colocación y disposición.

La figura 2 representa un esquema 2D del circuito hidráulico. En este se representan todos los elementos que componen el circuito hidráulico.

El sentido de circulación es horario, indicado en la figura 4.

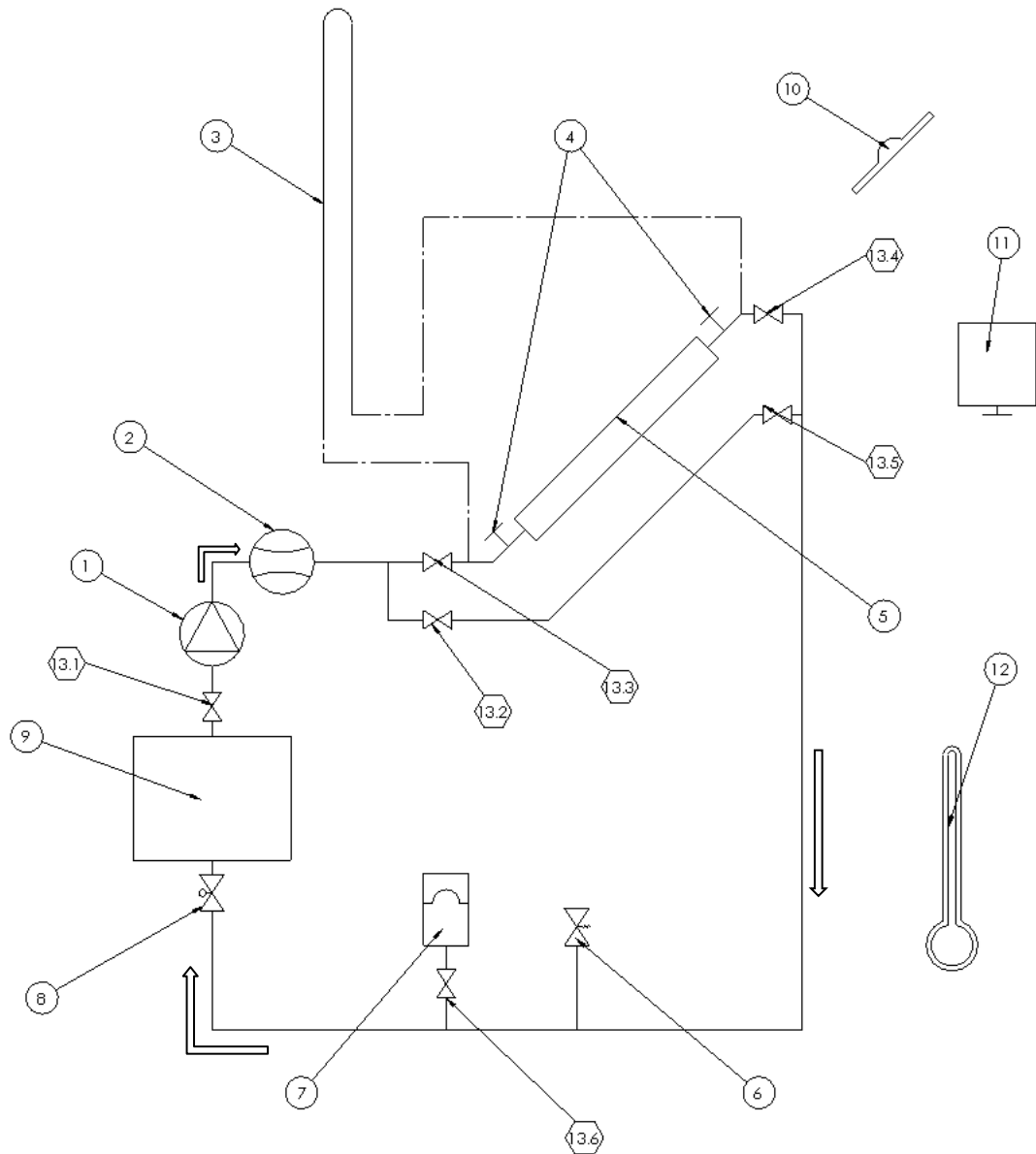


Figura 7: Esquema general del circuito hidráulico

Tabla 8: Elementos del sistema hidráulico

ETIQUETA	NOMBRE	CANTIDAD
1	Bomba Hidráulica	1
2	Caudalímetro	1
3	Piezómetro diferencial	1
4	Sensor de temperatura	2
5	Colector solar	1
6	Válvula de purga	1
7	Vaso de expansión	1
8	Válvula de control de caudal	1
9	Termo	1
10	Piranómetro	6
11	Datalogger	1
12	Termómetro	1
13	Válvulas de corte	1



Figura 8: Esquema 3D circuito hidráulico

5.2.2 TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Permite el almacenamiento del agua del circuito y elevar rápidamente su temperatura a valores controlados, al objeto de ensayar el panel a diferentes temperaturas del fluido caloportador. Está fabricado en acero. Dispone de termostato de ajuste de temperatura y sensor de temperatura del agua almacenada. La capacidad del tanque es de 30 litros.

Sus dimensiones son:

D: diámetro exterior = 35cm

d: diámetro interior = $35\text{cm} - 2 \cdot 2\text{cm} = 31\text{cm}$

h: altura del tanque = 40cm

La disposición de este elemento es vertical hacia abajo para facilitar la purga del aire y que siempre esté inundado de agua.

El esquema del tanque es el siguiente:

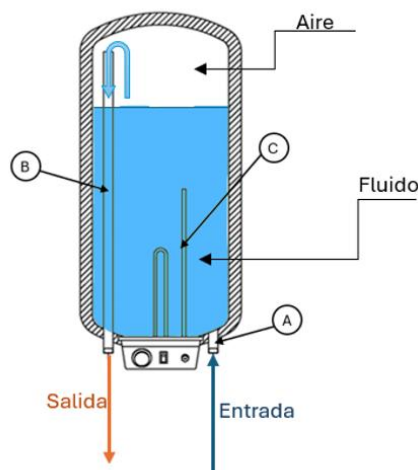


Figura 9: Esquema del tanque (Mecalia energy systems, s.f.)

- A: Tubería de entrada de agua.
- B: Tubería de salida, de salida de agua. Esta disposición elevada asegura la purga del tanque.
- C: Resistencia eléctrica de calentamiento del agua queda siempre inundada de agua, evitando que se queme.

El tanque cuenta además con un manómetro para la medida de la presión interna del mismo.

5.2.3 BOMBA HIDRÁULICA

Permite la circulación del flujo por el circuito hidráulico. Dado que la previsión de pérdida de carga prevista es pequeña (detalle en apartado de cálculos), y el caudal impulsado también es pequeño ($72 \text{ kg/h} \cdot \text{m}^2$), se empleará una bomba rotodinámica de desagüe de lavadora, en concreto, marca Bosch, modelo Copreci 2KEBS111/147. Dado que el panel previsto para los ensayos tiene un 1 m^2 de superficie, el caudal de ensayo es 72 l/h .

Tras ser ensayada en laboratorio (figura 2), la bomba Bosch seleccionada aporta una altura de $2,3 \text{ m}$ a caudal nulo, y un caudal máximo de 393 l/h a presión diferencial nula.

El esquema del ensayo de la bomba es el siguiente:

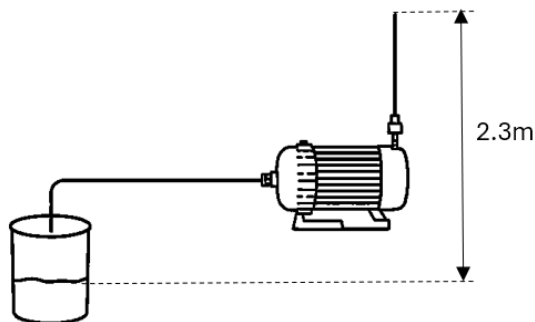


Figura 10: Esquema de caracterización de la bomba Bosch (N.Meegoda, s.f.)

Con estos dos puntos de ensayo, y suponiendo el comportamiento de la bomba determinado por una ecuación característica tipo parábola:

$$H = H_0 \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right)^2 \right]$$

Donde:

$H(Q)$: altura efectiva (mca) que la bomba es capaz de suministrar dado un caudal Q .

H_0 : altura efectiva máxima (2.3m)

$Q_{\max}$: caudal máximo de la bomba. (393 l/h)

Esta ecuación está representada gráficamente como la curva característica (figura 6):

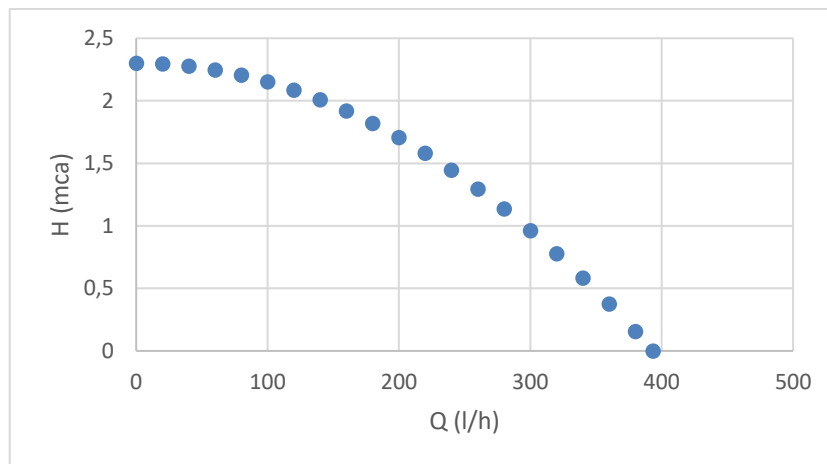


Figura 11: Curva característica de la bomba a partir de los puntos de ensayo

La bomba seleccionada es la mínima necesaria para cumplir los requisitos de caudal y pérdida de carga del sistema.

Se ha calculado una pérdida de carga global del sistema de 1,1 cmca = 0,011 mca aproximadamente. Por ello, la bomba es suficientemente potente como para impulsar el agua a través de todo el circuito.

5.2.4 VASO DE EXPANSIÓN

El vaso de expansión es un componente esencial en los sistemas solares térmicos de circuito cerrado. Su función principal es absorber los aumentos de volumen del fluido caloportador cuando este se dilata debido al incremento de temperatura. Esta dilatación puede generar sobrepresiones en el sistema que comprometan la seguridad y el correcto funcionamiento de este, especialmente en colectores cerrados y expuestos a insolación directa. El vaso de expansión que se emplea habitualmente en instalaciones de calefacción o energía solar térmica es de tipo cerrado, con una membrana interior flexible. Esta membrana separa el fluido caloportador del gas precargado (normalmente aire o nitrógeno), de forma que, al aumentar la temperatura del agua, esta penetra en el vaso y comprime la membrana. Cuando la temperatura baja, el gas precargado impulsa nuevamente el fluido hacia el circuito, manteniendo constante la presión del sistema.

Para garantizar su correcto funcionamiento, el vaso debe instalarse en el retorno del circuito hidráulico, lo más cerca posible de la bomba, y antes del tanque. Su precarga debe coincidir con la presión estática del sistema más 0,2 bar como margen de seguridad.

5.2.4.1 Cálculo de la dilatación térmica del sistema

Es crucial para el dimensionamiento y elección del vaso de expansión tener en cuenta la dilatación térmica que sufre tanto el fluido, como el sistema hidráulico.

Volumen a temperatura ambiente del sistema:

El volumen total del sistema se divide en el volumen del tanque, el volumen de las tuberías y el volumen del colector solar.

$$V_{tot} = V_{tanque} + V_{colector} + V_{tuberias}$$

$$V_{tuberias} = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L \approx 1L$$

Donde:

$$V_{\text{tanque}} = 30L$$

$$V_{\text{colector}} = 10L$$

$$V_{\text{tuberías}} = 1L$$

Por lo que el volumen total de la instalación, a temperatura ambiente, es:

$$V_{\text{tot}} = 41L$$

Dilatación del volumen de agua:

La dilatación del volumen de agua depende del coeficiente de expansión térmica volumétrica β . Para el agua entre 20 °C y 90 °C se puede tomar:

$$\beta = 0,00045 \text{ K}^{-1}$$

Si se considera un aumento de temperatura desde 20 °C hasta 90 °C:

$$\Delta T = 90 - 20 = 70K$$

$$\Delta V_{\text{agua}} = V_{\text{total}} \cdot \beta \cdot \Delta T = 1,29L$$

Dilatación del sistema hidráulico:

El volumen dilatado para el tanque de almacenamiento se calcula como:

$$\Delta V_{\text{tanque}} = 3 \cdot \alpha_{\text{acero}} \cdot \Delta T \cdot V_{\text{tanque}}$$

Donde:

$$\alpha_{\text{acero}}: \text{coeficiente de dilatación del acero, } \approx 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$\Delta T: \text{incremento de temperatura, } = 70K$$

Se obtiene un incremento de volumen del tanque:

$$\Delta V_{\text{tanque}} = 0,0756 \text{ L}$$

El volumen dilatado de las tuberías:

$$\Delta V_{\text{tuberías}} = 3 \cdot \alpha_{\text{PVC}} \cdot \Delta T \cdot V_{\text{tuberías}}$$

Donde:

α_{PVC} : coeficiente de dilatación del PVC transparente, $\approx 80 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Obteniendo:

$$\Delta V_{\text{tuberías}} = 0,017 \text{ L}$$

Por último, el volumen dilatado del colector solar se obtiene:

$$\Delta V_{\text{colector}} = 3 \cdot \alpha_{\text{PC}} \cdot \Delta T \cdot V_{\text{colector}}$$

Donde:

α_{PC} : coeficiente de dilatación del PC transparente, $\approx 65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Obteniendo:

$$\Delta V_{\text{colector}} = 0,136 \text{ L}$$

El volumen total dilatado del circuito hidráulico se obtiene uniendo la contribución de la dilatación térmica de cada componente:

$$\Delta V_{\text{sistema}} = \Delta V_{\text{tanque}} + \Delta V_{\text{tuberías}} + \Delta V_{\text{colector}}$$

$$\Delta V_{\text{sistema}} = 0,075 + 0,017 + 0,136 = 0,229 \text{ L}$$

Conclusión:

La dilatación térmica del agua debido al aumento de temperatura es de 1,29 L, mientras que la dilatación térmica del circuito es 0,229 L. El aumento de volumen del sistema tan solo absorbe un 18% del aumento de volumen del agua, por lo que el vaso de expansión debe absorber el resto, $1,29\text{L} - 0,229\text{L} = 1,061\text{ L}$.

5.2.4.2 Dimensionamiento

Para el dimensionado del vaso de expansión, se parte del volumen total del fluido caloportador contenido en el sistema, que en este caso es de 40 litros (volumen del tanque de acumulación más volumen del circuito). Se sigue el procedimiento recogido en la documentación técnica del fabricante: (Salvador Escoda SA)

Datos del sistema:

- Volumen del circuito: $V_t = 41\text{ L}$
- Temperatura de impulsión: 70 °C
- Temperatura de retorno: 95 °C
- Temperatura media: $82,5\text{ °C}$
- Presión absoluta inicial: $P_{ai} = 1\text{ bar}$
- Presión absoluta final: $P_{af} = 3\text{ bar}$
- Coeficiente de dilatación del agua a $82,5\text{ °C}$: $F_e \approx 0,021$

Cálculo del volumen útil:

$$V_u = V_t \cdot F_e = 41 \cdot 0,021 = 0,86\text{ L}$$

Cálculo del factor de presión:

$$F_p = \frac{P_{af} - P_{ai}}{P_{af}} = \frac{3 - 1}{3} = 0,666$$

Capacidad total del vaso:

$$V_v = \frac{V_u}{F_p} = \frac{0,86}{0,666} = 1,3 \text{ L}$$

Por lo tanto, el vaso de expansión debe tener una capacidad superior a 1,3 litros. Pero también debe ser capaz de absorber el volumen de agua dilatado, 1,061 L, por lo que el volumen del vaso de expansión deber ser superior a 2,361 L.

Se selecciona el modelo 5 AMR-E, código AC 04 001. Este modelo cumple el requisito mínimo de litros, con una capacidad de 5 litros. Proporciona suficiente margen de seguridad, con precarga de 1,5bar y cumple con los requisitos del sistema.

5.2.5 CAUDALÍMETRO (ROTÁMETRO)

Existen una variedad muy amplia de medidores de caudal para conductos cerrados, como son los medidores de presión variable (venturi, toberas y diafragmas), medidores de área variable (de pistón, rotámetros), electromagnéticos, de ultrasonidos, de efecto Coriolis, etc.

Para esta aplicación se ha seleccionado un rotámetro. Es sencillo, no es caro, da una precisión adecuada (inferior al 2%) para el propósito del banco. Hay rotámetros con salida eléctrica, en tensión o en intensidad. El caudalímetro seleccionado no dispone de salida eléctrica. Su rango es adecuado al caudal máximo. El caudalímetro seleccionado es de marca Tecfluid, con un rango de caudal de 0 a 250 l/h.

El rotámetro consta de un tubo vertical troncocónico transparente (de vidrio o de plástico), con la parte más ancha hacia arriba, en cuyo interior hay un elemento (flotámetro), generalmente metálico y de menor diámetro que el interior del tubo, que flota a una determinada altura a cada caudal por la acción combinada de diferentes fuerzas (figura 4).

El rotámetro puede ir graduado en caudal o en gasto másico. La escala se traza para una determinada densidad del fluido, la cual depende de la presión y la temperatura del fluido. Cuando dichas condiciones cambian respecto a las de referencia, hay que hacer corrección de la lectura. El flotámetro suele presentar unas muescas inclinadas que lo hacen girar, lo que aporta estabilidad a su posición vertical, mejorando la precisión de la lectura.

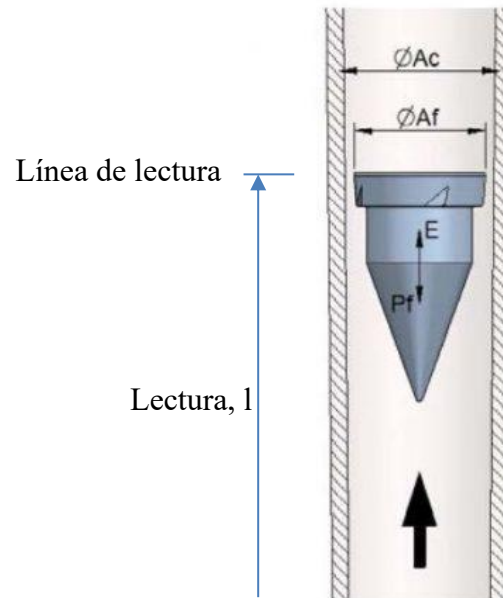


Figura 12: Esquema del rotámetro (iAgua, s.f.)

Las fuerzas que actúan sobre el flotador son:

Peso: $P = mg = \rho Vg$

Empuje del fluido: $E = m_f g = \rho_f Vg$

Resistencia fluidodinámica: $D = c_D A \frac{v^2}{2} \rho_f$

siendo:

ρ densidad del flotador

V volumen del flotador

g aceleración de la gravedad

ρ_f densidad del fluido

c_D coeficiente de arrastre fluidodinámico del flotador

A área frontal proyectada del flotador

v velocidad del fluido

En punto de equilibrio:

$$\rho V g + \rho_f V g = c_D A \frac{v^2}{2} \rho_f$$

De donde se obtiene la velocidad característica del flujo en el flotámetro:

$$v = \sqrt{\frac{2Vg}{c_D A} \left(\frac{\rho}{\rho_f} + 1 \right)}$$

El caudal Q a través del rotámetro resulta del producto de la velocidad v del flujo por el área A_{paso} de paso a través de la corona circular entre el flotador (de radio r fijo) y el tubo transparente (de radio R , variable con la altura del flotador):

$$Q = v A_{paso} = A_{paso} \sqrt{\frac{2Vg}{c_D A} \left(\frac{\rho}{\rho_f} + 1 \right)}$$

A_{paso} es:

$$A_{paso} = \pi(R^2 - r^2)$$

Expresando $R = r + \delta$, resulta:

$$A_{paso} = \pi(\delta^2 + 2r\delta)$$

Pero δ se puede expresar a partir de la altura l alcanzada por el flotador y del semiángulo $\alpha/2$ del tubo del rotámetro:

$$\delta = l \tan \frac{\alpha}{2}$$

Entonces:

$$A_{\text{paso}} = \pi \left(l^2 \tan^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) + 2r \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right)$$

De donde el caudal Q:

$$Q = \pi \left(l^2 \tan^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) + 2r \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right) \sqrt{\frac{2Vg}{c_D A} \left(\frac{\rho}{\rho_f} + 1 \right)}$$

Pero dado que en los rotámetros el semiángulo del cono es muy pequeño, resulta que el término $l^2 \tan^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ es despreciable frente a $2r \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right)$, por lo que el caudal es prácticamente lineal con altura (lectura) alcanzada por el flotador:

$$Q = f(l)$$

Lo que justifica la escala lineal de los rotámetros.

Una variable que podría alterar la linealidad del caudal con la lectura es el coeficiente de arrastre c_D , el cual depende del Reynolds dentro del tubo y, por tanto, del caudal de paso. El uso habitual de Reynolds elevados y formas de flotador poco fluidodinámicas, hacen que dicho c_D permanezca constante en el rango de medida, lo que no perturba la linealidad $Q = f(l)$ mencionada.

Los rotámetros pueden medir también el gasto másico $\dot{m}$, en lugar del caudal Q:

$$\dot{m} = \rho_f Q = \rho_f \pi \left(l^2 \tan^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) + 2r \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right) \sqrt{\frac{2Vg}{c_D A} \left(\frac{\rho}{\rho_f} + 1 \right)}$$

Bajo las mismas consideraciones que para el caudal, $\dot{m}$ también resulta lineal con la escala:

$$\dot{m} = f(l)$$

Para elegir el caudalímetro apropiado en rango al ensayo del colector se ha tenido en cuenta que la norma al respecto (UNE-EN 12975:2022)) establece un caudal entre 72 y 180 l/h·m², lo que lleva a elegir un rotámetro con un rango hasta 150 l/h.

Teniendo en cuenta que las expresiones tanto del caudal como del gasto másico dependen de la densidad del fluido ρ_f , resulta que la escala (en Q o en $\dot{m}$) está razada para una determinada densidad del fluido (normalmente 1 bar y 20 °C). Cuando el fluido de trabajo no está en estas condiciones, hay que hacer corrección de la lectura por cambio de densidad (no se tratarán aquí las expresiones correspondientes). Este efecto es especialmente importante en gases.

5.2.6 SENSORES DE TEMPERATURA DEL FLUJO DE AGUA

En este proyecto se emplea una sonda de temperatura tipo Pt100 clase B de tres hilos, diseñada para la medición de temperatura del fluido caloportador en el interior de la tubería. Este tipo de sensor, clasificado como termómetro de resistencia (RTD), basa su funcionamiento en la propiedad del platino de variar su resistencia eléctrica en función de la temperatura.

Esta sonda se inserta directamente en el interior del conducto hidráulico mediante un racor deslizante con bicono de PTFE, quedando en contacto directo con el fluido en circulación. En el sistema se emplean dos sensores idénticos: uno a la entrada del colector y otro a la salida, lo cual permite determinar la variación térmica que sufre el agua al atravesar el panel solar.

Estas medidas de temperatura son esenciales para el cálculo del calor absorbido en el colector. La precisión en la medida de estas temperaturas es crucial para evaluar el comportamiento térmico del colector y su eficiencia. Para maximizar la precisión de la medida, estas sondas deberán colocarse lo más cerca posible de la entrada y salida del colector respectivamente.

Para su instalación, se hará un agujero roscado, en el tramo de tubería más cercano al colector, donde enroscar el racor deslizante con bicono de PTFE.

Especificaciones técnicas:

- Tipo de sensor: Pt100 (RTD – Resistencia de Platino, 100 Ω a 0 °C)
- Clase de precisión: Clase B ($\pm 0.3 + 0.005$)
- Configuración de conexión: 3 hilos, trenzado, apantallado, cable multihilo 3x0.5 mm²
- Rango de temperatura: -100 °C a +200 °C (sensor), máx. 105 °C (cable)
- Norma de fabricación: IEC 60751

5.2.7 SENSOR DE TEMPERATURA AMBIENTE.

Para la medición de la temperatura ambiente en el entorno del colector solar se emplea un sensor de tipo Pt100 clase B de tres hilos, específicamente diseñado para aplicaciones exteriores. La fiabilidad en la medición de la temperatura exterior es esencial para la evaluación del rendimiento térmico del colector solar en condiciones reales de operación, ya que forma parte de las variables de referencia en los ensayos conforme a la norma UNE-EN 12975:2022.

El sensor permite registrar en todo momento la temperatura ambiente, necesaria para el cálculo del rendimiento térmico en estado estacionario y para estimar las pérdidas térmicas del sistema.

Su instalación se llevará a cabo en una zona sin exposición directa a la luz solar, para evitar su sobrecalentamiento y medidas incorrectas de temperatura. Su montaje se realiza mediante fijación mural.

Especificaciones técnicas:

- Tipo de sensor: Pt100, clase B, 3 hilos

- Protección ambiental: IP68 (hermético frente a polvo y sumergible)
- Conexión eléctrica: 3 hilos, compatible con sistemas de adquisición estándar
- Rango de temperatura: $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Norma de fabricación: IEC 60751

5.2.8 PIRANÓMETRO

Un piranómetro es un instrumento diseñado para medir la irradiancia solar global que incide sobre una superficie. Esta medición incluye tanto la radiación directa del sol como la radiación difusa del cielo.

El piranómetro permite cuantificar la energía solar disponible en un determinado lugar y momento, siendo esencial en el análisis del rendimiento de sistemas solares térmicos y fotovoltaicos. En el contexto de este proyecto, su función es medir la radiación solar incidente sobre el plano del colector para, junto con otros datos, calcular la eficiencia térmica del sistema.

El piranómetro utilizado en este proyecto es un modelo de primera clase de la empresa Darrera (modelo LPPYRA02). Está formado por una cúpula de vidrio que protege un sensor termoelectrónico sensible a un amplio rango del espectro solar (de 305 a 2.800 nm). Este sensor genera una señal proporcional a la irradiancia recibida.

El equipo puede conectarse a un datalogger para registrar la irradiancia a lo largo del tiempo.

Para este proyecto, el piranómetro debe instalarse en el mismo plano que el colector solar para medir exactamente la radiación que incide sobre él, lo cual es crucial para determinar el rendimiento térmico.

Especificaciones técnicas

- Rango espectral: 305 a 2800 nm
- Rango de medición: 0 a 2000 W/m²

- Sensibilidad: $10 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
- Tiempo de respuesta: $\leq 28 \text{ s}$
- Precision: Offset A $\leq 15 \text{ W}/\text{m}^2$; Offset B $\leq 4 \text{ W}/\text{m}^2$
- Error coseno: $\leq 18 \text{ W}/\text{m}^2$
- Deriva anual: $\leq 1,5 \%$
- Temperatura de operación: -40°C a $+80^\circ\text{C}$
- Salida: analógica o digital (RS-485, MODBUS-RTU)

5.2.9 PIEZÓMETRO DIFERENCIAL

Está constituido por un manómetro en U invertido agua-aire que permite evaluar la pérdida de carga del colector de cara a su caracterización hidráulica. Por un lado, está conectado a la entrada del colector solar y por el otro a la salida. Está conectado a la entrada y diferencia de presión entre la entrada y salida del colector solar. El manómetro dispone de una toma superior para inyección/extracción de aire al objeto de situar el cero del manómetro a la mitad de la altura del mismo y así poder disponer del máximo rango de medida.

Para obtener la medida, se observa el nivel de agua en un lado de la tubería y se compara con el nivel de agua en el otro lado.

EL uso de este manómetro de líquido se justifica por el hecho que se trata de un elemento sencillo, de bajo coste y ofrece una muy buena precisión en la lectura frente a un manómetro metálico Bourdon.

El esquema del manómetro hidráulico es el siguiente:

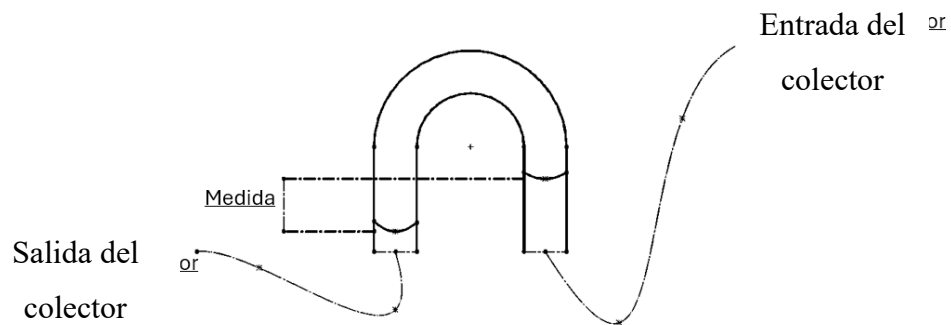


Figura 13: Esquema manómetro hidráulico

La medida que se obtiene viene dada únicamente por la pérdida de carga dentro del colector. La diferencia de cotas de altura entre la entrada y la salida del colector no modifican la medida que se obtiene del manómetro de líquido.

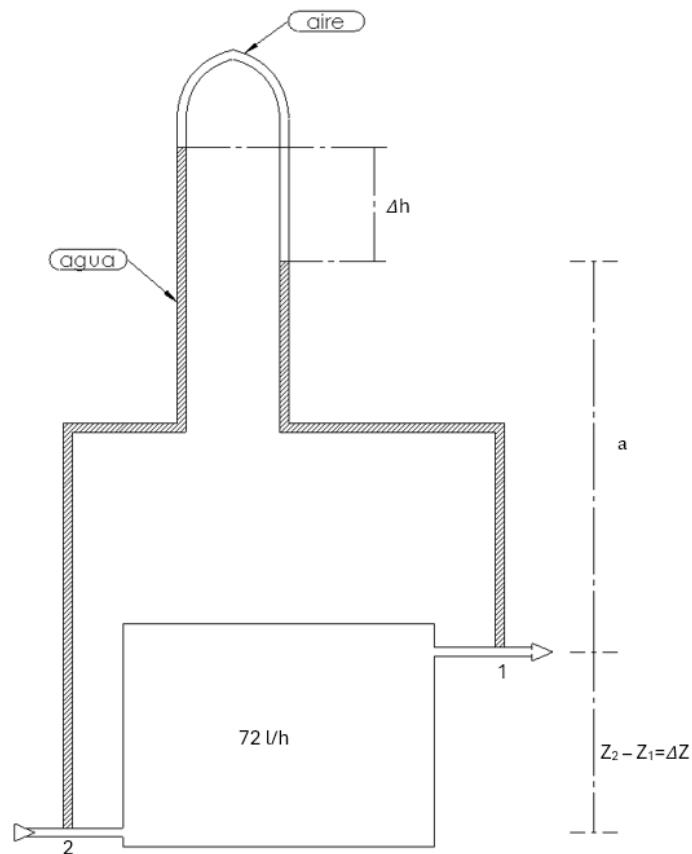


Figura 14: esquema completo del manómetro de líquido dentro del sistema hidráulico

Aplicando Bernoulli entre los puntos hidráulicos 1 y 2, se obtiene:

$$B_{1-2}: \frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - h_{r12} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1)$$

Donde:

p_n : presión hidráulica en el punto n

ρ : densidad del agua

g : gravedad

v_n : velocidad en el punto n

h_{r12} : pérdida de carga a través del colector

Esta ecuación se simplifica sabiendo que las velocidades en los puntos 1 y 2 son nulas:

$$B_{1-2}: \frac{p_1}{\rho g} + z_1 - h_{r12} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 \quad (1)$$

Por otro lado, se puede expresar la presión en el punto 1 partiendo del punto 2 como:

$$H_{1-2}: p_1 = p_2 - \rho g a + \rho g(\Delta h + a + z_2 - z_1) = p_2 + \rho g \Delta h + \rho g(z_2 - z_1) \quad (2)$$

De nuevo, operando y sabiendo que el valor a es constante, se puede simplificar la ecuación para obtener:

$$H_{1-2}: \frac{p_1}{\rho g} + z_1 - \Delta h = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 \quad (2)$$

Comparando las ecuaciones (1) y (2), se concluye:

$$h_{r12} = \Delta h$$

Lo que indica que la medida que se obtiene del manómetro, Δh , es igual a la pérdida de carga a través del colector h_{r12} , independientemente si las conexiones del piezómetro diferencial al panel están o no a la misma cota.

5.2.9.1 Cálculo de la pérdida de carga global

Para el dimensionamiento del piezómetro, es necesario conocer la pérdida carga global del circuito hidráulico.

La pérdida de carga en un circuito hidráulico se calcula como la suma de la pérdida de carga primaria y la pérdida de carga secundaria

$$\Delta h_{tot} = \Delta h_{prim} + \Delta h_{sec}$$

La pérdida de carga primaria es aquella que ocurre por la fricción del fluido con las paredes de las tuberías.

La pérdida de carga secundaria se produce cuando el fluido atraviesa elementos singulares, como válvulas, codos, entrada al colector ...

Pérdida de carga por el Colector

En primer lugar, para el cálculo de la pérdida de carga por el colector, es necesario conocer el flujo de agua por cada uno de sus conductos, dispuestos todos ellos en paralelo:

$$Q_{conducto} = \frac{Q}{n}$$

Donde

Q: Caudal total ($Q = 72 \text{ l/h} = 0,02 \text{ l/s}$)

n: número de conductos en el colector ($n=100$)

Obteniéndose:

$$Q_{conducto} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

La velocidad media del fluido por el colector es, por tanto:

$$v_{colector} = \frac{Q_{conducto}}{A}$$

Donde

A: Área transversal de cada conducto del colector ($A = 1\text{cm} \times 1\text{cm} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)

Obteniendo:

$$v_{colector} = \frac{Q_{conducto}}{A} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Se puede obtener el número de Reynolds por cada canal como:

$$Re = \frac{v \cdot D_h}{\nu}$$

Donde:

D_h : Diámetro hidráulico (para secciones cuadradas es igual al lado: $D_h=0,01\text{m}$)

v : velocidad del flujo

ν : viscosidad del agua ($\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

Operando, se obtiene un numero de Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot D_h}{\nu} = \frac{0,002 \cdot 0,01}{1 \cdot 10^{-6}} = 20$$

Por lo que el flujo es laminar.

La pérdida de carga por el colector se calcula como:

$$\Delta h_{colector} = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$f = \frac{64}{Re} = 3,2$$

Donde:

L : longitud del colector ($L=1\text{m}$)

g : gravedad

De donde se obtiene:

$$\Delta h_{prim_colector} = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{v^2}{2g} = 3,2 \cdot \frac{1}{0,01} \cdot \frac{0,002^2}{2 \cdot 9,81} = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ mca} = 0,065 \text{ mmca}$$

Este valor es muy pequeño, debido a la baja velocidad. En la práctica, la contribución principal a la pérdida dentro del colector no proviene del rozamiento con las paredes, sino de las pérdidas por cambios de sección en la entrada y salida del colector, uniones, irregularidades, y fricción con el elemento absorbente de polipropileno.

Es por ello por lo que, además de la pérdida de carga primaria, también existe una pérdida de carga secundaria en cambio de sección del colector y en la división del flujo principal por todos los conductos.

Esta pérdida de carga secundaria, debido a la geometría y la disposición del flujo, se calcula como:

$$\Delta h_{sec_colector} = 50\% \cdot \Delta h_{prim_colector} = 0,0325 \text{ mmca}$$

Se obtiene que la pérdida de carga global en el colector es:

$$\Delta h_{colector} = \Delta h_{prim_colector} + \Delta h_{sec_colector} = 0,0975 \text{ mmca}$$

Pérdida de carga por tuberías

Se procede similarmente para el cálculo de la pérdida de carga primaria por las tuberías del resto del circuito:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \cdot 0,008^2 = 2,01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

Donde:

A: área de la sección de la tubería

D: Diámetro interior de la tubería (D=16mm)

Habiendo un caudal Q= 0,02 l/s, se obtiene una velocidad por el interior de las tuberías de:

$$v = \frac{0,00002}{2,01 \cdot 10^{-4}} \approx 0,1 \text{ m/s}$$

El número de Reynolds viene dado por:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{0,1 \cdot 0,016}{1 \cdot 10^{-6}} = 1600$$

Por lo que el flujo sigue siendo laminar.

Se obtiene la pérdida de carga por las tuberías como:

$$f = \frac{64}{Re} = 0,04$$

$$\Delta h_{tuberia} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,04 \cdot \frac{5}{0,016} \cdot \frac{0,1^2}{2 \cdot 9,81} = 0,00637 \text{ mca}$$

Donde:

L: longitud total de los tramos de tubería.

Pérdida de carga secundaria en elementos singulares

Por último, es necesario incluir la contribución a la pérdida de carga global, la pérdida de carga debida a los elementos que están dispuestos a lo largo del circuito.

Se han contabilizado:

- 1 válvula de cierre.
- 1 válvula de control de caudal.
- 1 caudalímetro.
- 1 adaptador para la válvula de purga.
- 1 adaptador para la entrada del colector.
- 1 adaptador para la salida del colector.
- 1 tubería en T.

Para cada elemento, se establece un coeficiente de pérdida K, dado por la tabla

Tabla 9: Coeficiente de pérdida de carga de elementos

Elemento	K _{total}
Válvula de cierre	1.00
Válvula de control de caudal	1.00
Caudalímetro (rotámetro vertical)	0.20
Adaptador válvula de purga	0.15
Adaptador entrada del colector	3
Adaptador salida del colector	3
Tubería en T	0.60
Total	8,95

Obteniendo una pérdida de carga debida a estos accesorios de:

$$\Delta h_{\text{accesorios}} = K \cdot \frac{v^2}{2g} = (8,95) \cdot \frac{0,1^2}{2 \cdot 9,81} = 0,00456 \text{ mca}$$

Pérdida de carga global

Uniando la aportación debida a todas las pérdidas de carga, se obtiene una pérdida de carga global en el sistema de:

$$\Delta h_{\text{global}} = \Delta h_{\text{prim_colector}} + \Delta h_{\text{prim_tuberia}} + \Delta h_{\text{sec}}$$

$$\Delta h_{\text{global}} = 0,0000975 + 0,00637 + 0,00456 \approx 0,011 \text{ mca} = 1,1 \text{ cmca}$$

(White, 2000)

Este valor de pérdida de carga es pequeño debido a la baja velocidad en la instalación.

5.2.10 OTROS ELEMENTOS AUXILIARES

El sistema hidráulico del colector solar se completa con una serie de componentes auxiliares que permiten la conexión, regulación, sellado, vaciado y control del flujo en condiciones reales de funcionamiento. Estos elementos son fundamentales para garantizar el correcto funcionamiento del sistema, su estanqueidad y la posibilidad de mantenimiento.

A continuación, se detallan los elementos auxiliares utilizados:

- Tuberías flexibles de PVC transparente.
Se emplean para conectar los distintos elementos del circuito hidráulico. Estas tuberías tienen un diámetro interior de 16 mm. Se utilizan principalmente en los tramos cortos y accesibles del sistema, como las conexiones entre sensores, válvulas y colector.
- Adaptadores de PVC duro.
Estos elementos son manguitos, reducciones, machones, tuercas y tuercas locas. Permiten la unión entre tuberías de distintos materiales y diámetros. Se utilizan para adaptar el circuito entre conexiones de rosca, enrosques de sensores y otros componentes.
- Válvulas de cierre y purga:
Permiten aislar diferentes secciones del circuito para su mantenimiento o modificación. También se instalan válvulas con la función de purgar el aire atrapado en el sistema. Se instalan en los puntos altos del circuito, donde el aire tiende a acumularse. Eliminan las bolsas de aire que hacen que disminuya el rendimiento térmico o interfieran en la circulación del fluido.

Cálculo de la velocidad del fluido:

Datos del sistema:

Caudal volumétrico de diseño: $Q=72 \text{ l/h}$

Diámetro interior de tubería: $D=0,016 \text{ m}$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 2,01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{72 \text{ l/h}}{2,01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} \approx 0,1 \text{ m/s}$$

La velocidad del fluido por las tuberías es relativamente baja, 10 cm/s. Este valor asegura baja pérdida de carga, lo que reduce la potencia de la bomba de circulación del fluido y aumenta el tiempo de permanencia del fluido en el colector.

5.3 EL COLECTOR SOLAR

5.3.1 IMPORTANCIA DEL COLECTOR DENTRO DEL SISTEMA

Es el elemento objeto de ensayo en el presente trabajo. Su función es la de captar la radiación solar y transformarla en calor. Se realizarán ensayos en los que el colector estará orientado al sol, con variaciones de la perpendicular solar según la hora por variación de la altura solar.

Este es el elemento más importante de la instalación, ya que es el responsable de capturar y transformar la energía solar en energía térmica. Para ello, estará directamente orientado hacia el sol. Debido a las limitaciones económicas de este proyecto, el colector debe ser de un material accesible y económico a la vez que eficiente.

5.3.2 GEOMETRÍA Y DISPOSICIÓN CONSTRUCTIVA

El esquema del colector es:

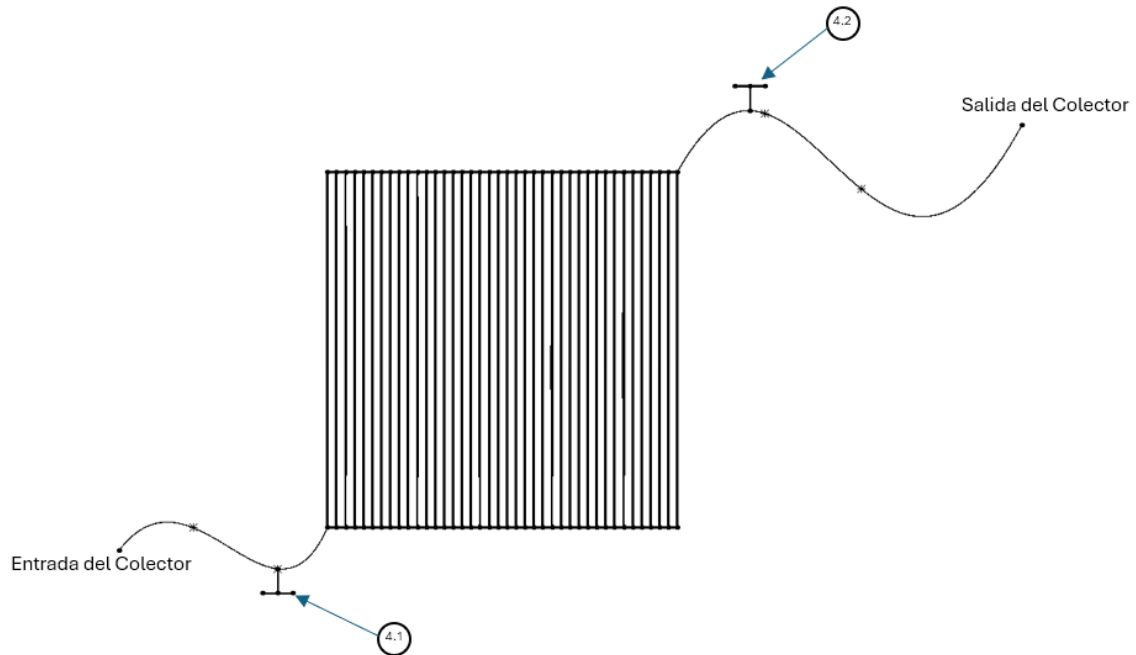


Figura 15: Dibujo esquemático del colector

Los elementos 4.1 y 4.2 representan respectivamente los sensores de temperatura del fluido a la entrada y salida del colector.

El material seleccionado para el colector es el policarbonato. Se empleará un panel de 1m x 1m x 1cm de plástico de policarbonato celular transparente. El grosor de la capa de policarbonato es de 0.5mm. Los conductos formados sirven como tuberías por las que asciende el flujo de agua.



Figura 16: Sección placa de policarbonato celular (Leroy Merin, s.f.)

Los conductos del panel de policarbonatos son de sección cuadrada de 1c x 1cm. Hay un total de 100 conductos en todo el colector.

Al ser este trabajo parte de un proyecto más grande, la fabricación del colector no es objeto de este trabajo.

5.3.3 SENTIDO DEL FLUJO, UBICACIÓN DE SENSORES Y CRITERIOS DE INSTALACIÓN

Siguiendo la Norma: UNE-EN 12975:2022, el fluido de entrada del colector deberá entrar por la parte inferior y salir de el por la parte superior. Esta disposición facilita la purga del aire del panel y pone en flujos paralelos en equicorriente el flujo de la bomba y la convección natural dentro del panel. Esto último reduce la potencia de bombeo.

Además, es preciso que los sensores de temperatura (elementos 4.1 y 4.2) sean colocados lo más cerca posible de la entrada y salida del colector respectivamente, al objeto de poder evaluar la verdadera energía térmica captada por el colector.

5.4 ANÁLISIS ENERGÉTICO DEL COLECTOR

5.4.1 INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Objetivos del cálculo:

Es esencial estimar la energía solar en forma de radiación que el colector absorbe teóricamente. Esto permite dimensionar su capacidad térmica. Además, se comparan estos resultados con la energía útil obtenida (mediante las medidas durante los ensayos) y calcular el rendimiento. Por último, también nos permite evaluar y dimensionar materiales y geometrías.

Modelo general:

La radiación solar absorbida se calcula como:

$$Q_{abs} = A_{col} \cdot G_T \cdot \tau \cdot \alpha$$

Donde:

Q_{abs} : Potencia de radiación absorbida (W)

A_{col} : Área del colector (m²)

G_T : Radiación solar global sobre la superficie del colector (W/m²)

τ : Transmitancia del material de cubierta (-)

α : Absortancia del material absorbente (-)

Definición de parámetros:

Área del colector (A_{col}):

Se ha establecido un colector de 1m x 1m. Esto permite estandarizar los ensayos y mantener una constancia en las medidas.

$$A_{col} = 1m \cdot 1m = 1m^2$$

5.4.2 TEORÍA RADIACIÓN

La radiación térmica es una energía en forma de ondas electromagnéticas. Toda materia que este por encima del 0 absoluto emite, en cierta medida, radiación. Esta radiación se caracteriza por su frecuencia (f) y su longitud de onda (λ), relacionadas por la velocidad de la luz (c) de la forma:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Tanto la longitud de onda como la velocidad de propagación dependen del medio por el cual viaja la luz. En cambio, la frecuencia depende de la fuente que la emite, no del medio por el cual viaja.

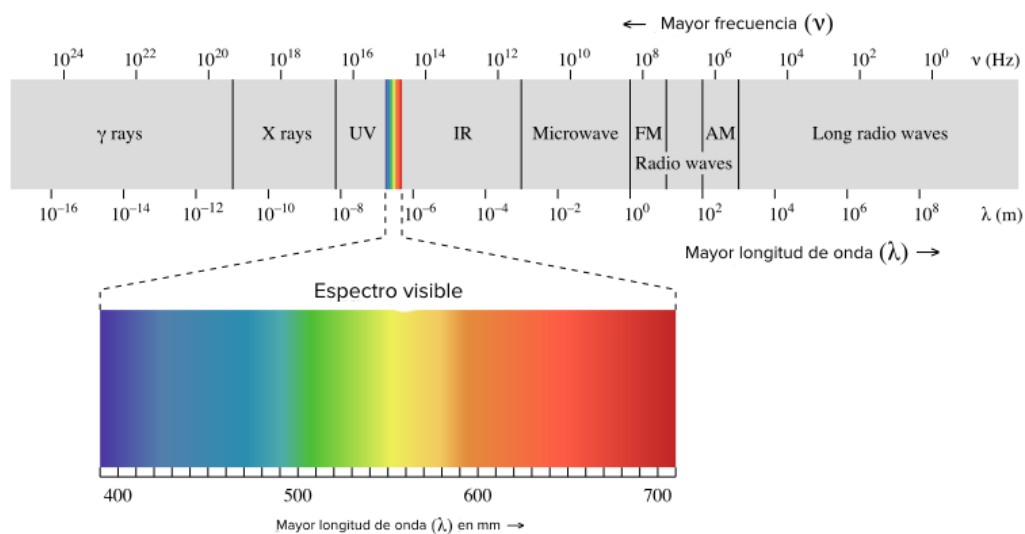


Figura 17: Radiación electromagnética de la luz (Universitat Oberta de Catalunya)

La radiación solar térmica incidente se refiere a la cantidad de energía solar que incide por unidad de superficie sobre el plano inclinado del colector en cada instante de tiempo. Depende principalmente de: la posición del sol, influenciado por la estación del año, el día, la hora y la latitud del lugar en el que se realiza el ensayo.

Esta energía procede de un foco térmico a alta temperatura, en este caso el Sol, a una temperatura superficial aproximada de unos $T_s = 5800 \text{ K}$.

La radiación emitida por todo cuerpo se obtiene mediante la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Un cuerpo negro es aquel que emite máxima potencia radiante para una temperatura dada (emisor ideal, $\varepsilon=1$). Este concepto es una idealización, y por eso no existe realmente ningún cuerpo que sea plenamente cuerpo negro. (Çengel, 2015) A pesar de ello, se pueden aproximar algunos cuerpos cuya emitancia es cercana a 1 ($\varepsilon \approx 1$) a cuerpos negros para la facilitación de los cálculos.

Para cuerpos negros, la radiación emitida:

$$E_{\text{cuerpo negro}} = E_b = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Donde:

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($\approx 5.67 \cdot 10^{-8}$)

Considerando el sol como un cuerpo negro se obtiene:

$$E_{b_{sol}} = (5.67 \cdot 10^{-8}) \cdot (5800 \text{ K})^4 = 6.33 \cdot 10^7 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Este valor se refiere a la cantidad de energía total radiante que emite el sol (la temperatura ambiente T_{amb} para el sol es la del espacio exterior, muy cercana a los 0K). Este calor emitido es la suma de la contribución de todos los calores a diferentes longitudes de onda. Para la aproximación a cuerpo negro, se denomina $E_{b\lambda}$, dada por la ley de Planck:

$$E_{b\lambda} \left(\frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right) = \frac{3.74177 \cdot 10^8}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{1.43878 \cdot 10^4}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)}$$

Para el sol, representado gráficamente:

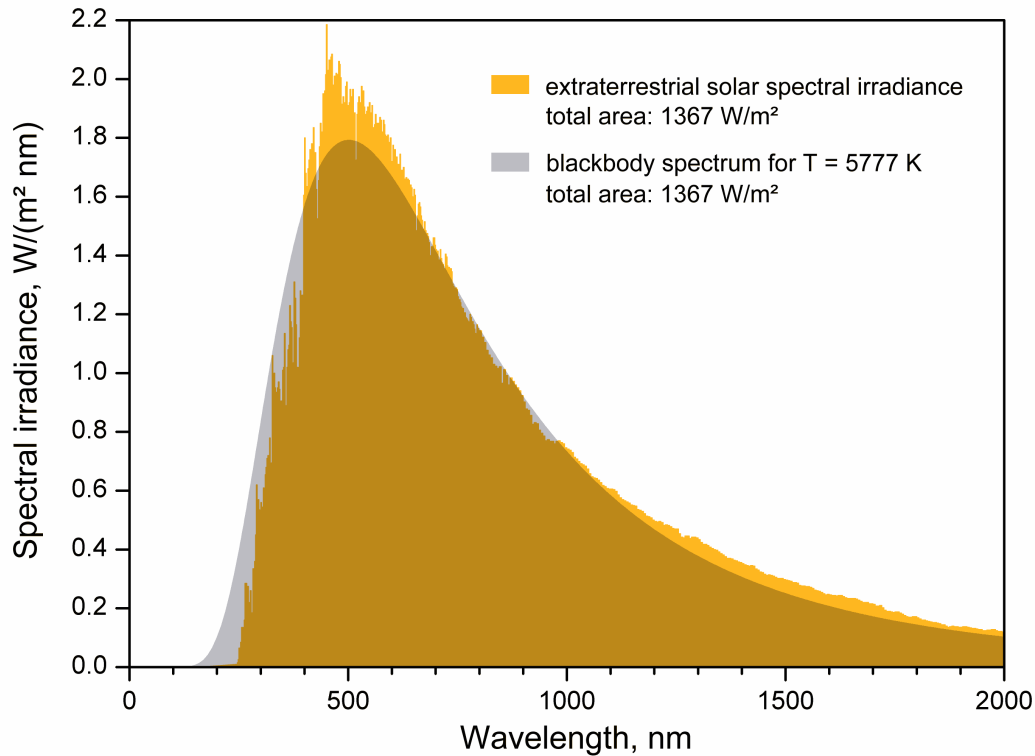


Figura 18: Irradiancia solar según longitud de onda (λ) (Wikiwand, 2025)

Se observa que la aproximación del Sol a un cuerpo negro es extremadamente precisa. Además, también se observa que la longitud de onda para la que la energía radiante del sol es máxima se encuentra entre los valores 400 y 600 nm. En el espectro electromagnético de la luz, la luz visible se encuentra entre los valores 400 y 750 nm aproximadamente. Esto no es ninguna coincidencia, ya que los seres humanos hemos evolucionado para poder obtener la mayor cantidad de luz de nuestro entorno, iluminado principalmente por el sol. Es por ello por lo que somos más sensibles a las longitudes de onda en las que más emite energía el sol.

De esta manera se puede calcular la energía total emitida por el sol, y por cualquier cuerpo, como:

$$E_{b_{tot}} = \int E_{b\lambda} d\lambda$$

Consideraciones y aproximaciones:

La emisividad (ϵ) se refiere a cuanto de cerca esta un cuerpo de comportarse como un cuerpo negro. Este valor varía entre 0 y 1. Además, también varía según las diferentes longitudes de onda (λ) para un mismo cuerpo. Esto complica enormemente los cálculos, por lo que se aproxima todos los diferentes valores de ϵ_λ a un mismo valor medio. Esto permite simplificar los cálculos, manteniendo el comportamiento general del cuerpo. Esta aproximación se denomina aproximación a cuerpo gris.

Por otro lado, todo cuerpo que no sea negro emite preferentemente en una dirección frente a otra. El cuerpo negro por otro lado emite en todas direcciones por igual, cuerpo difuso.

Según sea conveniente y aceptablemente preciso, se aproximarán los cuerpos en este estudio como grises y/o difusos. (Al-Ibrahim, Junio 2023)

5.4.3 TEORÍA CONDUCCIÓN

El calor transmitido por conducción es uno de los mecanismos de transferencia térmica, y ocurre cuando existe un gradiente de temperatura dentro de un medio continuo cuando no hay movimiento macroscópico entre las partículas del medio. Se basa en el hecho de que el calor fluye desde regiones de mayor temperatura a regiones de menor temperatura por interacción molecular directa.

Se rige por la Ley de Fourier, que en su forma es:

$$\dot{Q} = -k A \frac{dT}{dx}$$

Donde:

$\dot{Q}$: potencia térmica transmitida por conducción (W)

k: conductividad térmica del material (W/m·K)

A: área de conducción del calor (m²)

$\frac{dT}{dx}$: gradiente de temperatura

Para procesos de conducción no unidimensional, variables en el tiempo y con materiales no isótropos, la ecuación diferencial de conducción adopta la forma general dada por (Çengel, 2015):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q''' = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Donde:

q''' : generación interna de calor (W/m³)

ρ : densidad del material (kg/m³)

c: calor específico (J/kg·K)

k_x, k_y, k_z : conductividades del material según las direcciones x, y, z [W/m·K]

Casos particularmente interesantes de esta ecuación serían:

Régimen estacionario sin generación interna y material isótropo (ecuación de Laplace):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z} = 0$$

Régimen transitorio sin generación interna:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Para resolver estas ecuaciones es necesaria una condición de contorno, entre las más típicas están:

Temperatura fija en una cara: $T(x, t) = T_s$

Flujo de calor superficial conocido: $q'' = -k \frac{dT}{dx}$

5.4.4 TEORÍA CONVECCIÓN

La convección es un mecanismo de transferencia de calor entre un fluido y un sólido. Este fenómeno se basa en dos procesos: conducción en la capa próxima a la pared, y advección de calor por el movimiento del fluido fuera de esa capa.

Capa límite hidrodinámica.

Cuando un fluido (agua, aire, etc) fluye por el interior de un conducto existe gradiente de velocidad en toda la masa de fluido y toda la región fluidodinámica se constituye en capa límite hidrodinámica. El perfil de velocidad y la pérdida de carga se ven influenciados por el tipo de régimen, laminar o turbulento. Depende de varios factores, pero típicamente y de forma aproximada, está establecido que para un Reynolds por debajo de 2000 el régimen de flujo es laminar y por encima de este valor es turbulento.

Cuando hay diferencia entre la temperatura de la superficie y del fluido, también aparece una capa límite térmica. Dado que todo el interior de los conductos es capa límite térmica, se hace preciso definir una temperatura de referencia para el cálculo de la transferencia de calor entre el fluido y la pared, es la llamada temperatura media de masa T_b .

La temperatura media de masa (o simplemente temperatura de masa) en una sección de un conducto es la que se obtendría al mezclar el flujo en una cámara adiabática (sin adición ni sustracción de calor desde el exterior) y sin disipación viscosa (ausencia de generación de calor por fricción entre las partículas), lo cual se conseguiría con tal que no hubiera una agitación excesiva del flujo:

$$T_b = \frac{\int_A T \cdot u \, dA}{\bar{u} A}$$

Donde:

$\bar{u}$: velocidad media de la corriente en el conducto

Al margen de la forma del conducto y del régimen de flujo (laminar o turbulento), la temperatura de masa T_b varía de forma distinta dependiendo de la condición de contorno: flujo de calor uniforme ($q_s'' = cte$), o temperatura superficial constante. El caso que atañe al presente proyecto está más cerca del comportamiento de flujo de calor uniforme: la radiación procedente del sol que calienta el colector incide sobre toda su superficie de igual manera. El flujo de calor que llega al fluido procede de la porción absorbida de la radiación solar incidente G_s [W/m^2].

Flujo de calor uniforme ($q_s'' = cte$): dado que la variación de la energía térmica ($\dot{m} c_p dT_b$) que experimenta el fluido en la rebanada diferencial debe ser igual a la transferida (dq) desde la superficie interior del conducto en esa longitud:

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot dT_b = dq$$

operando y despejando para $T_b(x)$, se obtiene:

$$T_b(x) = T_{be} + \frac{q_s'' \cdot p}{\dot{m} \cdot c_p} x$$

Que expresa la variación longitudinal de T_b en el colector.

Teniendo en cuenta el flujo de calor entre la cara interior y el fluido:

$$\dot{Q}'' = h \cdot (T_s - T_b)$$

Se obtiene la ley de la temperatura superficial del conducto por el que discurre el fluido:

$$T_s(x) = T_b(x) + \frac{q''}{h}$$

Se observa que la diferencia de temperatura de la pared y del fluido se mantiene constante a lo largo del colector. La potencia calorífica intercambiada puede obtenerse (vista por la transmisión de calor pared-fluido) como:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_s'' \cdot p \cdot L = q_s'' \cdot A_{convectiva}$$

Donde p es el perímetro mojado, L la longitud del conducto, que coincide con la longitud del colector, medida en el sentido del flujo y $A_{convectiva}$ es el área en contacto fluido-pared.

Esta misma potencia intercambiada, vista por el fluido, se expresa como:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p (T_{bs} - T_{be})$$

Donde T_{be} y T_{bs} son las temperaturas de masa a la entrada y a la salida respectivamente.

El coeficiente de convección h de la ecuación de $T(x)$ requiere el calculo del número de Nusselt, el cual tiene el significado de gradiente adimensional de temperatura del fluido en contacto con la pared:

$$Nu = -\frac{\partial T^*}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} = \frac{R_{conductiva \text{ fluido}}}{R_{convectiva}} = \frac{q_{convección}}{q_{conducción}}$$

Que también puede interpretarse como el cociente entre las resistencias térmicas conductiva del fluido y la resistencia convectiva. Nusselt tiene un efecto “aumentador” de la potencia de convección ($q_{CONVECCIÓN}$), respecto a la que tendría lugar si el fluido se solidificara y la transferencia de calor tuviera lugar sólo por conducción ($q_{CONDUCCIÓN}$).

Para flujo laminar ($Re < 2300$):

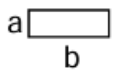
Sección	Número de Nusselt, Nu		
	b/a	q _s '' uniforme	T _s uniforme
○	-	4,36	3,66
	1	3,61	2,98
	1,43	3,73	3,08
	2	4,12	3,39
	3	4,79	3,96
	4	5,33	4,44
	8	6,49	5,60
	∞	8,24	7,54
△	-	3,11	2,47

Figura 19: Tabla de número de Nusselt (Çengel, 2015)

Para flujo turbulento ($Re > 2300$), y tanto si $T_s = cte$ como si $q_s'' = cte$

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

Donde f es el factor de fricción de Darcy.

5.4.5 PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES

La cubierta externa de policarbonato es transparente. Esto hace que sea muy transmisivo, al dejar pasar la luz, en el rango de amplitudes de onda visibles. Esto permite que pase la luz y caliente el agua. Pero, no es transparente en el rango infrarrojo de amplitudes de onda. Esto hace que la aproximación a cuerpo gris para el policarbonato transparente no sea precisa.

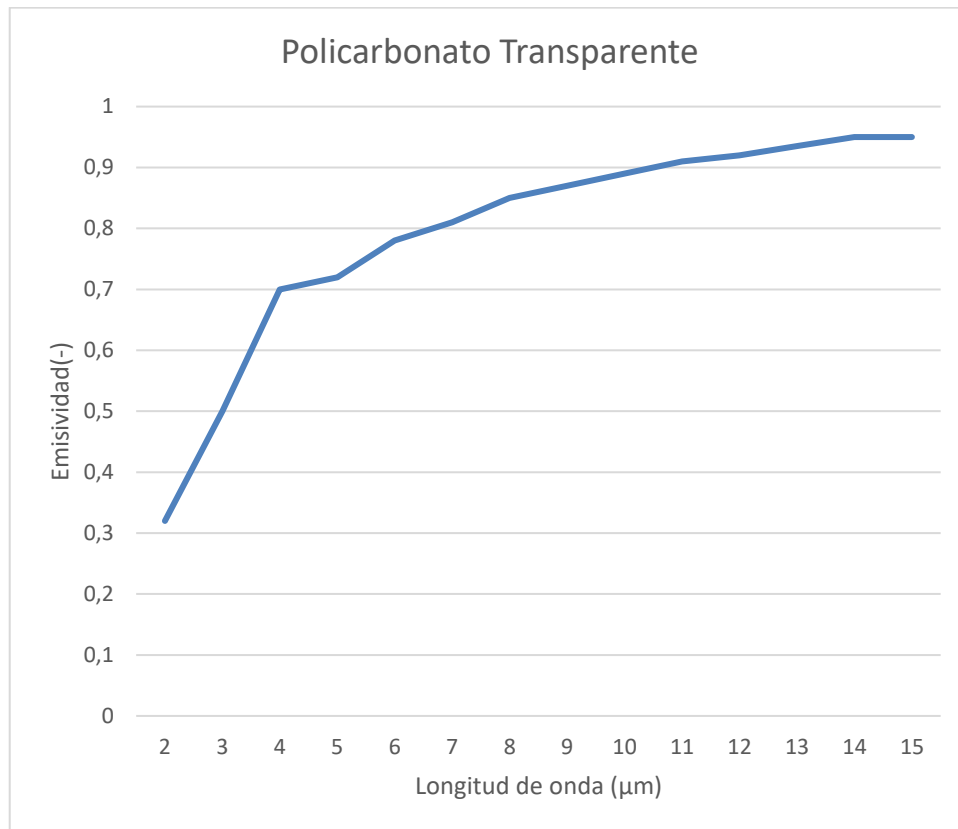


Figura 20: Emisividad según longitud de onda del Policarbonato

La emisividad del policarbonato varía considerablemente según la longitud de onda. Para valores de longitud de onda en el rango visible (0,4-0,7 μm) la emisividad es muy baja, $\epsilon \approx 0,05-0,1$. Este valor asciende para longitudes de onda más grandes, llegando hasta $\epsilon \approx 0,85-0,97$ entre longitudes de onda infrarrojas (6-15 μm). Además, dado que el colector no alcanzara una temperatura muy alta (entorno a los 100 °C), y que la emisividad es alta en valores de longitud de onda 6-15 μm, hará que el calor emitido por el colector en forma de radiación sea principalmente en el espectro infrarrojo.

Es necesario obtener también la cantidad de energía procedente del sol que atraviesa el colector para calentar el agua.

Para ello, en primer lugar, es necesario obtener la transmitancia, la absorptancia y la reflectancia del policarbonato transparente.

Estos valores nos indican el porcentaje de la energía procedente del sol que atraviesa, absorbe y refleja el colector respectivamente.

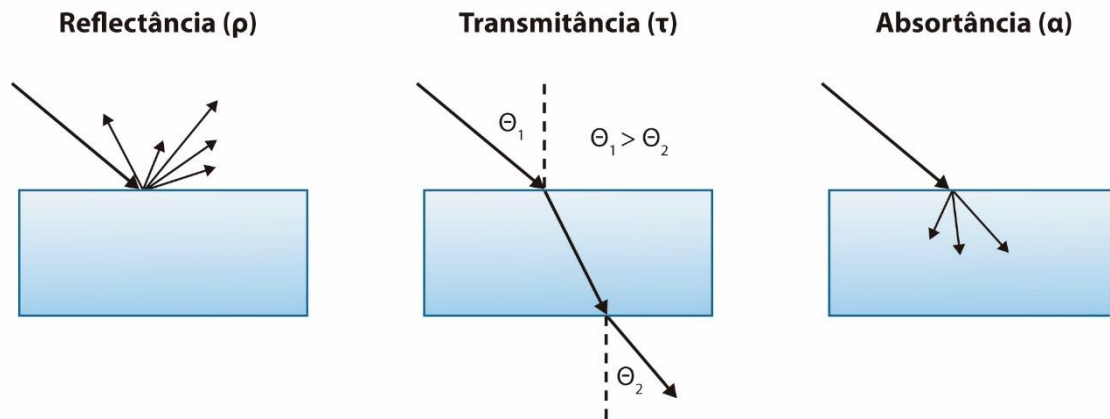


Figura 21: Reflectancia, transmitancia y absorción (canal Cecierj, s.f.)

Para el policarbonato transparente, estos valores son:

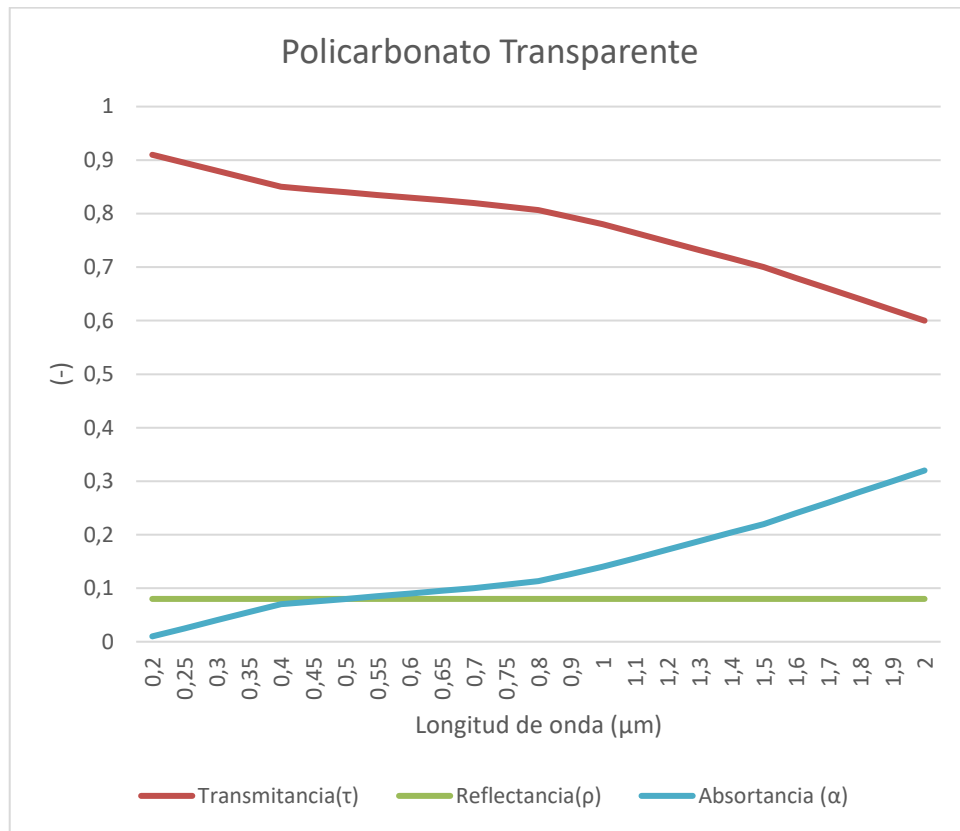


Figura 22: Transmitancia, reflectancia y absorptancia del policarbonato

Como se puede observar, el valor de la transmitancia (τ) disminuye conforme aumenta la longitud de onda (λ). El valor de la absorptancia (α) crece conforme aumenta la longitud de onda. Por último, la reflectancia (ρ) se mantiene constante.

Es importante resaltar que, por el principio de conservación de la energía, estos tres valores deben sumar 1:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

El valor de $\tau_{\text{policarbonato}}$ varía con la longitud de onda, como muestra la gráfica (). Pero esta variación es muy ligera. Además, la radiación solar incidente sobre el plano inclinado del colector G_T se compone principalmente de radiación en el espectro visible e infrarrojo.

Por ello, se considera el valor de la transmitancia del policarbonato de valor constante:

$$\tau_{\text{policarbonato}} = 0.82$$

Otro material relevante es el polipropileno. Este material, introducido dentro del colector, ayuda a absorber más calor procedente del sol. En el rango de longitudes de onda de la radiación que atraviesan la primera capa de policarbonato, el polipropileno es prácticamente perfectamente absorbente: $\alpha_{pp} \approx 0.95$. El resto de la radiación que llega al polipropileno en este rango de longitudes de onda es reflejado, por lo que la reflectancia del polipropileno, $\rho_{pp} \approx 0.05$. Esto quiere decir que menos del 1% de la radiación que llega al polipropileno lo llega a traspasar. (Thermtest Research Ltd., s.f.)

5.4.6 RADIACIÓN SOLAR SOBRE EL COLECTOR

El valor de la energía por m^2 que emite el sol es, calculado con la Ley de Stefan-Boltzman, $E_{b_{sol}} = (5.67 \cdot 10^{-8}) \cdot (5800 \text{ K})^4 = 6.33 \cdot 10^7 \text{ (W/m}^2\text{)}$. Esta cantidad de energía se dispersa esféricamente al propagarse. Al llegar a la tierra, a una distancia media de $r = 1.496 \cdot 10^{11} \text{ m}$, la energía procedente del sol es:

$$G_0 = \frac{E_{b_{sol}}}{4\pi r^2} = 1361 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Este valor es conocido como la Constante Solar.

Además, la radiación que llega a la tierra se atenúa al pasar por la atmosfera. Esto ocurre debido a diversos factores: la dispersión de Rayleigh (que produce el color azul del cielo), absorción de gases atmosféricos (mayoritariamente ozono, vapor de agua, CO₂), nubes y la reflexión de la propia atmosfera. Esta atenuación depende de la masa de aire (AM), que representa la cantidad de aire que atraviesa la luz solar antes de llegar al suelo en función de la altura solar. Cuando el sol está en su cenit, $AM=1$, y cuando el sol se encuentra bajo en el cielo, $AM>1$, aumentando la dispersión.

De esta forma, se puede expresar la radiación total que llega a una superficie horizontal:

$$G_h = G_b + G_d$$

Donde G_b representa la radiación solar que llega de forma directa y G_d la radiación que llega difusa, dispersada en la atmosfera.

Para un día soleado, la componente directa es la principal:

$$G_h \approx 900-1000 \text{ W/m}^2$$

Para un día parcialmente nublado, el valor de G_d aumenta ligeramente debido a la presencia de nubes, y el valor de G_b disminuye:

$$G_h \approx 400-700 \text{ W/m}^2$$

Para un día muy nublado, el valor de G_d aumenta considerablemente, y el valor de G_b disminuye todavía más:

$$G_h \approx 100-300 \text{ W/m}^2$$

Considerando un día despejado y soleado promedio, se empleará un valor:

$$G_b = 700 \text{ W/m}^2$$

$$G_d = 100 \text{ W/m}^2$$

$$G_h = 800 \text{ W/m}^2$$

Este es el valor de la radiación que llega a una superficie horizontal procedente del sol.

Pero, al estar el colector a un cierto ángulo, β , desde el suelo, este valor es diferente de la energía que llega al colector, G_t .

Se puede expresar G_t como la suma de la radiación directa horizontal, la radiación difusa sobre el plano horizontal, y la radiación reflejada desde el suelo, ponderando cada valor por su correspondiente factor de conversión, debido a la inclinación:

$$G_T = G_b \cdot R_b + G_d \cdot R_d + G_r \cdot R_r$$

Donde:

G_b : radiación directa sobre el plano horizontal.

G_d : radiación difusa sobre el plano horizontal.

G_r : radiación reflejada desde el suelo.

R_b : factor de corrección para inclinar G_b

R_d : factor de corrección para G_d

R_r : factor de corrección para G_r

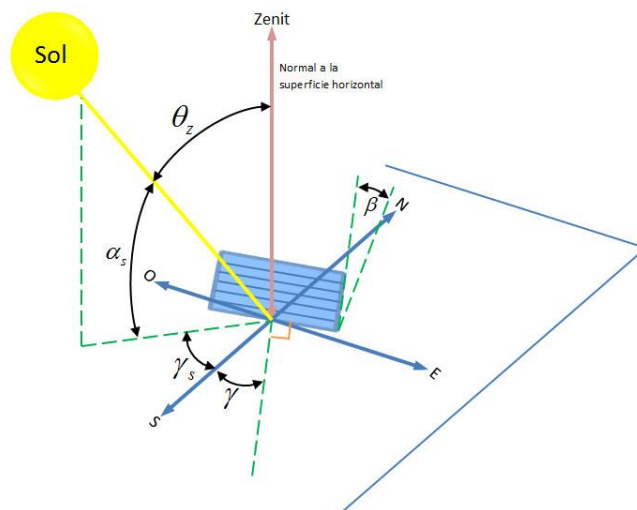


Figura 23: ángulos de incidencia solar (J.A. Acosta, s.f.)

Para el cálculo de los factores de corrección, es crucial conocer los diferentes ángulos de posición del sol y del colector (J.A. Acosta, s.f.).

Estos son:

Θ_z : ángulo zenit.

γ_s : ángulo azimutal solar.

α_s : ángulo de altitud solar.

β : ángulo de inclinación del colector.

γ : ángulo azimutal del colector.

Φ : ángulo de latitud.

δ : ángulo de declinación.

ω : ángulo horario.

Θ : ángulo de incidencia (entre la normal del colector y el sol)

n : n-ésimo día del año

las fórmulas que describen el movimiento y rigen estos ángulos son:

$$\text{formula de Cooper: } \delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right)$$

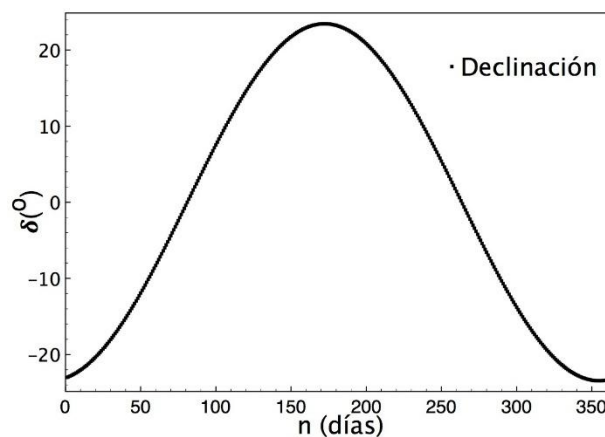


Figura 24: Declinación según día del año (J.A. Acosta, s.f.)

Por otra parte, se puede relacionar el ángulo de incidencia con el resto (δ , Φ , β , γ , ω) mediante:

$$\begin{aligned}\cos(\theta) = & \cos(\delta) \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\Phi) - \sin(\delta) \cdot \cos(\Phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \cos(\delta) \cdot \cos(\Phi) \\ & \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) + \cos(\delta) \cdot \sin(\Phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\omega) + \cos(\delta) \\ & \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin(\omega)\end{aligned}$$

y

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_z) \cdot \cos(\beta) + \sin(\theta_z) \cdot \cos(\gamma_s - \gamma)$$

El ángulo de Azimut solar γ_s puede tomar valores en el rango entre 180° a -180° . Para latitudes norte o sur entre 23.45° y 66.45° , γ_s estará entre 90° y -90° para días con menos de 12 horas de duración. Para días con más de 12 horas entre el amanecer y el ocaso, γ_s será menor de -90° o mayor de 90° , en la mañana o en la tarde, respectivamente, cuando el Sol esté al norte de la línea este-oeste en el hemisferio norte, o al sur de la línea este-oeste en el hemisferio sur. Para latitudes tropicales γ_s puede tomar cualquier valor cuando $(\delta - \phi)$ es positivo en el hemisferio norte, o negativo en el sur.

Así, para calcular γ_s necesitamos saber en qué cuadrante estará el sol. Esto se determina midiendo la relación entre el ángulo horario ω y el ángulo horario ω_{ew} , cuando el sol está hacia el este (o el oeste). Una formulación general para γ_s establecida por Braun y Michell, puede escribirse convenientemente en términos de γ'_s , definido como un ángulo azimutal solar ficticio, para el primer o cuarto cuadrante. De acuerdo con Braun y Michell, el ángulo azimutal solar está dado por:

$$\gamma_s = C_1 \cdot C_2 \cdot \gamma'_s + C_3 \cdot \left(\frac{1 - C_1 \cdot C_2}{2} \right) \cdot 180$$

$$\sin(\gamma_s) = \frac{\sin(\omega) \cdot \cos(\delta)}{\sin(\theta_z)}$$

$$\cos(\omega_{ew}) = \frac{\tan(\delta)}{\tan(\Phi)}$$

$$C_1 = \begin{cases} 1 & \text{si } |\omega| < \omega_{ew} \\ -1 & \text{cualquier otro caso} \end{cases}$$

$$C_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } \Phi \cdot (\Phi - \delta) \geq 0 \\ -1 & \text{cualquier otro caso} \end{cases}$$

$$C_3 = \begin{cases} 1 & \text{si } \omega \geq 0 \\ -1 & \text{cualquier otro caso} \end{cases}$$

Es importante notar que si $\frac{\tan(\delta)}{\tan(\Phi)}$ es mayor que 1, entonces no es posible determinar si el Sol está hacia el este o el oeste del observador. En tal caso es suficiente con hacer $C_1=1$, evitando de esta manera el caso $\Phi=0$.

En primer lugar, el factor de corrección R_b calcula el cociente entre la irradiancia normal a la superficie y la horizontal:

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)}$$

El resto de factores de corrección se calculan como:

$$R_d = \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$$

$$R_r = \rho \cdot \frac{1 - \cos(\beta)}{2}$$

Donde ρ representa la reflexión del suelo, típicamente $\rho=0.2$.

Ahora, para obtener el valor de G_b y G_d , se empleará con el fin de facilitar los cálculos de este proyecto, el modelo de claridad simplificado:

$$k_t = \frac{G_h}{H_0}$$

$$H_0 = G_0 \cdot dr \cdot \cos(\theta_z)$$

$$dr = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right)$$

Donde:

G_h : radiación global media sobre el plano horizontal.

H_0 : radiación extraterrestre horizontal (sin atmosfera).

k_t : fracción de radiación que realmente llega al suelo.

dr : factor de corrección de distancia al Sol para cada día del año.

Para días muy claros, $k_t \approx 1$, para los días más nublados, k_t disminuye.

Se empleará:

$$F = f(k_t)$$

$$= \begin{cases} 1.02 - 0.254 \cdot k_t + 0.0123 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) & \text{si } k_t < 0.35 \\ 1.45 - 1.67 \cdot k_t + 0.054 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) & \text{si } 0.35 < k_t < 0.75 \end{cases}$$

$$G_d = F \cdot H_0$$

$$G_b = (1 - F) \cdot H_0$$

Donde:

F: fracción difusa

Este cálculo aplicaría únicamente para días despejados y sin nubes. Para generalizarlo más, se introduce el concepto de factor de atenuación atmosférica:

$$C_{atm} = 1 - 0.75 \cdot f_{nub}$$

$$H_{0_nub} = H_0 \cdot C_{atm}$$

Donde:

C_{atm} : coeficiente de transmisión atmosférica.

f_{nub} : porcentaje de nubosidad

El factor 0.75 es una aproximación razonable usada en modelos simples, aunque puede variar según el día, y la localización (Çengel, 2015).

Por último, se obtiene el valor de la radiación solar que incide sobre el colector inclinado como:

$$G_T = G_b \cdot R_b + G_d \cdot R_d + (G_b + G_d) \cdot R_r$$

De esta forma, la cantidad de energía que entra dentro del colector procedente del Sol será:

$$G_{T_traspasa} = G_T \cdot \tau_{policarbonato}$$

5.4.7 CALENTAMIENTO POR CONDUCCIÓN Y CONVECCIÓN

El calor transferido por conducción del material caliente (policarbonato o elemento absorbente de polipropileno) se puede calcular de forma:

$$Q_{agua_cond} = \frac{k_{pp} \cdot A}{L} \cdot (T_{material} - T_{agua})$$

Donde:

$k_{material}$: conductividad térmica del material ($\approx 0.22 \frac{W}{m \cdot K}$ para el polipropileno)
($\approx 0.20 \frac{W}{m \cdot K}$ para el policarbonato)

L: espesor del elemento absorbente en metros ($\approx 0.00075m$ para el polipropileno)
($\approx 0.0006m$ para el policarbonato)

A: Área de contacto entre el agua y el material
($\approx 1\text{m}^2 \cdot 95\% = 0.95\text{m}^2$ para el polipropileno)
($\approx 1\text{m}^2$ para el policarbonato)

T: temperatura del material o del agua (K)

Uniendo las contribuciones de ambos flujos de calor:

$$Q_{tot_agua_cond} = Q_{pp_agua_cond} + Q_{pc_agua_cond}$$

Es crucial resaltar que esta transferencia de calor por conducción es aplicable para cuando el fluido este detenido, es decir, no hay movimiento relativo entre los sólidos (policarbonato y polipropileno) y el fluido (agua).

En el caso en el que, si haya flujo, fluido en movimiento, el proceso de transferencia de calor por conducción no aplica.

Se empleará en su lugar el proceso de transferencia de calor por convección.

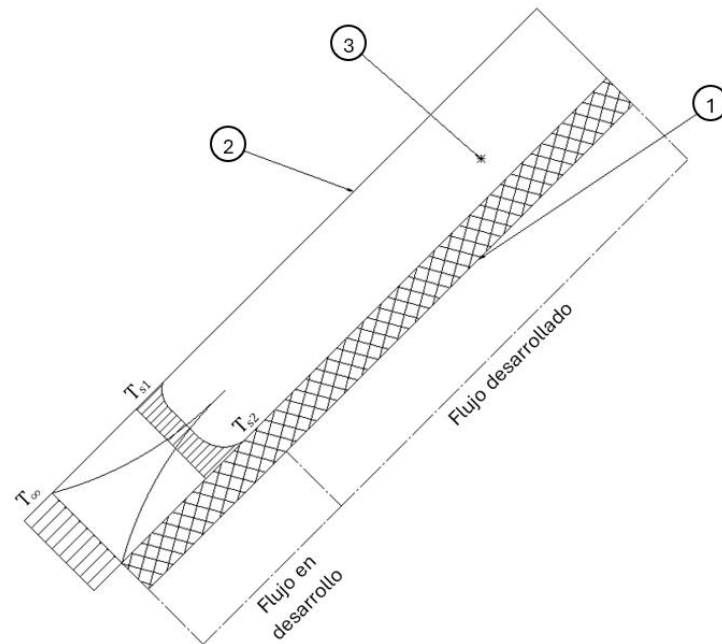


Figura 25: Esquema interno del colector solar (AutoDesk, s.f.)

Donde:

1: Elemento absorbente de polipropileno

2: Colector de policarbonato

3: Agua

T_{∞} : Temperatura en la corriente libre

T_{s1} : Temperatura del elemento absorbente de polipropileno

T_{s2} : Temperatura del colector de policarbonato

Como se ha calculado anteriormente, la radiación solar sobre el colector G_T , incide de forma equitativa sobre toda la superficie. De esta forma, se puede asumir el flujo de calor que penetra dentro del colector para calentar el agua como constante:

$$q_s'' = cte$$

El flujo de calor que llega al fluido procede de la porción absorbida de la radiación incidente que ha traspasado la primera capa del colector:

$$G_{absorvida} = \tau_{pc} \cdot \alpha \cdot G_T$$

De la cantidad de energía que traspasa el policarbonato, parte será absorbida por el agua, y parte será absorbida por el elemento absorbente de polipropileno negro, que recubre un 99% del área expuesta del colector. Esta absorción de energía estará determinada por la absorptancia del agua y del elemento absorbente de propileno negro. Pero, el valor de la absorptancia del agua es mucho menor que el del polipropileno, es por ello por lo que se considera que solo el elemento absorbente de polipropileno absorbe radiación para calentarse.

Se calcula de la forma

$$q_s'' = G_T \cdot \tau_{pc} \cdot f_{pp} \cdot \alpha_{pp}$$

Donde:

f_{pp} : porcentaje del área del colector con polipropileno ($f_{pp} \approx 0.99$).

α_{pp} : absorptancia del polipropileno ($\alpha_{pp} \approx 0.95$)

τ_{pc} : transmitancia del policarbonato.

Parte de la energía es absorbida por el elemento absorbente de polipropileno para calentarse, y el resto será reflejado. La proporción de radiación reflejada por el polipropileno viene determinada por su reflectancia, $\rho_{pp} \approx 0.05$. Esta radiación que el polipropileno no llega absorber y es reflejada, en principio no sería útil para calentar el agua, pero, es emitida en un rango de longitud de onda en el que el policarbonato no es transparente, si no que actúa como un cuerpo gris. Esto provoca que la radiación vuelva a ser o absorbida o reflejada por

el policarbonato. De esta forma, poco a poco, toda la radiación que ha traspasado la primera capa de policarbonato será absorbida por los materiales, y servirá para calentar el agua.

A este efecto en el que la radiación (en un determinado margen de longitudes de onda) no puede escapar, y se absorbe poco a poco, se le conoce como efecto invernadero.

Por tanto, la radiación útil que llega al colector para calentar el agua viene dada por:

$$q_s'' = G_T \cdot \tau_{pc}$$

Donde:

q_s'' : flujo de calor útil

G_T : Radiación solar incidente sobre el plano inclinado del colector.

τ_{pc} : transmitancia del policarbonato (≈ 0.82)

Para obtener la función de variación de temperatura de la pared, $T_s(x)$, y del fluido, $T_b(x)$, en función de la distancia recorrida x , es necesario primeramente conocer la temperatura media de masa del fluido a la entrada, T_{be} .

Su expresión viene dada por:

$$T_{be} = \frac{\int_A T \cdot u \, dA}{\bar{u} \cdot A}$$

Donde:

A : Area seccional del colector

u : velocidad del fluido

En el caso del colector solar relevante para este estudio, se asume la temperatura (T), y la velocidad (u) del fluido como valores constantes para una misma sección del colector, por lo que la integral de área se simplifica a:

$$\int_A T \cdot u \, dA = T \cdot \bar{u}$$

De forma que la temperatura media de masa a la entrada del colector es igual a la temperatura del fluido en ese mismo punto:

$$T_{be} = T$$

Se obtiene la expresión de temperatura del fluido a lo largo del colector, como se ha explicado en el punto 4.1.3, como:

$$T_b(x) = T_{be} + \frac{q_s'' \cdot p}{\dot{m} \cdot c_p} x$$

$$p = 2 \cdot l + 2 \cdot e$$

$$\dot{m} = \rho_{agua} \cdot Q$$

Donde:

p: perímetro mojado del colector

l: longitud ancha del colector (l=1m)

e. espesor del colector (e=2cm=0.02m)

q_s'' : flujo de calor útil

$\dot{m}$: flujo masico (kg/s)

ρ_{agua} : densidad del agua (kg/l)

Q: caudal volumétrico (Q=72 l/h = 0,02 l/s)

De la misma forma, se puede obtener la ley de la temperatura de la pared como:

$$T_s(x) = T_b(x) + \frac{q_s''}{h}$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D_h}$$

$$D_h = 4 \cdot \frac{A}{p}$$

$$A = l \cdot e$$

Donde:

Nu: número de Nusselt.

D_h : diámetro hidráulico

A: área transversal del colector

p: perímetro hidráulico

k: conductividad del material

Para flujo de calor uniforme y, dado que el cociente a/b del colector es aproximadamente $\approx \infty$; de la figura 11, se obtiene un número de Nusselt: $Nu=8,24$. (Çengel, 2015)

5.4.8 PÉRDIDA DE CALOR.

Durante el funcionamiento de un colector solar térmico, una parte de la energía solar absorbida no se transforma en calor útil para calentar el fluido caloportador, sino que se pierde hacia el entorno. Estas pérdidas térmicas reducen la eficiencia global del sistema y se convierten en un aspecto fundamental a considerar tanto en el diseño como en la evaluación del rendimiento del colector.

Las pérdidas de calor se producen principalmente por dos mecanismos: radiación y convección. La radiación térmica ocurre desde la superficie externa del colector, especialmente si esta alcanza temperaturas superiores a la del ambiente. La convección, por su parte, tiene lugar por el intercambio de calor entre la superficie caliente del colector y el aire ambiente, más frío, que lo rodea. En menor medida también pueden existir pérdidas por conducción, especialmente si no se ha aplicado un aislamiento adecuado en los bordes o cara posterior del colector. Para el ensayo del colector relevante a este trabajo, se ha aplicado un aislante térmico en la parte posterior y lateral del colector, por lo que las pérdidas de calor por conducción no serán relevantes

Para evaluar el comportamiento térmico del colector diseñado en este proyecto, es necesario cuantificar estas pérdidas, ya que permiten estimar el rendimiento térmico real del sistema, identificar los puntos críticos de diseño donde se escapa energía y proponer mejoras de eficiencia en versiones futuras del colector.

El cálculo de estas pérdidas se abordará mediante expresiones teóricas basadas en las leyes físicas de la transferencia de calor (como la ley de Stefan-Boltzmann para radiación y correlaciones empíricas para convección), considerando las propiedades térmicas de los materiales utilizados (como el policarbonato y el polipropileno) y las condiciones de operación del sistema (temperatura del colector, temperatura ambiente, viento, etc.). Además, se apoyará el análisis con herramientas como MATLAB para refinar los cálculos en escenarios realistas.

La correcta determinación de estas pérdidas es esencial no solo para conocer el comportamiento energético del colector, sino también para compararlo con otros sistemas similares y para justificar el uso de determinados materiales o configuraciones constructivas dentro del contexto de un diseño de bajo coste y alta eficiencia.

5.4.8.1 Pérdidas por Radiación.

Se ha analizado anteriormente como cualquier cuerpo a mayor temperatura que el 0 absoluto emite calor en forma de radiación.

Es importante resaltar que, para el colector, toda la radiación térmica sale de la superficie externa del policarbonato.

$$Q_{rad} \left(\frac{W}{m^2} \right) = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) \cdot (E_b(\lambda, T_{col}) - E_b(\lambda, T_{amb})) d\lambda$$

Simplificando el valor de la emisividad al correspondiente para las longitudes de onda infrarrojas, $\varepsilon \approx 0.85$

Obtenemos, suponiendo $T_{col}=70^\circ\text{C}$ y $T_{amb}=25^\circ\text{C}$:

$$Q_{rad} \left(\frac{W}{m^2} \right) = 0,85 \cdot \sigma \cdot (343^4 - 298^4) = 287 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Para realizar esta integral de forma más precisa, se empleará la plataforma de cálculo Matlab. Esta plataforma, permite el cálculo de la pérdida de energía por radiación conociendo la temperatura ambiente y la temperatura de la superficie del colector.

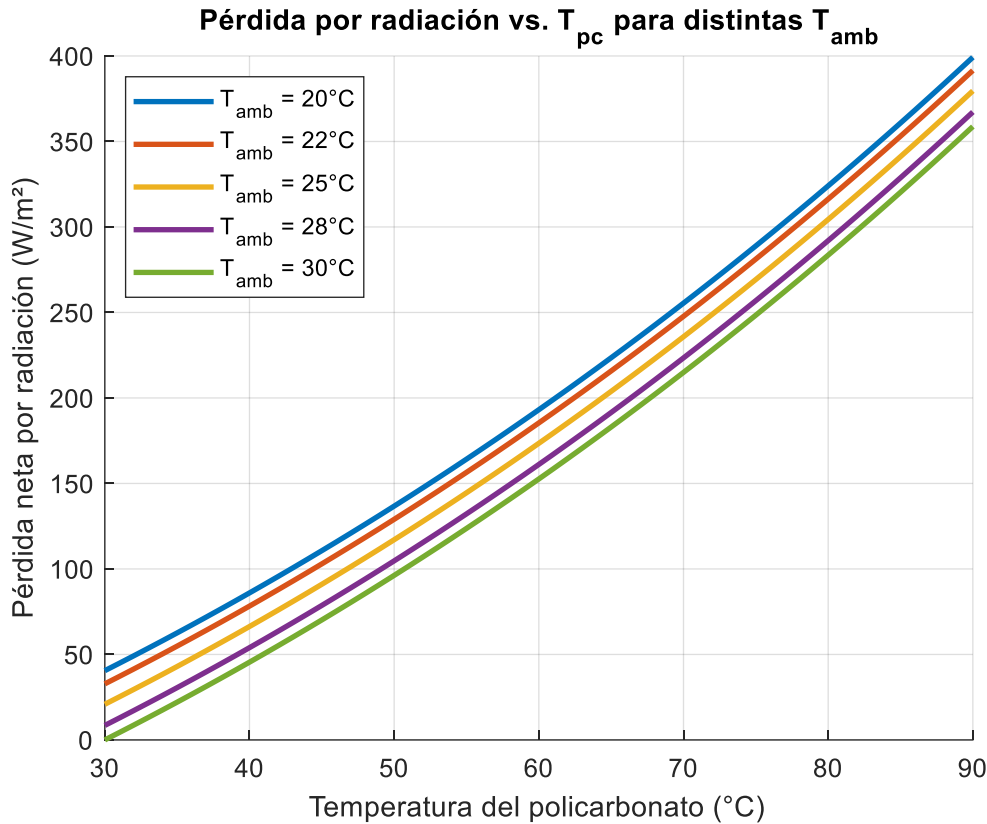


Figura 26: Pérdidas por radiación según temperatura (MathWorks, s.f.)

La grafica muestra como aumentan las pérdidas por radiación conforme aumenta la temperatura de la superficie del colector. De la misma forma, se observa que las pérdidas disminuyen conforme aumenta la temperatura ambiente. Se observa que el valor que hemos calculado de forma aproximada, 287 W/m^2 es razonablemente parecido, aunque no idéntico al valor calculado en Matlab.

5.4.8.2 Pérdidas por convección.

Las pérdidas de calor al ambiente por convección del colector solar relevante a este estudio se producen por convección natural.

A diferencia de la convección forzada, en la convección natural no existe ninguna fuerza externa que mueva el fluido. El fluido se mueve debido a cambios de densidad que resultan del calentamiento o enfriamiento del fluido.

Para el caso del colector solar se parte de:

- Una superficie inclinada a temperatura T_s .
- En un medio ambiente a temperatura $T_\infty < T_s$.
- La superficie calienta el fluido (aire) en su vecindad inmediata.
- El aire disminuye localmente su densidad respecto a la del aire lejos de la superficie.
- Se produce una fuerza de empuje que hace ascender el fluido de menor densidad inmediato a la superficie.
- Como resultado se establece un flujo continuo cuya velocidad depende de la magnitud de la diferencia $\Delta T = T_s - T_\infty$.

Como el flujo se debe a la existencia de ΔT , es esta diferencia de temperaturas la que causa el movimiento del fluido, y no una velocidad externa:

Se evalúan las propiedades del aire a una temperatura media T_a entre la temperatura ambiental lejos del colector T_∞ , y la temperatura de la superficie del colector T_s .

$$T_a = \frac{T_\infty + T_s}{2}$$

Del Anexo1: Propiedades del aire, se obtienen las propiedades necesarias:

$\beta \approx 1/T_a$ (para gases ideales)

ν : viscosidad cinemática

α : difusividad térmica

k : conductividad térmica

Se calcula el número de Rayleigh como:

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha}$$

Donde:

L: Longitud característica, longitud del panel.

Teniendo en cuenta la inclinación del colector solar θ , respecto a la horizontal, se ajusta el número de Rayleigh como:

$$Ra_L^* = Ra_L \cdot \cos(\theta)$$

De esta forma, se puede obtener el número de Nusselt como:

$$Nu_L = C \cdot (Ra_L^*)^n$$

Donde C y n son coeficientes dependientes de la geometría, inclinación y régimen del flujo.

Para régimen laminar se aproximan estos valores a:

$$C=0.59$$

$$n=0.25$$

Y para régimen turbulento:

$$C=0.1$$

$$n=0.33$$

Las pérdidas de calor por convección del colector se obtienen de:

$$q_{perd_conv} = h_{nat} \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty})$$

Donde:

$$h_{nat} = \text{coeficiente de conveccion natural} = \frac{Nu_L \cdot k}{L}$$

(Incropera, 2011) (Holman, 2010) (Çengel, 2015)

Mediante la plataforma Matlab, se calculan las pérdidas por convección para casos típicos:

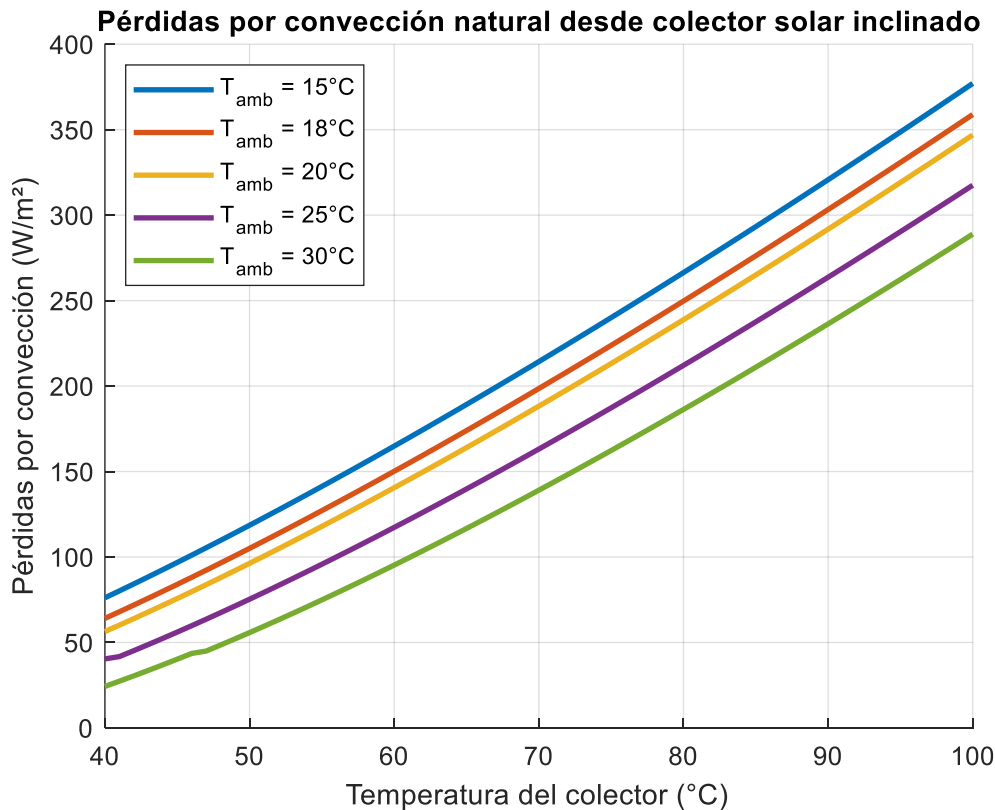


Figura 27: Pérdidas por convección natural (MathWorks, s.f.)

Se observa que, a mayor temperatura del colector, las pérdidas aumentan. Por otro lado, a mayor temperatura ambiente, las pérdidas de calor por convección disminuyen. Esto se debe a que las pérdidas están directamente relacionadas con la diferencia de temperatura entre el ambiente y la superficie exterior del colector.

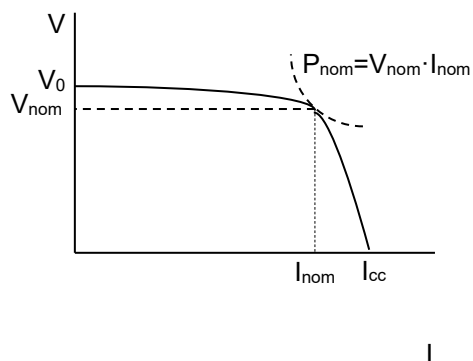
5.4.9 RESUMEN DEL MODELO TÉRMICO DE PANEL SOLAR

La radiación solar está en la base de buena parte de los fenómenos y procesos que tienen lugar en la Tierra. El ciclo hidrológico, las corrientes marinas, el viento, las temperaturas atmosféricas, la iluminación natural, o la vida misma, son sólo algunas de sus manifestaciones.

El Sol radia como un cuerpo negro a unos 5760 K, siendo la radiación incidente en el exterior de la atmósfera terrestre de 1353 W/m² de media anual. Debido a las absorciones y reflexiones atmosféricas, la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra está considerablemente debilitada, no más de 950 W/m² al mediodía de un día despejado en el ecuador. La radiación térmica solar está comprendida en el rango de longitudes de onda entre 0,3 y 3 mm, con un máximo en 0,5 mm. El aprovechamiento de la energía solar puede realizarse en forma de energía térmica (conversión fototérmica) o de energía eléctrica (conversión fotovoltaica). (Holman, 2010)

La conversión fotovoltaica se realiza en las denominadas células fotovoltaicas, que se agrupan formando lo que se denomina panel solar fotovoltaico. Sin embargo, no toda la radiación solar es susceptible de producir el efecto fotoeléctrico, por lo que el rendimiento máximo de una célula de silicio es del 40% en condiciones controladas de laboratorio, aunque en instalaciones reales no supera el 20%.

El comportamiento de un panel fotovoltaico está definido por su curva característica, que recoge la intensidad de corriente proporcionada en función de la tensión de salida. Esta curva depende fuertemente del tipo y potencia de la radiación incidente.



V_0 : tensión de vacío

V_{nom} : tensión nominal

I_{cc} : intensidad de cortocircuito

I_{nom} : intensidad nominal

P_{nom} : potencia nominal

Por otro lado, en la conversión fototérmica la radiación solar incide sobre una superficie absorbente (de elevada absorción solar α_s y baja emisividad ϵ), donde se transforma en energía térmica, que finalmente es transferida a un fluido caloportador como energía útil,

cuya potencia viene dada por $q_u = \dot{m} c_p (T_s - T_e)$, siendo $\dot{m}$ el gasto de fluido caloportador que circula por el captador, c_p su calor específico y T_e y T_s sus temperaturas de entrada y salida.

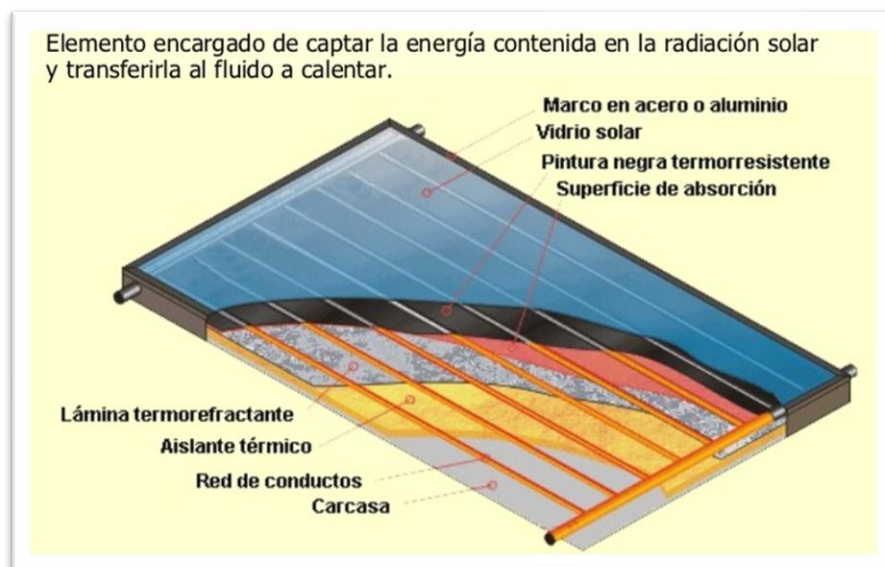
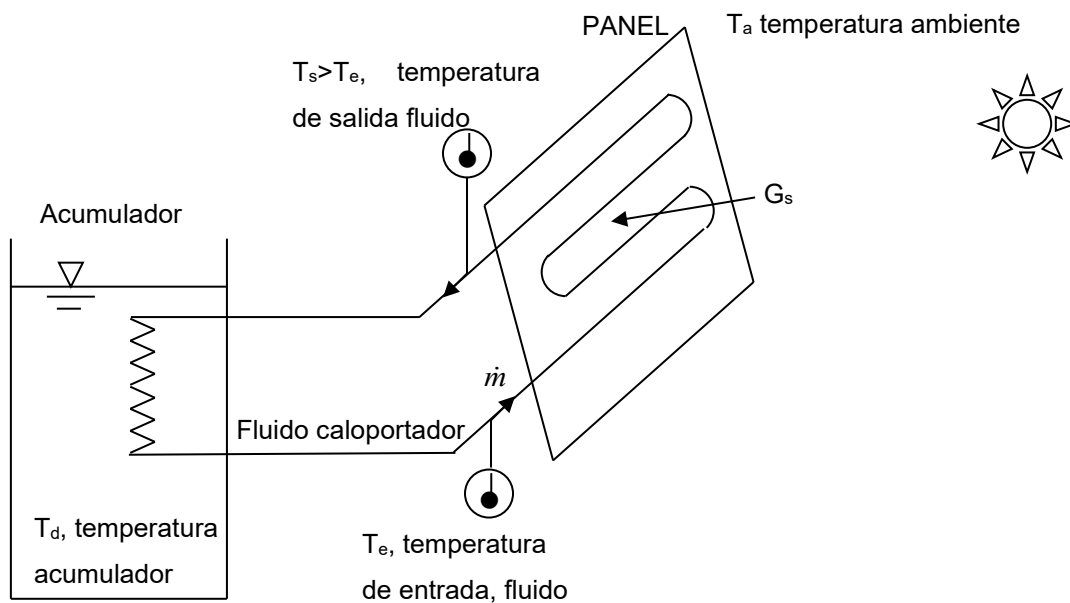


Figura 28: Interior colector solar térmico (HOGARSENSE)

Este modo de conversión, desde la potencia radiante incidente $G_s \cdot A_c$ a la potencia térmica útil $\dot{m} c_p (T_s - T_e)$, no tiene limitaciones espectrales, ya que la radiación solar es susceptible en su totalidad de ser absorbida y convertida en energía térmica. Sin embargo, la mayor temperatura del absorbedor respecto a su entorno da lugar a pérdidas de calor, lo que disminuye el rendimiento de conversión. Para reducir estas pérdidas, el captador se recubre de una gruesa capa de aislante térmico, excepto en el área expuesta a la radiación. Por este lado, el captador se cierra con vidrio, material transparente a la radiación solar y opaco frente a la radiación infrarroja que emite la propia placa absorbedora, lo que reduce considerablemente las pérdidas por convección y radiación desde el absorbedor. También se consigue reducir la pérdida por radiación dotando al absorbedor de un recubrimiento selectivo, cuya emisividad sea lo más baja posible.

En el funcionamiento del captador plano intervienen procesos radiantes (absorción, emisión y efecto invernadero), conductivos y convectivos. Una gran parte de la radiación solar atraviesa la cubierta de vidrio e incide sobre la superficie absorbedora, dotada de un recubrimiento de elevada absorptancia solar α_s , lo que permite absorber casi toda la radiación incidente, y de baja emisividad ϵ , lo que hace que el calor por emisión propia sea pequeño. Esta radiación se convierte en energía térmica, que atraviesa por conducción la pared del absorbedor hasta transferirse finalmente por convección al fluido caloportador que circula por el interior del captador, constituyendo ésta la energía útil del sistema. Una fracción de la energía térmica se pierde por convección y radiación al entorno.

La potencia incidente sobre la superficie del captador es:

$$q_i = G_s A_c$$

Pero de esta potencia incidente, la que realmente es absorbida q_a por el panel, es la que consigue atravesar el vidrio ($\tau_s q_i$) y luego ser absorbida por la superficie absorbedora:

$$q_a = \alpha_s \tau_{s_v} q_i = \alpha_s \tau_{s_v} G_s A_c$$

y si se tiene en cuenta las reflexiones múltiples entre la placa absorbedora y la cubierta de vidrio:

$$q_a = \frac{\alpha_s \tau_{s_v}}{1 - (1 - \alpha_s) \rho_{s_v}} G_s A_c$$

siendo:

- α_s Absortancia solar de la placa absorbedora
- τ_{s_v} Transmisividad solar de la cubierta de vidrio
- ρ_{s_v} Reflectancia solar de la cara interna de la cubierta de vidrio ($\rho_{s_v} \gg 0,12$)
- G_s Radiación solar incidente. Depende de las condiciones atmosféricas del lugar y del ángulo de incidencia de la radiación, función a su vez de la latitud del lugar, del día del año, la hora y la orientación del captador. Incluye la radiación solar directa y difusa.
- A_c Área de la superficie absorbedora.

Tratando de evaluar las pérdidas del panel, y teniendo en cuenta que éste tiene una temperatura de operación relativamente baja, se puede considerar que las pérdidas radiantes varían linealmente con la diferencia de temperatura entre la de la placa absorbedora T_p y la ambiente T_a (coeficiente de radiación hr constante):

$$q_p = U_L A_c (T_p - T_a)$$

siendo U_L el coeficiente global de pérdidas, fuertemente afectado por el coeficiente de convección exterior (viento).

En el supuesto que la resistencia térmica a la conducción de la placa absorbidora fuese nula, coincidirían las temperaturas de la placa (T_p) y la media del fluido $T_f = \frac{T_e + T_s}{2}$, siendo T_e y T_s las temperaturas de entrada y de salida del fluido en el panel. En tal caso la potencia de pérdidas q_p^* vendría dada por:

$$q_p^* = U_L A_c (T_f - T_a)$$

que resultaría menor que q_p dado que $T_f - T_a < T_p - T_a$. Definiendo un rendimiento interno F de la placa absorbidora como el cociente entre la potencia térmica transmitida al fluido y la que se transmitiría si dicha placa estuviese a la temperatura media del fluido (T_f):

$$F = \frac{q_u}{q_u^*(T_p = T_f)} = \frac{q_u}{q_a - q_p^*}$$

de donde:

$$q_u = F (q_a - q_p^*)$$

Finalmente, definiendo el rendimiento total η del captador como el cociente entre las potencias útil e incidente, resulta:

$$\eta = \frac{q_u}{q_i} = \frac{F (q_a - q_p^*)}{G_s A_c} = F \frac{\alpha_s \tau_{s_v}}{1 - (1 - \alpha_s) \rho_{s_v}} - F U_L \frac{T_f - T_a}{G_s}$$

Tomando como abscisa $\frac{T_f - T_a}{G_s}$, queda gráficamente como:

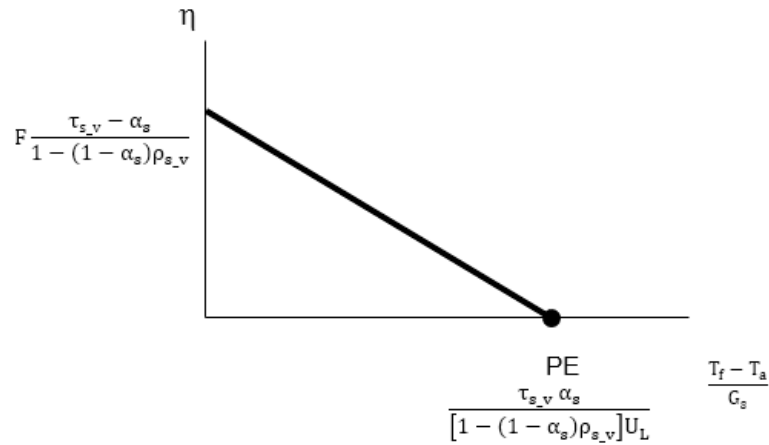


Figura 29: Rendimiento

Si se despreciaran las reflexiones múltiples entre la placa absorbadora y la cubierta de vidrio ($\rho_{s_v}=0$), resulta:

$$\eta = F \alpha_s \tau_{s_v} - F U_L \frac{T_f - T_a}{G_s}$$

Que gráficamente:

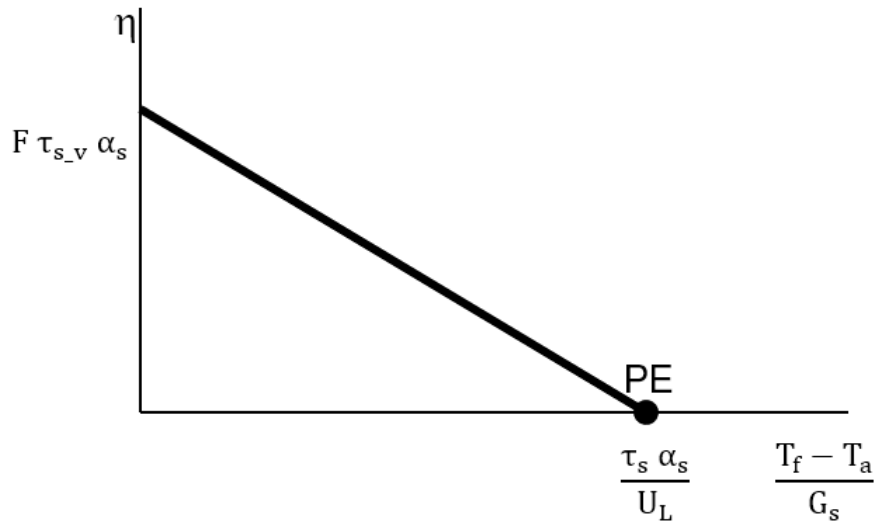


Figura 30: Rendimiento simplificado

Un captador térmico será tanto mejor (mayor rendimiento) cuanto más elevada sea la ordenada en el origen ($F \cdot \tau_{s_v} \cdot \alpha_s$), denominado rendimiento óptico (h_0), y menor sea la pendiente $F \cdot U_L$ de la línea de rendimiento.

La temperatura del captador correspondiente al punto PE se denomina temperatura de estancamiento, el cual tiene lugar cuando no hay circulación de fluido por el panel.

El cálculo del rendimiento en operación del panel se realiza mediante:

$$\eta = \frac{q_u}{q_i} = \frac{\dot{m} c_p (T_s - T_e)}{G_s A_c}$$

donde el significado de las diferentes variables ya se ha visto anteriormente.

5.5 ENSAYO Y VALIDACIÓN

5.5.1 PROCEDIMIENTO

- Disponer el captador solar a un ángulo de 55° respecto al suelo horizontal.
- Poner en marcha la bomba, abrir completamente la válvula del caudalímetro durante un par de minutos y establecer finalmente un caudal de $72 \text{ cm}^3/\text{min}$. Mantener constante este caudal durante todo el desarrollo del ensayo.
- Esperar los primeros minutos para que el sistema se estabilice (un tiempo no inferior a 5 minutos). Tomar lectura de las temperaturas.
- Tras la toma de suficientes datos, cuando el sistema ha alcanzado el régimen permanente, se procede encendiendo el calentador de agua incluido en el termo. De nuevo, esperar los primeros minutos para estabilizar el sistema. Tomar lectura de las temperaturas.

5.5.2 TOMA DE DATOS

Toma de datos: tomar lectura de las temperaturas ambiente T_a , entrada y salida de fluido caloportador (T_e , T_s) y del caudal Q de fluido caloportador:

Tabla 10: Medidas del ensayo

	T_a	T_e	T_s	Q
	[°C]	[°C]	[°C]	[l/h]
Acumulador (inicio)	32	36,64	43,37	72
Acumulador (final)	32	38,72	56,27	72

La tabla completa con las medidas se encuentra en el Anexo V.

5.5.3 RESULTADOS

Tabla 11: Resultados y medidas del ensayo

	T_f	T_a	c_p	ρ	$G_s \cdot A_c$	$(T_f - T_{amb})/G$	q_u	q_p	η
	[°C]	[°C]	[J/kg·K]	[kg/m³]	[W]	[°C/W]	[W/m²]	[W/m²]	[-]
Acumulador (inicio)	40,93	32	4179	992,1	918,91	0,00972	-710,29	1629,2	-0,77
Acumulador (medio)	34,66	32	4179	992,1	912,13	0,00297	269,66	642,5	0,30
Acumulador (final)	47,49	32	4179	992,1	850,1	0,01823	-1455,5	2305,6	-1,71

Ecuaciones utilizadas para el cálculo de la potencia útil q_u , potencia pérdida q_p y rendimiento η del captador:

$$q_u = Q \cdot \rho \cdot c_p (T_s - T_e)$$

$$q_p = G_s \cdot A_c - q_u$$

$$\eta = \frac{q_u}{G_s \cdot A_c}$$

5.5.4 EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO OBTENIDO

Se traza la recta de rendimiento del panel $\eta = f\left(\frac{T_f - T_a}{G_s}\right)$:

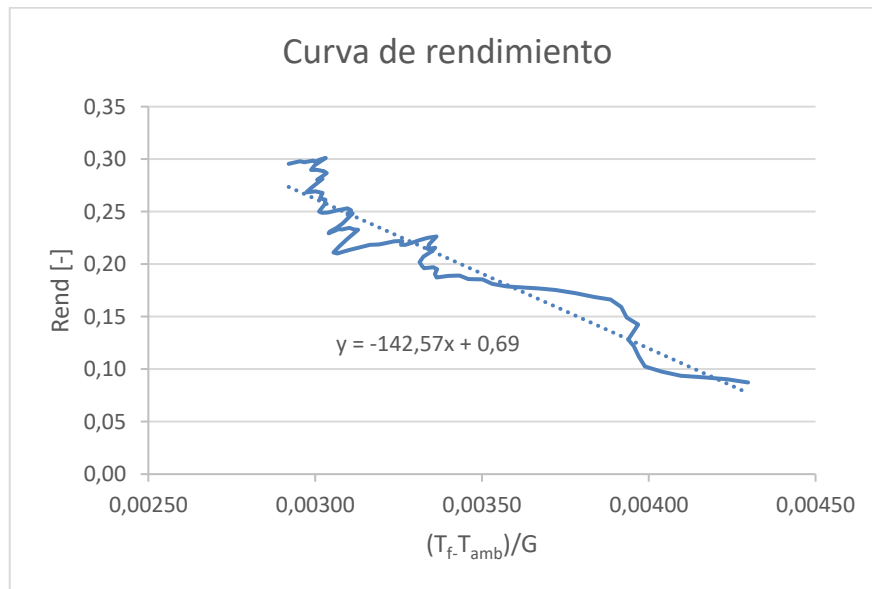


Figura 31: Rendimiento del colector

El rendimiento óptico del colector es el máximo porcentaje de energía solar que el colector es capaz de transformar en energía térmica, cuando no existe diferencia de temperatura entre el fluido caloportador y el ambiente.

Este viene dado por la ordenada en el origen de la curva de rendimiento térmico del colector:

$$\text{Curva de rendimiento: } y = -142,57 \cdot x + 0,69$$

$$\text{Rendimiento optico: } \eta_0 = 0,69$$

En la figura 32, se observa cómo, durante el ensayo, el rendimiento cae desde 0,3 hasta 0,09.

5.5.5 TEMPERATURA DE ESTANCAMIENTO DEL PANEL SOMETIDO A INSOLACIÓN

La temperatura de estancamiento del panel se calcula como la temperatura en la que el colector solar no puede disipar más energía al entorno que la que absorbe, estando expuesto a una radiación solar constante y con el fluido caloportador detenido, es decir, sin flujo de fluido. Esto hace que el colector solar se estabilice térmicamente.

Se calcula como el punto en el que el rendimiento térmico del colector (η) es 0:

$$\eta = 0 = \eta_0 + F \cdot U_L \cdot \frac{T_{\text{estancamiento}} - T_a}{G_s}$$

Donde:

$F \cdot U_L$: pendiente de la curva de rendimiento = -142,57

G_s : Radiación solar incidente = 1000 W/m²

Obteniendo:

$$T_{\text{estancamiento}} = T_a - \frac{\eta_0 \cdot G_s}{F \cdot U_L} = 32 + \frac{0,69 \cdot 1000}{142,57} = 36,84^\circ\text{C}$$

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante el proceso del ensayo, y atendiendo a las medidas y resultados obtenidos, se pueden diferenciar tres tandas de datos diferenciadas, resumidas en la tabla 8: resultados y medidas del ensayo.

En primer lugar, una primera etapa en la que el colector empieza a absorber calor. En esta etapa las medidas no son útiles ya que el colector está empezando a funcionar y es necesario esperar unos minutos para que las medidas se estabilicen. Es por ello, que los resultados en esta primera etapa no tienen sentido, encontrado resultados imposibles, como el rendimiento negativo.

En segundo lugar, una etapa en la que el colector funciona correctamente y absorbe calor de manera eficiente. En esta etapa se obtienen los valores útiles para la caracterización del colector en temperaturas frías ($<50^{\circ}\text{C}$).

Por último, se observa una tercera etapa que comienza cuando se enciende el calentador del termo para ensayar el colector con temperaturas elevadas ($>50^{\circ}\text{C}$). Los rendimientos en esta tercera etapa son negativos, ya que el agua calentada por la resistencia del termo llega primero al sensor de temperatura de la entrada. Esto provoca que la temperatura de entrada sea mayor que la temperatura de salida, provocando los rendimientos negativos. Mientras el calentador de agua está encendido, los rendimientos siguen disminuyendo, alcanzando un valor mínimo de -1,76. Una vez se apaga el calentador de agua, los rendimientos crecen hasta un valor de -1,71, cuando finaliza el ensayo. Se extrae como conclusión que el calentador de agua provocó durante el ensayo una subida muy elevada de la temperatura del agua, dando lugar a los rendimientos negativos, y una vez apagado el calentador, el ensayo finalizó antes de que las temperaturas de entrada y de salida del colector pudieran estabilizarse del todo. Recalcar el hecho de que estos rendimientos son irreales e imposibles si tan solo se tiene en cuenta el calor absorbido por el captador. Es debido al calentador de agua que aparecen estos resultados.

Atendiendo únicamente a los datos útiles obtenidos durante el ensayo, se pueden extraer varias conclusiones:

El rendimiento óptico calculado para el colector es de 0,69, es decir, 69%. Este valor es muy aceptable para un colector de bajo coste y puede llegar a compararse con los colectores comerciales del mercado con un rendimiento aproximadamente del 80%. Esto quiere decir que los materiales empleados son óptimos, el policarbonato deja pasar aproximadamente el 82% de la radiación solar incidente y el polipropileno negro absorbe >95% de la radiación que recibe. Estos valores encajan con el resultado obtenido durante el ensayo ($0,8 \cdot 0,9 \approx 0,72$) por lo que se concluye que la parte óptica del colector esta conseguida.

Por otro lado, el valor de la temperatura de estancamiento del colector es sorprendentemente baja, $T_{\text{estancamiento}}=36,84^\circ$, tan solo $4,84^\circ$ por encima de la temperatura ambiente de 32° . Este valor es consecuencia de un coeficiente de perdidas muy elevado.

La potencia útil se expresa como:

$$P_u = \eta_0 \cdot G - a_1 \cdot \Delta T$$

En el caso del colector relevante para este estudio, el coeficiente a_1 , que representa las perdidas por convección y radiación, es muy elevado. Ocurre que a medida que la temperatura del fluido aumenta, las pérdidas de calor crecen muy deprisa hasta alcanzar al calor útil absorbido. Esto limita la operación del colector a saltos térmicos de 4-5 K en días soleados y despejados.

Se explica que el coeficiente de perdidas sea tan elevado por varios motivos:

- En primer lugar, aunque se empleó un aislante térmico para la parte posterior del colector, este no lo protegía bien del viento en la parte delantera. El día del ensayo fue un día con mucho viento, lo que hizo que aumentaran extremadamente las perdidas por convección.

- En segundo lugar, durante el ensayo se reportó una pequeña fuga en la parte delantera del panel. Esta fue reparada de manera rápida, pero pudo ocasionar la pérdida de suficiente agua como para distorsionar el valor del calor útil realmente absorbido.

Esta temperatura de estancamiento protege el colector contra el sobrecalentamiento, pero evita que alcance temperaturas elevadas.

Como conclusión, el colector no podría ser usado como fuente de agua caliente para ACS o calefacción. Estos sistemas requieren alcanzar temperaturas elevadas para funcionar de forma correcta.

En cambio, podría encontrar aplicación como precalentador de agua, o climatización de piscina. Estos sistemas no necesitan alcanzar temperaturas tan elevadas, por lo que este colector podría funcionar de manera óptima.

6.1 ESTUDIO ECONÓMICO.

Este estudio tiene como objetivo analizar la posible aplicación comercial del prototipo de colector ensayado. A pesar de que todavía es necesario perfeccionar el prototipo, es crucial estimar su viabilidad económica en el futuro.

Se plantea el análisis económico con dos enfoques diferentes: Prototipo de laboratorio y Modelo replicable.

En primer lugar, el capital invertido para el prototipo de laboratorio fue de 1666 €. Este coste incluye: La estructura y el soporte del colector, el panel empleado como colector, sistema hidráulico e instrumentación y materiales de unión y sellado.

De entre todos estos costes, los más destacables son la estructura y el soporte del colector, con un coste de aproximadamente 910€, y el del sistema hidráulico e instrumentación, con un coste de 650€.

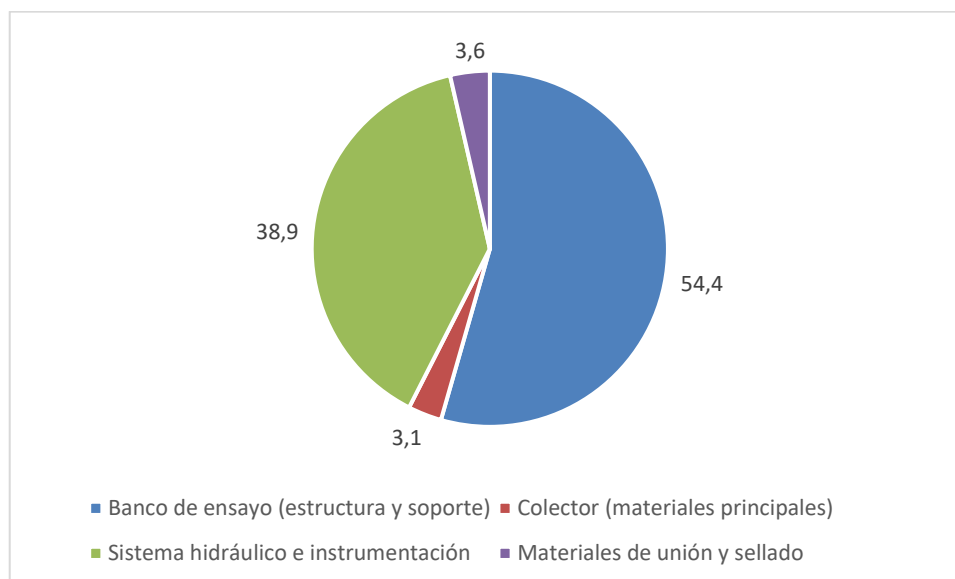


Figura 32: Distribución de costes del prototipo de laboratorio

Se observa que gran parte del peso económico total del colector (38,9% del total) proviene del sistema hidráulico e instrumentación, que incluye elementos como el datalogger, caudalímetro, sensores, ... Estos elementos son imprescindibles para los ensayos, pero no son necesarios para un modelo de uso comercial.

Se hace una estimación económica aproximada para un modelo futuro orientado hacia la comerciabilidad. En este se conservan elementos imprescindibles y prescindiendo de equipos de medida y perfilera de soporte, innecesarias para el uso comercial.

Tabla CAPEX:

Tabla 12: CAPEX

Colector (materiales)	51,00 €
adhesivos/sellantes	59,90 €
Bomba (Bosch Copreci)	23,50 €
tubería PVC 16 mm	11,00 €
racores/adaptadores	25,00 €
válvulas de corte/purga	28 €
aislante	7 €
termómetro sencillo	5 €
Total	210,40 €

Suponiendo una vida útil de captador de 5 años, el CAPEX anualizado sería aproximadamente de 50 €/año

También es necesario incluir los posibles costes de operación y mantenimiento (OPEX)

El coste de la energía de bombeo requerida para alimentar la bomba se puede calcular de la forma:

$$Coste_anual = P \cdot \frac{h}{dia} \cdot \frac{dias}{año} \cdot coste_kWh$$

Donde:

P: Potencia de la bomba empleada. Esta rondaría los 40W=0.04 kW.

Suponiendo un uso diario de 5h, y un uso anual de 150 días.

Coste_kWh: coste del kWh = 0,2 €/kWh

Se obtiene:

$$Coste = 0,04 \cdot 5 \cdot 150 \cdot 0,2 = 6€$$

Por otro lado, es necesario tener en cuenta el coste derivado del mantenimiento y sustitución de los materiales dañados. Este coste se aproxima anualmente a un 2% del CAPEX: 4€ anuales.

Por tanto, el coste total anual del colector es aproximadamente de 60€.

Los ensayos muestran un rendimiento útil en temperaturas de funcionamiento de 30% aproximadamente. Además, en el análisis de resultados se ha concluido que este captador actual no es útil para ACS/calefacción, si no que sería empleable como precalentador o aclimatación de piscina.

Suponiendo un rendimiento aproximado al del ensayo, se estima un valor razonable para el rendimiento de $\eta = 0,25$. Además, aproximando una radiación solar anual sobre la superficie del captador de $H_T = 1500 \text{ kWh/año}$, se concluye que la energía absorbida y aprovechada por el captador para calentar agua anualmente es:

$$E_{\text{util}} = H_T \cdot \eta = 375 \text{ kWh/año}$$

Se concluye que el beneficio bruto anual del colector, suponiendo un precio de $0,2 \text{ €/kWh}$, es de: 75 €/anuales .

Por lo tanto, el beneficio neto anual sería aproximadamente de 15€ anuales .

Se concluye que el modelo comercial podría ser viable en el futuro.

6.2 COMPARACIÓN CON TRABAJOS Y PRODUCTOS SIMILARES

Para situar el prototipo dentro del estado del arte y del mercado, se compara su coste, rendimiento óptico (η_0), temperatura de estancamiento, economía y rendimiento global con prototipos y colectores poliméricos de bajo coste, captadores comerciales de placa plana y tubos de vacío, y colectores no vidriados.

El modelo desarrollado muestra $\eta_0 \approx 0,69$ y una temperatura de estancamiento muy baja ($\approx 36,8 \text{ °C}$ con $T_a = 32 \text{ °C}$), indicando pérdidas térmicas elevadas en las condiciones de ensayo. Económicamente, el CAPEX simplificado del diseño replicable ronda 210 € (sin instrumentación), mientras que el conjunto de banco y prototipo instrumentado ascendió a $1.666,58 \text{ €}$. Estos valores sitúan al prototipo como opción de muy bajo coste pensada para aplicaciones de baja temperatura (precalentamiento, piscinas).

Los colectores planos certificados suelen presentar $\eta_0 \approx 0,80\text{--}0,82$ y coeficientes de pérdida moderados. Como referencia, una ficha Solar Keymark reporta $\eta_0 = 0,818$. Además, las temperaturas de estancamiento declaradas por fabricantes de captadores planos rondan típicamente $\approx 200\text{--}220 \text{ °C}$ (p. ej., 220 °C). En el mercado español se encuentran captadores de $\sim 2 \text{ m}^2$ por $\sim 460\text{--}550 \text{ €}$ (unidad). Frente a ello, el prototipo tiene un η_0 algo inferior y una

T_{estanc} muy por debajo del rango comercial, pero ventaja clara en CAPEX si se compara solo el captador. (Tu Calentador Economico, s.f.)

Por otro lado, los ETC exhiben η_0 en torno a 0,77–0,78 y estancamientos muy elevados ($\approx 205\text{--}286\text{ }^{\circ}\text{C}$ en hojas de datos representativas), lo que los hace adecuados para mayores saltos térmicos, a costa de un precio superior: en España, un colector de 20 tubos suele situarse en $\sim 800\text{--}1.100\text{ €}$ (solo colector). El prototipo queda muy por debajo en temperatura de estancamiento y capacidad para ACS/calefacción, pero muy por debajo también en coste, con el enfoque de bajo presupuesto. (Kingspan)

Por último, al comparar el prototipo con paneles poliméricos no vidriados, estos muestran $\eta_0 \sim 0,84$ en certificados OG-100 representativos, pero pierden eficiencia rápidamente cuando la T del fluido supera poco al ambiente; su uso típico es $35\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ para climatización de piscinas. En precio, hay paneles $2,7\text{--}4,6\text{ m}^2$ en el entorno de $\approx 245\text{--}400\text{ €}$ la unidad en distribuidores españoles.

Se concluye que, en términos de aplicación, el prototipo se comporta como un colector no vidriado. Debido a sus pérdidas elevadas y T_{estanc} baja, por lo que encaja, por ahora, en precalentamiento y aclimatación piscinas, no en ACS. (outletPiscinas)

Como conclusión, el prototipo ocupa un nicho de muy bajo coste y baja temperatura, con η_0 aceptable, pero T_{estanc} y pérdidas que lo alejan de aplicaciones térmicas medias y altas donde colectores de placa plana o tubos de vacío dominan. Frente a paneles no vidriados, su precio aproximado comercial es competitivo. Pero es crucial reducir pérdidas para que su cubierta aporte una ventaja real frente a los no vidriados. Es necesaria la mejora del modelo actual para elevar significativamente la temperatura de estancamiento y acercar el diseño a un modelo comercial.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este Trabajo Fin de Grado ha demostrado que es posible diseñar, construir y ensayar un colector solar térmico de bajo coste utilizando materiales accesibles (policarbonato para la cubierta y cuerpo y polipropileno negro como absorbente), integrándolo en un banco de pruebas regulable, a base de aluminio, y dotándolo de una instrumentación sencilla pero suficiente (Pt100, piranómetro, rotámetro y piezómetro diferencial). Se ha seguido rigurosamente el marco metodológico de la UNE-EN 12975:2022. Se ha establecido un caudal de referencia de $72 \text{ L/h}\cdot\text{m}^2$ para el prototipo de 1 m^2 , para el ensayo. Se han desarrollado además el circuito hidráulico completo, el soporte de perfiles de aluminio con inclinación regulable, y los procedimientos de ensayo y cálculo, incluyendo modelos y scripts de MATLAB, para caracterizar el comportamiento térmico e hidráulico del sistema.

En primer lugar, analizando el comportamiento hidráulico del sistema, el colector presenta pérdidas de carga muy bajas ($0,011 \text{ mca}$). La bomba Bosch Copreci seleccionada trabaja con holgura en el rango de caudales de interés. Se ha dimensionado y seleccionado un vaso de expansión de 5 L para absorber la dilatación del fluido en el rango de operación considerado, cerrando el diseño de un lazo hidráulico robusto y seguro para los ensayos.

Después, analizando el comportamiento térmico, el análisis y los ensayos permiten extraer varios resultados clave. Primero, el colector muestra un rendimiento óptico acorde a los materiales poliméricos elegidos ($\eta_0 \approx 0,69$). La transmitancia del policarbonato $\sim 0,82$ y la elevada absorptancia del polipropileno $\sim 0,95$; durante la fase útil de operación a baja temperatura, se han observado rendimientos instantáneos en torno al 30% , coherentes con una solución económica sin cubierta selectiva. En cambio, el coeficiente global de pérdidas resultó elevado en las condiciones del ensayo (viento apreciable y una fuga puntual reparada), lo que se refleja en una temperatura de estancamiento baja ($\sim 36,8 \text{ }^\circ\text{C}$ con $T_{\text{amb}} = 32 \text{ }^\circ\text{C}$), limitando el salto térmico viable bajo insolación a pocos kelvin. En la última etapa del ensayo se registraron eficiencias negativas cuando se ensayó con el calentador del depósito encendido: el incremento de $T_{\text{entrada}} > T_{\text{salida}}$ durante esos intervalos invalida las

lecturas observadas. Conjunto de resultados y su interpretación se han incorporado a la memoria con las ecuaciones empleadas.

Se extraen conclusiones de uso para el colector: el prototipo no es apto hoy para ACS o calefacción (requerirían temperaturas significativamente mayores y menores pérdidas), pero sí es válido como precalentador de agua o climatización de piscinas, donde el salto térmico exigido es menor y el coste del dispositivo resulta atractivo para contextos con recursos limitados. Esta es una de las aportaciones principales del trabajo: una arquitectura replicable, documentada y de muy bajo coste que funciona, con datos experimentales trazables y una metodología compatible con norma para su mejora en futuros modelos.

El prototipo de laboratorio, incluyendo banco, instrumentación y materiales, ha supuesto 1666,58 €. Por otro lado, un modelo simplificado, orientado a uso práctico y comercial (sin instrumentación de ensayo ni bancada) puede reducirse a un CAPEX ≈ 210 €. Asumiendo $\eta \approx 0,25$ y $H_t \approx 1500$ kWh/año·m², la energía útil anual estimada es del orden de ~ 375 kWh/año, con OPEX bajo (bombeo y mantenimiento), lo que arroja hoy un beneficio neto de ~ 15 €/año, compatible con aplicaciones sociales donde prime la accesibilidad frente a la máxima eficiencia. Este balance confirma la viabilidad técnica y una base económica razonable para continuar la mejora del concepto.

En resumen, los objetivos planteados de diseño, construcción, banco de ensayo, modelización, caracterización térmica e hidráulica y evaluación técnica-económica han quedado cumplidos. Las aportaciones más relevantes son: un diseño de colector polimérico reproducible, la metodología de ensayo basada en norma, la caracterización hidráulica con pérdidas mínimas, la identificación y caracterización térmica, incluyendo pérdidas convectivas y radiantes, y una estimación económica para un modelo comercial en el futuro.

Pero, antes de analizar plenamente el modelo económico y comercializable, es necesario transformar este prototipo en un producto óptimo y técnicamente sólido. Las prioridades principales son reducir pérdidas y elevar la temperatura de estancamiento, actuando sobre la óptica, el aislamiento y la convección exterior, y por refinar la campaña de ensayos.

Para ello, se plantean varias actuaciones futuras:

- Una solución futura para minimizar pérdidas, y aumentar la temperatura de estancamiento, es incorporar una doble cubierta de policarbonato (cámara de aire) o lámina interior adicional para reforzar el efecto invernadero. También es necesario estudiar recubrimientos óptimos, revisar sellados y acabados para minimizar pérdidas de calor
- Por otro lado, añadir deflectores frontales que protejan frente al viento es una posible solución para minimizar las pérdidas por convección. Repetir ensayos en jornadas con viento bajo es necesario para estimar con mayor precisión los parámetros obtenidos.
- Planificar un es un paso crucial en el futuro. Separando los modos sin apoyo eléctrico y con apoyo, con incertidumbres y calibraciones documentadas. Al ampliar el número de ensayos, y mejorar y optimizar estos, los datos obtenidos son mas fiables y precisos. Esto permite analizar más profundamente los fallos en el diseño técnico del modelo actual.
- Someter el panel a ciclos térmicos, de llenado y vaciado, y a exposición UV prolongada para validar materiales y sellados en exteriores es crucial para asegurar que el colector puede aguantar el tiempo suficiente en condiciones de uso.
- Una vez aplicadas todas las mejoras anteriores, reestimar CAPEX/OPEX y preparar un diseño industrial simplificado (manuales, lista de materiales, calidad de uniones) para su comercialización.

Aplicando estas mejoras, el proyecto puede elevar considerablemente la temperatura de estancamiento y el rendimiento en servicio, permitiendo usos térmicos más exigentes y sentando las bases de un modelo comercial sencillo y replicable. En definitiva, aún hay margen para avanzar y mejorar el modelo antes de plantear su diseño como producto comercial.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

AENOR. (2022). *UNE-EN 12975:2022 - Captadores solares térmicos para calentamiento de fluidos. Requisitos generales.*

Agencia Internacional de Energía (IEA). (2024). *Solar Thermal Energy*. Obtenido de <https://www.iea.org/topics/renewables/solar-thermal>

Al-Ibrahim, A. S. (Junio 2023). The Impact of Dust and Shade on Solar Panel Efficiency and Solar Radiation Intensity. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Vol. 11* .

Amazon. (s.f.). Obtenido de Hoja De Plástico Acrílico Transparente Lámina For Techos De Policarbonato, FRP Placa De Iluminación Natural Resistente A Los Rayos Ultravioleta Alta Transmisión De Luz Panel De Fibra De Vidrio Resiste: https://www.amazon.es/Transparente-Policarbonato-Iluminaci%C3%B3n-Ultravioleta-Transmisi%C3%B3n/dp/B0BQ1T7384?asc_source=01H1P39M5ZSG9J6WR6B1HBK9M0&tag=snxes153-21

Apricus. (s.f.). *ETC_Collector_Overview_USA*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgclcfndmkaj/https://www.apricus.com/upload/userfiles/downloads/ETC_Collector_Overview_USA.pdf?utm_source

AutoDesk. (s.f.). *AutoCad*. Obtenido de https://www.autodesk.com/es/products/autocad/overview?mktvar002=afc_es_nmpi_ppc&AID=11043037&PID=8227014&gclsrc=aw.ds&&cjevent=CjwKCAjwtrXF BhBiEiwAEKen1z2Zltpvwk7RDjQkx-2ViTMl147f8cEkQPChALXNnF7ToEFY4rN8yRoCwEwQAvD_BwE&click_id=CjwKCAjwtrXFBhBiEiwAEKen1z2

Bechtel. (2024). *Ivanpah Solar Electric Generating System*.

canal Cecierj. (s.f.). *reflectancia transmitancia absorptancia*. Obtenido de <https://canal.cecierj.edu.br/recurso/17618>

Çengel, Y. A. (2015). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications (5th ed.)*. McGraw-Hill Education.

D. Darling. (s.f.). *Unglazed solar collector*. Obtenido de The Encyclopedia of Alternative Energy and Sustainable Living.: https://www.daviddarling.info/encyclopedia/U/AE_unglazed_solar_collector.html

European Commission. (2014). *Development of a modular, all-POLYmer SOLar thermal collector for domestic hot water preparation and space heating*. Luxemburgo.

Fernández-Solas, Á., Micheli, L., Almonacid, F., & Fernández, E. F. (2021). Optical degradation impact on the spectral performance of photovoltaic technology. *arXiv*.

HOGARSENSE. (s.f.). *Preguntas frecuentes sobre energía solar térmica*. Obtenido de <https://www.hogarsense.es/energia-solar/faq-energia-solar-termica-1>

Holman, J. P. (2010). *Heat Transfer (10th ed.)*. McGraw-Hill.

iAguá. (s.f.). *¿Que es y como funciona un caudalímetro de área variable?* Obtenido de <https://www.iagua.es/noticias/tecfluid/que-es-y-como-funciona-caudalimetro-area-variable>

Incropera, F. P. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer (7th ed.)*. Wiley.

J.A. Acosta, F. A. (s.f.). *Análisis comparativo de modelos de estimación de la radiación solar global en función de la nubosidad y la posición solar*. Obtenido de Scipedia, 2018.: https://www.scipedia.com/public/Acosta_et_al_2018a

- Kingspan. (s.f.). *Kingspan-DF100-data-sheet*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.powernaturally.co.uk/working/content/uploads/2015/07/Kingspan-DF100-data-sheet.pdf
- Leroy Merin. (s.f.). *polycarbonato celular incoloro*. Obtenido de https://www.leroymerlin.es/productos/polycarbonato-celular-incoloro-de-210cmx100cmx1cm-96457824.html
- MathWorks. (s.f.). *Matlab*. Obtenido de https://es.mathworks.com/products/matlab.html
- Mecalia energy systems. (s.f.). *INSTALACION DE TERMOS ELECTRICOS*. Obtenido de https://www.mecalia.com/instalacion-termos-electricos/
- N.Meegoda, J. (s.f.). *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Experimental-setup-The-figure-shows-the-ozone-nanobubble-generation-setup-To-generate_fig1_327913966
- NACIONES UNIDAS. (s.f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/
- Olczak, P., Matuszewska, D., & Zabagło, J. (2020). The Comparison of Solar Energy Gaining Effectiveness between Flat Plate Collectors and Evacuated Tube Collectors with Heat Pipe: Case Study. *Energies*.
- Otanicar, T. P. (2013). Performance evaluation of the Senergy polycarbonate and asphalt carbon nanotube solar water heating collectors for building integration. *Energy and Buildings*.
- outletPiscinas. (s.f.). Obtenido de http://outlet-piscinas.com/paneles-solares-heliocol?utm_source
- Salvador Escoda SA. (s.f.). *Salvador Escoda SA*. Obtenido de Salvador Escoda SA Catalogo Tecnico: https://www.acae.es/catalogos/salvador-escoda/fiebdc/04-vaso-expansion-recambio-AC04001-A-AC04048.pdf

Science Direct. (2017). *Performance evaluation of the synergy polycarbonate and asphalt carbon nanotube solar water heating collectors for building integration.*

ScienceDirect . (s.f.). *Unglazed Solar Collector.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/unglazed-solar-collector?utm_source

SFE SOLAR LOGISTIC S.L. es . (2025). Los modelos de placas solares de mayor eficiencia . *SunFields EUROPE.*

SolidWorks. (s.f.). *SolidWorks.* Obtenido de <https://www.solidworks.com/es>

SunPower Solar. (s.f.). *Colector solar de placa plana con vidrio templado.* Obtenido de <https://es.sunpower-solar.com/Colector-solar-de-placa-plana-con-vidrio-templado-pd986972.html>

Thermtest Research Ltd. (s.f.). *hermal Conductivity of Polycarbonate Materials.* Obtenido de <https://thermtest.com/application/thermal-conductivity-of-polycarbonate-materials>

Tu Calentador Economico. (s.f.). *Tu Calentador Economico.es.* Obtenido de <https://tucalentadoreconomico.es/113-placa-plana?srsId=AfmBOoqMCV-KeCTrV3sWuGDmxS9jHVzTrBy1M4AJlJ4tAKH3f4pz82i3&>

u-cursos. (s.f.). www.u-cursos.cl. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjcgclcfndmkaj/https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/1/ME43B/1/material_docente/bajar?id_material=169899

Universitat Oberta de Catalunya. (s.f.). *Análisis estadístico de Imágenes Hiperespectrales para la clasificación de Tumores Espectrales.* Obtenido de uoc.edu

White, F. (2000). *FLUID MECHANICS.* Mcgraw-hill.

Wikiwand. (2025). *Energía solar térmica*. Obtenido de
https://www.wikiwand.com/es/Energía_solar_térmica

ANEXO I: PROPIEDADES DEL AIRE

948
PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-9

Properties of air at 1 atm pressure

Temp. <i>T</i> , °C	Density ρ , kg/m ³	Specific Heat c_p , J/kg·K	Thermal Conductivity k , W/m·K	Thermal Diffusivity α , m ² /s	Dynamic Viscosity μ , kg/m·s	Kinematic Viscosity ν , m ² /s	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Note: For ideal gases, the properties c_p , k , μ , and Pr are independent of pressure. The properties ρ , ν , and α at a pressure P (in atm) other than 1 atm are determined by multiplying the values of ρ at the given temperature by P and by dividing ν and α by P .

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, and P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

ANEXO II: CÓDIGO DE MATLAB, CALOR POR CONDUCCIÓN

```
% Parámetros solares
Gt = 800;
tau_pc = 0.82;
alpha_pc = 0.07;
alpha_pp = 0.95;
f_pp = 0.95;

% Propiedades térmicas
k_pc = 0.20;      L_pc = 0.003;   A_pc = 1;
rho_pc = 1200;    cp_pc = 1200;

k_pp = 0.22;      L_pp = 0.0008;  A_pp = 0.95;
rho_pp = 900;     cp_pp = 1900;

% Agua
rho_agua = 1000;    % kg/m^3
cp_agua = 4186;     % J/kg·K
V_agua = 0.0015;    % m^3 (volumen en colector estimado)
m_agua = rho_agua * V_agua;

% Condiciones iniciales
T_amb = 25;
T_pc = T_amb;
T_pp = T_amb;
T_agua = T_amb;

% Simulación
dt = 1; t_total = 600;
tiempos = 0:dt:t_total;

% Inicializar vectores
q_pc = zeros(size(tiempos));
q_pp = zeros(size(tiempos));
q_total = zeros(size(tiempos));
T_pc_hist = zeros(size(tiempos));
T_pp_hist = zeros(size(tiempos));
T_agua_hist = zeros(size(tiempos));

for i = 1:length(tiempos)
    % Energía absorbida
    Q_pc_abs = alpha_pc * Gt * A_pc;
    G_trans = Gt * tau_pc;
    Q_pp_abs = G_trans * f_pp * alpha_pp * A_pp;
```

```
% Flujo de calor por conducción hacia el agua
q_pc(i) = (k_pc * A_pc / L_pc) * (T_pc - T_agua);
q_pp(i) = (k_pp * A_pp / L_pp) * (T_pp - T_agua);
q_total(i) = q_pc(i) + q_pp(i);

% Actualizar temperaturas (simplificado)
dT_pc = (Q_pc_abs - q_pc(i)) * dt / (A_pc * L_pc * rho_pc * cp_pc);
dT_pp = (Q_pp_abs - q_pp(i)) * dt / (A_pp * L_pp * rho_pp * cp_pp);
dT_agua = (q_total(i) * dt) / (m_agua * cp_agua);

T_pc = T_pc + dT_pc;
T_pp = T_pp + dT_pp;
T_agua = T_agua + dT_agua;

% Guardar resultados
T_pc_hist(i) = T_pc;
T_pp_hist(i) = T_pp;
T_agua_hist(i) = T_agua;
end

% --- GRAFICOS ---

% 1. Flujo de calor hacia el agua
figure;
plot(tiempos, q_pc, 'b-', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(tiempos, q_pp, 'r-', 'LineWidth', 2);
plot(tiempos, q_total, 'k--', 'LineWidth', 2);
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Flujo de calor (W)');
title('Flujo de calor hacia el agua');
legend('PC → Agua', 'PP → Agua', 'Total');
grid on;

% 2. Temperaturas de materiales y agua
figure;
plot(tiempos, T_pc_hist, 'b--', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(tiempos, T_pp_hist, 'r-', 'LineWidth', 2);
plot(tiempos, T_agua_hist, 'g-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Temperatura (°C)');
title('Evolución de temperatura');
legend('Policarbonato', 'Polipropileno', 'Agua');
grid on;
```

ANEXO II: CÓDIGO DE MATLAB, PÉRDIDAS POR RADIACIÓN.

```
% Ejemplo de uso
T_pc = 333.15; % 60 °C en Kelvin
T_amb = 301.15; % 25 °C en Kelvin

Q = pérdida_radiacion_policarbonato_func(T_pc, T_amb);

fprintf('Pérdida neta por radiación: %.2f W/m^2\n', Q);

graficar_pérdida_radiacion_varias_Tamb()

function Qrad = pérdida_radiacion_policarbonato_func(T_pc, T_amb)
    % Calcula la pérdida neta de calor por radiación desde policarbonato
    % T_pc: temperatura del policarbonato [K]
    % T_amb: temperatura ambiente [K]
    % Qrad: pérdida neta por radiación [W/m^2]

    % Constantes físicas
    h = 6.62607015e-34; % Constante de Planck (J·s)
    c = 2.99792458e8; % Velocidad de la luz (m/s)
    k = 1.380649e-23; % Constante de Boltzmann (J/K)

    % Función ley de Planck (W/m^2/μm)
    Eb = @(lambda_um, T) (2 * pi * h * c^2) ./ ((lambda_um * 1e-6).^5) .* ...
        1 ./ (exp((h * c) ./ ((lambda_um * 1e-6) * k * T)) - 1) * 1e-6;

    % Emisividad espectral del policarbonato (aproximación por tramos)
    emisividad = @(lambda) ...
        (lambda < 0.7) .* (0.05 + (0.10 - 0.05)/(0.7 - 0.4) * (lambda - 0.4)) +
        ...
        (lambda >= 0.7 & lambda < 2) .* (0.10 + (0.32 - 0.10)/(2 - 0.7) * (lambda -
        - 0.7)) + ...
        (lambda >= 2 & lambda < 3) .* (0.32 + (0.50 - 0.32)/(3 - 2) * (lambda -
        2)) + ...
        (lambda >= 3 & lambda < 5) .* (0.50 + (0.70 - 0.50)/(5 - 3) * (lambda -
        3)) + ...
        (lambda >= 5 & lambda < 6) .* (0.70 + (0.85 - 0.70)/(6 - 5) * (lambda -
        5)) + ...
        (lambda >= 6 & lambda < 15.0) .* (0.85 + (0.95 - 0.85)/(15.0 - 6) *
        (lambda - 6)) + ...
        (lambda >= 15.0 & lambda <= 16.0) .* (0.95 + (0.98 - 0.95)/(16.0 - 15.0)
        * (lambda - 15.0)) + ...
        (lambda > 16.0) * 0.98;
```

```
% Función integrando: emisividad * (Eb_pc - Eb_amb)
integrando = @(lambda) emisividad(lambda) .* ...
    (Eb(lambda, T_pc) - Eb(lambda, T_amb));

% Integración numérica entre 0.4 y 16 µm
Qrad = integral(integrando, 0.4, 16); % Resultado en W/m^2
end
function graficar_pérdida_radiacion_varias_Tamb()
% Temperaturas ambiente (°C)
Tamb_C = [20, 22, 25, 28, 30];
Tamb_K = Tamb_C + 273.15;

% Temperaturas del policarbonato (°C)
Tpc_C = 30:1:90;
Tpc_K = Tpc_C + 273.15;

% Preparar gráfico
figure;
hold on;

% Colores para las curvas
colores = lines(length(Tamb_K));

% Calcular y graficar cada curva
for j = 1:length(Tamb_K)
    Qrad_vals = zeros(size(Tpc_K));
    for i = 1:length(Tpc_K)
        Qrad_vals(i) = pérdida_radiacion_policarbonato_funct(Tpc_K(i),
Tamb_K(j));
    end

    plot(Tpc_C, Qrad_vals, 'LineWidth', 2, 'Color', colores(j,:));
end

% Personalizar gráfico
xlabel('Temperatura del policarbonato (°C)');
ylabel('Pérdida neta por radiación (W/m²)');
title('Pérdida por radiación vs. T_{pc} para distintas T_{amb}');
legendStrings = arrayfun(@(T) sprintf('T_{amb} = %d°C', T), Tamb_C,
'UniformOutput', false);
legend(legendStrings, 'Location', 'northwest');
grid on;
hold off;
end
```

ANEXO III: CÓDIGO DE MATLAB, PÉRDIDAS POR CONVECCIÓN.

```
clc; clear;

% Parámetros fijos
g = 9.81; % gravedad [m/s^2]
L = 1; % longitud característica [m]
theta = 45; % inclinación en grados
theta_rad = deg2rad(theta);
k_air = 0.026; % conductividad térmica aire [W/m·K]
nu = 15.89e-6; % viscosidad cinemática [m^2/s]
alpha = 22.6e-6; % difusividad térmica [m^2/s]

% Temperaturas de colector [°C]
T_col_C = 40:1:100; % vector de temperaturas del colector [°C]
T_col_K = T_col_C + 273.15;

% Temperaturas ambiente a estudiar [°C]
T_amb_C_cases = [15, 18, 20, 25, 30];
colors = lines(length(T_amb_C_cases)); % para graficar con colores distintos

% Inicialización
figure; hold on;

for i = 1:length(T_amb_C_cases)
    T_amb_K = T_amb_C_cases(i) + 273.15;

    q_conv = zeros(size(T_col_K));

    for j = 1:length(T_col_K)
        T_s = T_col_K(j);
        T_inf = T_amb_K;

        T_film = (T_s + T_inf) / 2;
        beta = 1 / T_film; % expansión térmica

        deltaT = T_s - T_inf;
        Ra_L = (g * beta * deltaT * L^3) / (nu * alpha);
        Ra_L_star = Ra_L * cos(theta_rad);

        % Selección de correlación
        if Ra_L_star < 1e9
            C = 0.59; n = 1/4;
        else
            C = 0.10; n = 1/3;
```

```
end

Nu_L = C * (Ra_L_star)^n;
h_nat = Nu_L * k_air / L;

q_conv(j) = h_nat * deltaT; % pérdidas por convección en W/m^2
end

% Graficar cada caso
plot(T_col_C, q_conv, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', sprintf('T_{amb} = %d°C', T_amb_C_cases(i)), ...
     'Color', colors(i,:));
end

% Gráfica
xlabel('Temperatura del colector (°C)');
ylabel('Pérdidas por convección (W/m²)');
title('Pérdidas por convección natural desde colector solar inclinado');
legend('Location','northwest');
grid on;
```

ANEXO IV: CÓDIGO DE MATLAB, RADIACIÓN INCIDENTE SOBRE COLECTOR INCLINADO.

```
% Parámetros de entrada
phi = 40.4;           % latitud (Madrid)
day = 172;            % día del año (21 junio)
hour = 13.5;          % hora solar decimal
beta = 30;            % inclinación del colector
gamma = 0;            % orientación sur
rho_ground = 0.2;     % albedo suelo
nubosidad = 0;        % % de cielo cubierto

[Gb, Gd, Gr, GT] = radiacion_plano_inclinado(phi, day, hour, beta, gamma,
rho_ground, nubosidad);

fprintf(' Gb = %.1f W/m²,\n Gd = %.1fW/m²,\n Gr = %.1fW/m²,\n G_total =
%.1fW/m²\n', Gb, Gd, Gr, GT);

function [Gb, Gd, Gr, GT] = radiacion_plano_inclinado(phi, day, hour, beta,
gamma, rho_ground, nubosidad)
% Calcula la radiación solar total sobre un plano inclinado.
%
% Entradas:
% - phi: latitud en grados (positiva norte)
% - day: día del año (1 a 365)
% - hour: hora solar decimal (0-24)
% - beta: inclinación del plano (grados desde la horizontal)
% - gamma: azimut del plano (grados desde el sur; este = -90, oeste = +90)
% - rho_ground: albedo del suelo (por ejemplo, 0.2)
% - nubosidad: fracción del cielo cubierto (0 = despejado, 1 = totalmente
nublado)
%
% Salidas:
% - Gb: componente directa sobre el plano inclinado
% - Gd: componente difusa
% - Gr: componente reflejada
% - GT: radiación total sobre el plano inclinado

% 1. Constantes
G_sc = 1367; % [W/m^2] constante solar

% 2. Declinación solar δ
delta = 23.45 * sind(360*(284 + day)/365);

% 3. Ángulo horario ω
```

```

omega = (hour - 12) * 15; % en grados

% 4. Coseno del ángulo cenital  $\theta_z$ 
cos_z = sind(phi)*sind(delta) + cosd(phi)*cosd(delta)*cosd(omega);
cos_z = max(min(cos_z, 1), 0); % limitar a rango físico

% 5. Corrección de distancia Tierra-Sol
dr = 1 + 0.033 * cosd(360*day/365);

% 6. Radiación extraterrestre horizontal (sin atmósfera)
Ho = G_sc * dr * cos_z;

% 7. Corrección por nubosidad (factor atmosférico simplificado)
C_atm = 1 - 0.75 * nubosidad;
Ho = Ho * C_atm;

% 8. Índice de claridad simplificado (basado en cos_z)
kt = cos_z;

% 9. Estimación fracción difusa F
if kt < 0.35
    F = 1.02 - 0.254 * kt + 0.0123 * sind(360*day/365);
elseif kt < 0.75
    F = 1.45 - 1.67 * kt + 0.054 * sind(360*day/365);
else
    F = 0.18;
end

% 10. Separar en componentes horizontal directa y difusa
Gd0 = F * Ho;
Gb0 = Ho - Gd0;

% 11. Convertir ángulos a radianes
beta = deg2rad(beta);
gamma = deg2rad(gamma);
phi = deg2rad(phi);
delta = deg2rad(delta);
omega = deg2rad(omega);

% 12. Coseno del ángulo de incidencia  $\theta_i$  sobre el plano inclinado
cos_theta_i = sind(delta)*sind(phi)*cos(beta) ...
    - sind(delta)*cos(phi)*sin(beta)*cos(gamma) ...
    + cos(delta)*cos(phi)*cos(omega)*cos(beta) ...
    + cos(delta)*sind(phi)*cos(omega)*sin(beta)*cos(gamma) ...
    + cos(delta)*sin(omega)*sin(beta)*sin(gamma);

cos_theta_i = max(cos_theta_i, 0);
cos_theta_z = max(cos_z, 1e-6); % evitar división por 0

% 13. Factores de corrección
Rb = cos_theta_i / cos_theta_z;
Rd = (1 + cos(beta)) / 2;
Rr = rho_ground * (1 - cos(beta)) / 2;

```

```
% 14. Componentes sobre el plano inclinado
Gb = Gb0 * Rb;
Gd = Gd0 * Rd;
Gr = (Gb0 + Gd0) * Rr;

% 15. Radiación total
GT = Gb + Gd + Gr;
end
```

ANEXO V: TABLA DE MEDICIONES.

Time	T_{fe} [°C]	T_{fs} [°C]	T_{amb} [°C]	G [W/m ²]	T_r [°C]	$(T_f - T_{amb})/G$	η [-]	q_u	q_p
7/15/2025									
14:33:01:578	43,37	36,664	32	919,00	40,02	0,00872	-0,61	-556,06	1475,06
7/15/2025									
14:33:11:562	45,211	36,645	32	918,91	40,93	0,00972	-0,77	-710,29	1629,20
7/15/2025									
14:33:21:562	44,905	36,605	32	918,81	40,76	0,00953	-0,75	-688,23	1607,05
7/15/2025									
14:33:31:562	44,750	36,536	32	918,72	40,64	0,00941	-0,74	-681,10	1599,82
7/15/2025									
14:33:41:562	43,658	36,469	32	918,63	40,06	0,00878	-0,65	-596,11	1514,74
7/15/2025									
14:33:51:562	43,021	36,419	32	918,54	39,72	0,00840	-0,60	-547,44	1465,97
7/15/2025									
14:34:01:562	40,865	36,373	32	918,44	38,62	0,00721	-0,41	-372,48	1290,92
7/15/2025									
14:34:11:562	41,316	36,326	32	918,35	38,82	0,00743	-0,45	-413,77	1332,12
7/15/2025									
14:34:21:562	36,952	36,280	32	918,26	36,62	0,00503	-0,06	-55,72	973,98
7/15/2025									
14:34:31:562	37,097	36,234	32	918,16	36,67	0,00508	-0,08	-71,56	989,72
7/15/2025									
14:34:41:562	36,789	36,166	32	918,07	36,48	0,00488	-0,06	-51,66	969,73
7/15/2025									
14:34:51:562	35,006	36,154	32	917,98	35,58	0,00390	0,10	95,19	822,79
7/15/2025									
14:35:01:562	34,761	36,151	32	917,89	35,46	0,00377	0,13	115,26	802,63
7/15/2025									
14:35:11:562	34,590	36,105	32	917,79	35,35	0,00365	0,14	125,62	792,17
7/15/2025									
14:35:21:562	34,422	36,056	32	917,70	35,24	0,00353	0,15	135,49	782,21
7/15/2025									
14:35:31:562	33,535	36,016	32	917,61	34,78	0,00302	0,22	205,72	711,88
7/15/2025									
14:35:41:562	33,337	35,943	32	917,51	34,64	0,00288	0,24	216,09	701,43
7/15/2025									
14:35:51:562	34,159	35,986	32	917,42	35,07	0,00335	0,17	151,49	765,93
7/15/2025									
14:36:01:562	34,512	35,952	32	917,33	35,23	0,00352	0,13	119,40	797,92
7/15/2025									
14:36:11:562	34,630	35,934	32	917,24	35,28	0,00358	0,12	108,13	809,11
7/15/2025									
14:36:21:562	34,437	35,924	32	917,14	35,18	0,00347	0,13	123,30	793,84
7/15/2025									
14:36:31:562	34,451	35,822	32	917,05	35,14	0,00342	0,12	113,68	803,37
7/15/2025									
14:36:41:562	34,433	35,785	32	916,96	35,11	0,00339	0,12	112,11	804,85
7/15/2025									
14:36:51:562	34,181	35,804	32	916,86	34,99	0,00326	0,15	134,58	782,29

7/15/2025									
14:37:01:562	34,151	35,824	32	916,77	34,99	0,00326	0,15	138,72	778,05
7/15/2025									
14:37:11:562	34,456	35,880	32	916,68	35,17	0,00346	0,13	118,08	798,60
7/15/2025									
14:37:21:562	35,216	35,911	32	916,59	35,56	0,00389	0,06	57,63	858,96
7/15/2025									
14:37:31:562	36,271	35,940	32	916,49	36,11	0,00448	-0,03	-27,45	943,94
7/15/2025									
14:37:41:562	35,384	35,973	32	916,40	35,68	0,00401	0,05	48,84	867,56
7/15/2025									
14:37:51:562	33,000	35,992	32	916,31	34,50	0,00272	0,27	248,10	668,21
7/15/2025									
14:38:01:562								0,00	0,00
7/15/2025									
14:38:11:562	33,477	36,013	32	916,12	34,75	0,00300	0,23	210,28	705,84
7/15/2025									
14:38:21:562	33,511	36,028	32	916,03	34,77	0,00302	0,23	208,71	707,32
7/15/2025									
14:38:31:562	34,782	36,053	32	915,94	35,42	0,00373	0,12	105,39	810,54
7/15/2025									
14:38:41:562	34,854	36,069	32	915,84	35,46	0,00378	0,11	100,75	815,10
7/15/2025									
14:38:51:562	34,885	36,016	32	915,75	35,45	0,00377	0,10	93,78	821,97
7/15/2025									
14:39:01:562	34,424	36,010	32	915,66	35,22	0,00351	0,14	131,51	784,15
7/15/2025									
14:39:11:562	34,070	36,036	32	915,56	35,05	0,00333	0,18	163,02	752,54
7/15/2025									
14:39:21:562	33,846	36,093	32	915,47	34,97	0,00324	0,20	186,32	729,15
7/15/2025									
14:39:31:562	33,712	36,114	32	915,38	34,91	0,00318	0,22	199,17	716,21
7/15/2025									
14:39:41:562	33,617	36,110	32	915,29	34,86	0,00313	0,23	206,72	708,57
7/15/2025									
14:39:51:562	33,537	36,129	32	915,19	34,83	0,00310	0,23	214,93	700,26
7/15/2025									
14:40:01:562	33,469	36,181	32	915,10	34,83	0,00309	0,25	224,88	690,22
7/15/2025									
14:40:11:562	33,402	36,189	32	915,01	34,80	0,00306	0,25	231,10	683,91
7/15/2025									
14:40:21:562	33,335	36,225	32	914,91	34,78	0,00304	0,26	239,64	675,28
7/15/2025									
14:40:31:562	33,273	36,244	32	914,82	34,76	0,00302	0,27	246,35	668,47
7/15/2025									
14:40:41:562	33,204	36,133	32	914,73	34,67	0,00292	0,27	242,87	671,86
7/15/2025									
14:40:51:562	33,139	36,010	32	914,64	34,57	0,00281	0,26	238,06	676,57
7/15/2025									
14:41:01:562	33,079	35,897	32	914,54	34,49	0,00272	0,26	233,67	680,87
7/15/2025									
14:41:11:562	33,036	35,929	32	914,45	34,48	0,00271	0,26	239,89	674,56
7/15/2025									
14:41:21:562	33,006	35,898	32	914,36	34,45	0,00268	0,26	239,80	674,55
7/15/2025									
14:41:31:562	32,980	35,813	32	914,26	34,40	0,00262	0,26	234,91	679,35

7/15/2025									
14:41:41:562	32,958	35,716	32	914,17	34,34	0,00256	0,25	228,69	685,48
7/15/2025									
14:41:51:562	32,944	35,697	32	914,08	34,32	0,00254	0,25	228,28	685,80
7/15/2025									
14:42:01:562	32,937	35,755	32	913,99	34,35	0,00257	0,26	233,67	680,32
7/15/2025									
14:42:11:562	32,930	35,808	32	913,89	34,37	0,00259	0,26	238,64	675,25
7/15/2025									
14:42:21:562	32,926	35,871	32	913,80	34,40	0,00262	0,27	244,20	669,60
7/15/2025									
14:42:31:562	32,923	35,898	32	913,71	34,41	0,00264	0,27	246,69	667,02
7/15/2025									
14:42:41:562	32,928	35,957	32	913,61	34,44	0,00267	0,27	251,16	662,45
7/15/2025									
14:42:51:562	32,937	36,014	32	913,52	34,48	0,00271	0,28	255,14	658,38
7/15/2025									
14:43:01:562	32,940	36,062	32	913,43	34,50	0,00274	0,28	258,88	654,55
7/15/2025									
14:43:11:562	32,939	36,109	32	913,34	34,52	0,00276	0,29	262,86	650,48
7/15/2025									
14:43:21:562	32,943	36,175	32	913,24	34,56	0,00280	0,29	268,00	645,25
7/15/2025									
14:43:31:562	32,952	36,168	32	913,15	34,56	0,00280	0,29	266,67	646,48
7/15/2025									
14:43:41:562	32,960	36,189	32	913,06	34,57	0,00282	0,29	267,75	645,31
7/15/2025									
14:43:51:562	32,968	36,173	32	912,96	34,57	0,00282	0,29	265,76	647,21
7/15/2025									
14:44:01:562	32,974	36,150	32	912,87	34,56	0,00281	0,29	263,35	649,52
7/15/2025									
14:44:11:562	32,985	36,132	32	912,78	34,56	0,00280	0,29	260,95	651,83
7/15/2025									
14:44:21:562	32,994	36,092	32	912,69	34,54	0,00279	0,28	256,89	655,80
7/15/2025									
14:44:31:562	32,994	36,130	32	912,59	34,56	0,00281	0,28	260,04	652,56
7/15/2025									
14:44:41:562	32,998	36,163	32	912,50	34,58	0,00283	0,29	262,44	650,06
7/15/2025									
14:44:51:562	33,007	36,171	32	912,41	34,59	0,00284	0,29	262,36	650,05
7/15/2025									
14:45:01:562	33,014	36,192	32	912,31	34,60	0,00285	0,29	263,52	648,79
7/15/2025									
14:45:11:562	33,023	36,231	32	912,22	34,63	0,00288	0,29	266,01	646,21
7/15/2025									
14:45:21:562	33,038	36,290	32	912,13	34,66	0,00292	0,30	269,65	642,47
7/15/2025									
14:45:31:562	33,056	36,332	32	912,03	34,69	0,00295	0,30	271,64	640,39
7/15/2025									
14:45:41:562	33,073	36,339	32	911,94	34,71	0,00297	0,30	270,82	641,13
7/15/2025									
14:45:51:562	33,088	36,373	32	911,85	34,73	0,00299	0,30	272,39	639,46
7/15/2025									
14:46:01:562	33,100	36,371	32	911,76	34,74	0,00300	0,30	271,23	640,53
7/15/2025									
14:46:11:562	33,101	36,394	32	911,66	34,75	0,00301	0,30	273,05	638,61

7/15/2025									
14:46:21:562	33,108	36,419	32	911,57	34,76	0,00303	0,30	274,55	637,02
7/15/2025									
14:46:31:562	33,116	36,351	32	911,48	34,73	0,00300	0,29	268,25	643,23
7/15/2025									
14:46:41:562	33,130	36,315	32	911,38	34,72	0,00299	0,29	264,10	647,29
7/15/2025									
14:46:51:562	33,149	36,332	32	911,29	34,74	0,00301	0,29	263,93	647,36
7/15/2025									
14:47:01:562	33,165	36,340	32	911,20	34,75	0,00302	0,29	263,27	647,93
7/15/2025									
14:47:11:562	33,172	36,342	32	911,11	34,76	0,00303	0,29	262,86	648,25
7/15/2025									
14:47:21:562	33,189	36,340	32	911,01	34,76	0,00303	0,29	261,28	649,73
7/15/2025									
14:47:31:562	33,199	36,277	32	910,92	34,74	0,00301	0,28	255,23	655,69
7/15/2025									
14:47:41:562	33,209	36,297	32	910,83	34,75	0,00302	0,28	256,06	654,77
7/15/2025									
14:47:51:562	33,223	36,222	32	910,73	34,72	0,00299	0,27	248,68	662,06
7/15/2025									
14:48:01:562	33,234	36,182	32	910,64	34,71	0,00297	0,27	244,45	666,19
7/15/2025									
14:48:11:562	33,255	36,211	32	910,55	34,73	0,00300	0,27	245,11	665,44
7/15/2025									
14:48:21:562	33,281	36,222	32	910,46	34,75	0,00302	0,27	243,87	666,59
7/15/2025									
14:48:31:562	33,303	36,185	32	910,36	34,74	0,00301	0,26	238,97	671,39
7/15/2025									
14:48:41:562	33,323	36,194	32	910,27	34,76	0,00303	0,26	238,06	672,21
7/15/2025									
14:48:51:562	33,346	36,167	32	910,18	34,76	0,00303	0,26	233,92	676,26
7/15/2025									
14:49:01:562	33,369	36,113	32	910,08	34,74	0,00301	0,25	227,53	682,55
7/15/2025									
14:49:11:562	33,383	36,113	32	909,99	34,75	0,00302	0,25	226,37	683,62
7/15/2025									
14:49:21:562	33,398	36,131	32	909,90	34,76	0,00304	0,25	226,62	683,28
7/15/2025									
14:49:31:562	33,412	36,169	32	909,81	34,79	0,00307	0,25	228,61	681,20
7/15/2025									
14:49:41:562	33,429	36,205	32	909,71	34,82	0,00310	0,25	230,19	679,53
7/15/2025									
14:49:51:562	33,448	36,206	32	909,62	34,83	0,00311	0,25	228,69	680,93
7/15/2025									
14:50:01:562	33,457	36,176	32	909,53	34,82	0,00310	0,25	225,46	684,07
7/15/2025									
14:50:11:562	33,464	36,170	32	909,43	34,82	0,00310	0,25	224,38	685,05
7/15/2025									
14:50:21:562	33,470	36,191	32	909,34	34,83	0,00311	0,25	225,62	683,72
7/15/2025									
14:50:31:562	33,479	36,160	32	909,25	34,82	0,00310	0,24	222,31	686,94
7/15/2025									
14:50:41:562	33,494	36,112	32	909,16	34,80	0,00308	0,24	217,08	692,07
7/15/2025									
14:50:51:562	33,499	36,072	32	909,06	34,79	0,00306	0,23	213,35	695,71

7/15/2025									
14:51:01:562	33,501	36,032	32	908,97	34,77	0,00304	0,23	209,87	699,10
7/15/2025									
14:51:11:562	33,506	36,021	32	908,88	34,76	0,00304	0,23	208,54	700,33
7/15/2025									
14:51:21:562	33,512	36,069	32	908,78	34,79	0,00307	0,23	212,03	696,76
7/15/2025									
14:51:31:562	33,523	36,075	32	908,69	34,80	0,00308	0,23	211,61	697,08
7/15/2025									
14:51:41:562	33,535	36,104	32	908,60	34,82	0,00310	0,23	213,02	695,58
7/15/2025									
14:51:51:562	33,555	36,107	32	908,51	34,83	0,00312	0,23	211,61	696,89
7/15/2025									
14:52:01:562	33,568	36,116	32	908,41	34,84	0,00313	0,23	211,28	697,13
7/15/2025									
14:52:11:562	33,586	36,041	32	908,32	34,81	0,00310	0,22	203,57	704,75
7/15/2025									
14:52:21:562	33,603	35,976	32	908,23	34,79	0,00307	0,22	196,77	711,46
7/15/2025									
14:52:31:562	33,618	35,931	32	908,13	34,77	0,00306	0,21	191,79	716,34
7/15/2025									
14:52:41:562	33,633	35,935	32	908,04	34,78	0,00307	0,21	190,88	717,16
7/15/2025									
14:52:51:562	33,647	35,981	32	907,95	34,81	0,00310	0,21	193,53	714,41
7/15/2025									
14:53:01:562	33,661	36,022	32	907,86	34,84	0,00313	0,22	195,77	712,08
7/15/2025									
14:53:11:562	33,677	36,068	32	907,76	34,87	0,00316	0,22	198,26	709,50
7/15/2025									
14:53:21:562	33,698	36,092	32	907,67	34,90	0,00319	0,22	198,51	709,16
7/15/2025									
14:53:31:562	33,705	36,104	32	907,58	34,90	0,00320	0,22	198,92	708,65
7/15/2025									
14:53:41:562	33,725	36,151	32	907,48	34,94	0,00324	0,22	201,16	706,32
7/15/2025									
14:53:51:562	33,745	36,174	32	907,39	34,96	0,00326	0,22	201,41	705,98
7/15/2025									
14:54:01:562	33,761	36,149	32	907,30	34,96	0,00326	0,22	198,01	709,29
7/15/2025									
14:54:11:562	33,772	36,162	32	907,21	34,97	0,00327	0,22	198,18	709,03
7/15/2025									
14:54:21:562	33,779	36,193	32	907,11	34,99	0,00329	0,22	200,17	706,94
7/15/2025									
14:54:31:562	33,786	36,225	32	907,02	35,01	0,00331	0,22	202,24	704,78
7/15/2025									
14:54:41:562	33,796	36,258	32	906,93	35,03	0,00334	0,23	204,15	702,78
7/15/2025									
14:54:51:562	33,812	36,288	32	906,83	35,05	0,00336	0,23	205,31	701,53
7/15/2025									
14:55:01:562	33,832	36,228	32	906,74	35,03	0,00334	0,22	198,68	708,07
7/15/2025									
14:55:11:562	33,852	36,198	32	906,65	35,03	0,00334	0,21	194,53	712,12
7/15/2025									
14:55:21:562	33,861	36,213	32	906,56	35,04	0,00335	0,22	195,03	711,53
7/15/2025									
14:55:31:562	33,868	36,224	32	906,46	35,05	0,00336	0,22	195,36	711,10

7/15/2025									
14:55:41:562	33,875	36,200	32	906,37	35,04	0,00335	0,21	192,79	713,58
7/15/2025									
14:55:51:562	33,882	36,144	32	906,28	35,01	0,00332	0,21	187,56	718,71
7/15/2025									
14:56:01:562	33,899	36,105	32	906,18	35,00	0,00331	0,20	182,92	723,26
7/15/2025									
14:56:11:562	33,922	36,093	32	906,09	35,01	0,00332	0,20	180,02	726,07
7/15/2025									
14:56:21:562	33,943	36,085	32	906,00	35,01	0,00333	0,20	177,61	728,38
7/15/2025									
14:56:31:562	33,962	36,115	32	905,91	35,04	0,00335	0,20	178,53	727,38
7/15/2025									
14:56:41:562	33,982	36,115	32	905,81	35,05	0,00337	0,20	176,87	728,95
7/15/2025									
14:56:51:562	34,002	36,083	32	905,72	35,04	0,00336	0,19	172,56	733,16
7/15/2025									
14:57:01:562	34,023	36,070	32	905,63	35,05	0,00336	0,19	169,74	735,89
7/15/2025									
14:57:11:562	34,047	36,110	32	905,53	35,08	0,00340	0,19	171,06	734,47
7/15/2025									
14:57:21:562	34,076	36,140	32	905,44	35,11	0,00343	0,19	171,15	734,30
7/15/2025									
14:57:31:562	34,117	36,146	32	905,35	35,13	0,00346	0,19	168,24	737,10
7/15/2025									
14:57:41:562	34,157	36,183	32	905,26	35,17	0,00350	0,19	168,00	737,26
7/15/2025									
14:57:51:562	34,207	36,185	32	905,16	35,20	0,00353	0,18	164,02	741,15
7/15/2025									
14:58:01:562	34,260	36,211	32	905,07	35,24	0,00357	0,18	161,78	743,29
7/15/2025									
14:58:11:562	34,304	36,245	32	904,98	35,27	0,00362	0,18	160,95	744,03
7/15/2025									
14:58:21:562	34,353	36,284	32	904,88	35,32	0,00367	0,18	160,12	744,77
7/15/2025									
14:58:31:562	34,409	36,323	32	904,79	35,37	0,00372	0,18	158,71	746,08
7/15/2025									
14:58:41:562	34,479	36,361	32	904,70	35,42	0,00378	0,17	156,05	748,64
7/15/2025									
14:58:51:562	34,550	36,392	32	904,61	35,47	0,00384	0,17	152,74	751,87
7/15/2025									
14:59:01:562	34,609	36,421	32	904,51	35,52	0,00389	0,17	150,25	754,26
7/15/2025									
14:59:11:562	34,674	36,412	32	904,42	35,54	0,00392	0,16	144,11	760,31
7/15/2025									
14:59:21:562	34,743	36,371	32	904,33	35,56	0,00393	0,15	134,99	769,33
7/15/2025									
14:59:31:562	34,811	36,366	32	904,23	35,59	0,00397	0,14	128,94	775,29
7/15/2025									
14:59:41:562	34,863	36,259	32	904,14	35,56	0,00394	0,13	115,76	788,39
7/15/2025									
14:59:51:562	34,911	36,240	32	904,05	35,58	0,00395	0,12	110,20	793,85
7/15/2025									
15:00:01:562	34,979	36,199	32	903,96	35,59	0,00397	0,11	101,16	802,79
7/15/2025									
15:00:11:562	35,046	36,164	32	903,86	35,61	0,00399	0,10	92,70	811,16

7/15/2025									
15:00:21:562	35,118	36,181	32	903,77	35,65	0,00404	0,10	88,14	815,63
7/15/2025									
15:00:31:562	35,191	36,212	32	903,68	35,70	0,00410	0,09	84,66	819,02
7/15/2025									
15:00:41:562	35,263	36,266	32	903,58	35,76	0,00417	0,09	83,17	820,42
7/15/2025									
15:00:51:562	35,334	36,319	32	903,49	35,83	0,00424	0,09	81,68	821,82
7/15/2025									
15:01:01:562	35,407	36,358	32	903,40	35,88	0,00430	0,09	78,86	824,54
7/15/2025									
15:01:11:562	35,488	36,353	32	903,31	35,92	0,00434	0,08	71,73	831,58
7/15/2025									
15:01:21:562	35,571	36,383	32	903,21	35,98	0,00440	0,07	67,33	835,88
7/15/2025									
15:01:31:562	35,657	36,423	32	903,12	36,04	0,00447	0,07	63,52	839,60
7/15/2025									
15:01:41:562	35,746	36,432	32	903,03	36,09	0,00453	0,06	56,88	846,14
7/15/2025									
15:01:51:562	35,821	36,288	32	902,93	36,05	0,00449	0,04	38,72	864,21
7/15/2025									
15:02:01:562	35,884	36,247	32	902,84	36,07	0,00450	0,03	30,10	872,74
7/15/2025									
15:02:11:562	35,958	36,205	32	902,75	36,08	0,00452	0,02	20,48	882,27
7/15/2025									
15:02:21:562	36,033	36,177	32	902,66	36,11	0,00455	0,01	11,94	890,72
7/15/2025									
15:02:31:562	36,107	36,214	32	902,56	36,16	0,00461	0,01	8,87	893,69
7/15/2025									
15:02:41:562	36,188	36,221	32	902,47	36,20	0,00466	0,00	2,74	899,73
7/15/2025									
15:02:51:562	36,268	36,264	32	902,38	36,27	0,00473	0,00	-0,33	902,71
7/15/2025									
15:03:01:562	36,344	36,243	32	902,28	36,29	0,00476	-0,01	-8,37	910,66
7/15/2025									
15:03:11:562	36,399	36,165	32	902,19	36,28	0,00475	-0,02	-19,40	921,59
7/15/2025									
15:03:21:562	36,466	36,224	32	902,10	36,35	0,00482	-0,02	-20,07	922,16
7/15/2025									
15:03:31:562	36,541	36,288	32	902,01	36,41	0,00489	-0,02	-20,98	922,98
7/15/2025									
15:03:41:562	36,625	36,311	32	901,91	36,47	0,00495	-0,03	-26,04	927,95
7/15/2025									
15:03:51:562	36,707	36,298	32	901,82	36,50	0,00499	-0,04	-33,91	935,73
7/15/2025									
15:04:01:562	36,779	36,237	32	901,73	36,51	0,00500	-0,05	-44,94	946,67
7/15/2025									
15:04:11:562	36,843	36,275	32	901,63	36,56	0,00506	-0,05	-47,10	948,73
7/15/2025									
15:04:21:562	36,909	36,293	32	901,54	36,60	0,00510	-0,06	-51,08	952,62
7/15/2025									
15:04:31:562	36,964	36,361	32	901,45	36,66	0,00517	-0,06	-50,00	951,45
7/15/2025									
15:04:41:562	37,023	36,431	32	901,36	36,73	0,00524	-0,05	-49,09	950,44
7/15/2025									
15:04:51:562	37,077	36,517	32	901,26	36,80	0,00532	-0,05	-46,44	947,70

7/15/2025									
15:05:01:562	37,133	36,571	32	901,17	36,85	0,00538	-0,05	-46,60	947,77
7/15/2025									
15:05:11:562	37,192	36,615	32	901,08	36,90	0,00544	-0,05	-47,84	948,92
7/15/2025									
15:05:21:562	37,246	36,652	32	900,98	36,95	0,00549	-0,05	-49,25	950,24
7/15/2025									
15:05:31:562	37,298	36,685	32	900,89	36,99	0,00554	-0,06	-50,83	951,72
7/15/2025									
15:05:41:562	37,350	36,696	32	900,80	37,02	0,00558	-0,06	-54,23	955,03
7/15/2025									
15:05:51:562	37,403	36,732	32	900,71	37,07	0,00563	-0,06	-55,64	956,34
7/15/2025									
15:06:01:562	37,457	36,776	32	900,61	37,12	0,00568	-0,06	-56,47	957,08
7/15/2025									
15:06:11:562	37,503	36,818	32	900,52	37,16	0,00573	-0,06	-56,80	957,32
7/15/2025									
15:06:21:562	37,550	36,750	32	900,43	37,15	0,00572	-0,07	-66,34	966,76
7/15/2025									
15:06:31:562	37,579	36,624	32	900,33	37,10	0,00567	-0,09	-79,19	979,52
7/15/2025									
15:06:41:562	37,620	36,642	32	900,24	37,13	0,00570	-0,09	-81,10	981,34
7/15/2025									
15:06:51:562	37,663	36,698	32	900,15	37,18	0,00576	-0,09	-80,02	980,17
7/15/2025									
15:07:01:562	37,711	36,743	32	900,06	37,23	0,00581	-0,09	-80,27	980,32
7/15/2025									
15:07:11:562	37,755	36,798	32	899,96	37,28	0,00586	-0,09	-79,35	979,32
7/15/2025									
15:07:21:562	37,807	36,849	32	899,87	37,33	0,00592	-0,09	-79,44	979,31
7/15/2025									
15:07:31:562	37,855	36,908	32	899,78	37,38	0,00598	-0,09	-78,52	978,30
7/15/2025									
15:07:41:562	37,895	36,964	32	899,68	37,43	0,00603	-0,09	-77,20	976,88
7/15/2025									
15:07:51:562	37,928	37,024	32	899,59	37,48	0,00609	-0,08	-74,96	974,55
7/15/2025									
15:08:01:562	37,973	37,061	32	899,50	37,52	0,00613	-0,08	-75,62	975,12
7/15/2025									
15:08:11:562	38,023	37,105	32	899,41	37,56	0,00619	-0,08	-76,12	975,53
7/15/2025									
15:08:21:562	38,072	37,155	32	899,31	37,61	0,00624	-0,08	-76,04	975,35
7/15/2025									
15:08:31:562	38,125	37,213	32	899,22	37,67	0,00630	-0,08	-75,62	974,84
7/15/2025									
15:08:41:562	38,184	37,272	32	899,13	37,73	0,00637	-0,08	-75,62	974,75
7/15/2025									
15:08:51:562	38,222	37,329	32	899,03	37,78	0,00642	-0,08	-74,05	973,08
7/15/2025									
15:09:01:562	38,262	37,359	32	898,94	37,81	0,00646	-0,08	-74,88	973,82
7/15/2025									
15:09:11:562	38,311	37,418	32	898,85	37,86	0,00652	-0,08	-74,05	972,90
7/15/2025									
15:09:21:562	38,342	37,453	32	898,76	37,90	0,00656	-0,08	-73,72	972,47
7/15/2025									
15:09:31:562	38,381	37,494	32	898,66	37,94	0,00661	-0,08	-73,55	972,21

7/15/2025									
15:09:41:562	38,425	37,515	32	898,57	37,97	0,00664	-0,08	-75,46	974,03
7/15/2025									
15:09:51:562	38,467	37,524	32	898,48	38,00	0,00667	-0,09	-78,19	976,67
7/15/2025									
15:10:01:562	38,502	37,444	32	898,38	37,97	0,00665	-0,10	-87,73	986,11
7/15/2025									
15:10:11:562	38,544	37,425	32	898,29	37,98	0,00666	-0,10	-92,79	991,08
7/15/2025									
15:10:21:562	38,585	37,444	32	898,20	38,01	0,00670	-0,11	-94,61	992,81
7/15/2025									
15:10:31:562	38,632	37,487	32	898,10	38,06	0,00675	-0,11	-94,94	993,05
7/15/2025									
15:10:41:562	38,667	37,497	32	898,01	38,08	0,00677	-0,11	-97,02	995,03
7/15/2025									
15:10:51:562	38,701	37,485	32	897,92	38,09	0,00679	-0,11	-100,83	998,75
7/15/2025									
15:11:01:562	38,752	37,531	32	897,83	38,14	0,00684	-0,11	-101,24	999,07
7/15/2025									
15:11:11:562	38,799	37,561	32	897,73	38,18	0,00688	-0,11	-102,65	1000,39
7/15/2025									
15:11:21:562	38,845	37,578	32	897,64	38,21	0,00692	-0,12	-105,06	1002,70
7/15/2025									
15:11:31:562	38,903	37,576	32	897,55	38,24	0,00695	-0,12	-110,03	1007,58
7/15/2025									
15:11:41:562	38,951	37,574	32	897,45	38,26	0,00698	-0,13	-114,18	1011,64
7/15/2025									
15:11:51:562	38,991	37,588	32	897,36	38,29	0,00701	-0,13	-116,34	1013,70
7/15/2025									
15:12:01:562	39,045	37,610	32	897,27	38,33	0,00705	-0,13	-118,99	1016,26
7/15/2025									
15:12:11:562	39,098	37,565	32	897,18	38,33	0,00706	-0,14	-127,12	1024,29
7/15/2025									
15:12:21:562	39,124	37,350	32	897,08	38,24	0,00695	-0,16	-147,10	1044,18
7/15/2025									
15:12:31:562	39,142	37,372	32	896,99	38,26	0,00698	-0,16	-146,77	1043,76
7/15/2025									
15:12:41:562	39,180	37,329	32	896,90	38,25	0,00697	-0,17	-153,48	1050,38
7/15/2025									
15:12:51:562	39,251	37,293	32	896,80	38,27	0,00699	-0,18	-162,36	1059,16
7/15/2025									
15:13:01:562	39,339	37,338	32	896,71	38,34	0,00707	-0,19	-165,92	1062,63
7/15/2025									
15:13:11:562	39,415	37,383	32	896,62	38,40	0,00714	-0,19	-168,49	1065,11
7/15/2025									
15:13:21:562	39,495	37,430	32	896,53	38,46	0,00721	-0,19	-171,23	1067,76
7/15/2025									
15:13:31:562	39,622	37,488	32	896,43	38,56	0,00731	-0,20	-176,95	1073,38
7/15/2025									
15:13:41:562	39,748	37,541	32	896,34	38,64	0,00741	-0,20	-183,00	1079,34
7/15/2025									
15:13:51:562	39,848	37,593	32	896,25	38,72	0,00750	-0,21	-186,98	1083,23
7/15/2025									
15:14:01:562	39,938	37,623	32	896,15	38,78	0,00757	-0,21	-191,96	1088,11
7/15/2025									
15:14:11:562	40,064	37,668	32	896,06	38,87	0,00766	-0,22	-198,68	1094,74

7/15/2025									
15:14:21:562	40,204	37,719	32	895,97	38,96	0,00777	-0,23	-206,06	1102,02
7/15/2025									
15:14:31:562	40,299	37,768	32	895,88	39,03	0,00785	-0,23	-209,87	1105,75
7/15/2025									
15:14:41:562	40,372	37,810	32	895,78	39,09	0,00792	-0,24	-212,44	1108,22
7/15/2025									
15:14:51:562	40,487	37,844	32	895,69	39,17	0,00800	-0,24	-219,16	1114,85
7/15/2025									
15:15:01:562	40,626	37,880	32	895,60	39,25	0,00810	-0,25	-227,70	1123,30
7/15/2025									
15:15:11:562	40,745	37,899	32	895,50	39,32	0,00818	-0,26	-235,99	1131,49
7/15/2025									
15:15:21:562	40,848	37,927	32	895,41	39,39	0,00825	-0,27	-242,21	1137,62
7/15/2025									
15:15:31:562	40,963	37,975	32	895,32	39,47	0,00834	-0,28	-247,76	1143,08
7/15/2025									
15:15:41:562	41,069	38,011	32	895,23	39,54	0,00842	-0,28	-253,57	1148,79
7/15/2025									
15:15:51:562	41,193	38,045	32	895,13	39,62	0,00851	-0,29	-261,03	1156,16
7/15/2025									
15:16:01:562	41,303	38,081	32	895,04	39,69	0,00859	-0,30	-267,17	1162,21
7/15/2025									
15:16:11:562	41,409	38,102	32	894,95	39,76	0,00867	-0,31	-274,22	1169,16
7/15/2025									
15:16:21:562	41,542	38,088	32	894,85	39,82	0,00873	-0,32	-286,40	1181,26
7/15/2025									
15:16:31:562	41,650	38,058	32	894,76	39,85	0,00878	-0,33	-297,85	1192,61
7/15/2025									
15:16:41:562	41,767	38,053	32	894,67	39,91	0,00884	-0,34	-307,96	1202,63
7/15/2025									
15:16:51:562	41,871	38,036	32	894,58	39,95	0,00889	-0,36	-318,00	1212,57
7/15/2025									
15:17:01:562	41,963	37,889	32	894,48	39,93	0,00886	-0,38	-337,81	1232,30
7/15/2025									
15:17:11:562	42,062	37,895	32	894,39	39,98	0,00892	-0,39	-345,53	1239,92
7/15/2025									
15:17:21:562	42,171	37,934	32	894,30	40,05	0,00900	-0,39	-351,33	1245,63
7/15/2025									
15:17:31:562	42,279	37,973	32	894,20	40,13	0,00909	-0,40	-357,05	1251,26
7/15/2025									
15:17:41:562	42,390	37,953	32	894,11	40,17	0,00914	-0,41	-367,91	1262,03
7/15/2025									
15:17:51:562	42,515	37,962	32	894,02	40,24	0,00922	-0,42	-377,53	1271,55
7/15/2025									
15:18:01:562	42,610	37,961	32	893,93	40,29	0,00927	-0,43	-385,49	1279,42
7/15/2025									
15:18:11:562	42,703	38,015	32	893,83	40,36	0,00935	-0,43	-388,73	1282,56
7/15/2025									
15:18:21:562	42,819	38,058	32	893,74	40,44	0,00944	-0,44	-394,78	1288,52
7/15/2025									
15:18:31:562	42,902	38,058	32	893,65	40,48	0,00949	-0,45	-401,66	1295,31
7/15/2025									
15:18:41:562	43,034	38,086	32	893,55	40,56	0,00958	-0,46	-410,29	1303,84
7/15/2025									
15:18:51:562	43,177	38,093	32	893,46	40,64	0,00966	-0,47	-421,56	1315,03

7/15/2025									
15:19:01:562	43,271	38,082	32	893,37	40,68	0,00971	-0,48	-430,27	1323,64
7/15/2025									
15:19:11:562	43,340	38,102	32	893,28	40,72	0,00976	-0,49	-434,33	1327,61
7/15/2025									
15:19:21:562	43,433	38,052	32	893,18	40,74	0,00979	-0,50	-446,19	1339,37
7/15/2025									
15:19:31:562	43,539	38,065	32	893,09	40,80	0,00986	-0,51	-453,90	1346,99
7/15/2025									
15:19:41:562	43,673	38,118	32	893,00	40,90	0,00996	-0,52	-460,62	1353,62
7/15/2025									
15:19:51:562	43,803	38,138	32	892,90	40,97	0,01005	-0,53	-469,74	1362,64
7/15/2025									
15:20:01:562	43,919	38,133	32	892,81	41,03	0,01011	-0,54	-479,77	1372,59
7/15/2025									
15:20:11:562	44,056	38,117	32	892,72	41,09	0,01018	-0,55	-492,46	1385,18
7/15/2025									
15:20:21:562	44,160	38,159	32	892,63	41,16	0,01026	-0,56	-497,60	1390,23
7/15/2025									
15:20:31:562	44,245	38,180	32	892,53	41,21	0,01032	-0,56	-502,91	1395,44
7/15/2025									
15:20:41:562	44,347	38,189	32	892,44	41,27	0,01039	-0,57	-510,62	1403,06
7/15/2025									
15:20:51:562	44,461	38,202	32	892,35	41,33	0,01046	-0,58	-518,99	1411,34
7/15/2025									
15:21:01:562	44,530	38,197	32	892,25	41,36	0,01049	-0,59	-525,13	1417,38
7/15/2025									
15:21:11:562	44,578	38,209	32	892,16	41,39	0,01053	-0,59	-528,12	1420,28
7/15/2025									
15:21:21:562	44,656	38,232	32	892,07	41,44	0,01059	-0,60	-532,68	1424,74
7/15/2025									
15:21:31:562	44,761	38,240	32	891,98	41,50	0,01065	-0,61	-540,72	1432,70
7/15/2025									
15:21:41:562	44,866	38,232	32	891,88	41,55	0,01071	-0,62	-550,09	1441,97
7/15/2025									
15:21:51:562	44,953	38,229	32	891,79	41,59	0,01075	-0,63	-557,55	1449,34
7/15/2025									
15:22:01:562	45,048	38,235	32	891,70	41,64	0,01081	-0,63	-564,93	1456,63
7/15/2025									
15:22:11:562	45,142	38,265	32	891,60	41,70	0,01088	-0,64	-570,24	1461,84
7/15/2025									
15:22:21:562	45,274	38,272	32	891,51	41,77	0,01096	-0,65	-580,60	1472,12
7/15/2025									
15:22:31:562	45,362	38,291	32	891,42	41,83	0,01102	-0,66	-586,33	1477,74
7/15/2025									
15:22:41:562	45,451	38,309	32	891,33	41,88	0,01108	-0,66	-592,21	1483,54
7/15/2025									
15:22:51:562	45,553	38,345	32	891,23	41,95	0,01116	-0,67	-597,69	1488,92
7/15/2025									
15:23:01:562	45,662	38,375	32	891,14	42,02	0,01124	-0,68	-604,24	1495,38
7/15/2025									
15:23:11:562	45,747	38,419	32	891,05	42,08	0,01132	-0,68	-607,64	1498,68
7/15/2025									
15:23:21:562	45,832	38,462	32	890,95	42,15	0,01139	-0,69	-611,12	1502,07
7/15/2025									
15:23:31:562	45,927	38,475	32	890,86	42,20	0,01145	-0,69	-617,92	1508,78

7/15/2025									
15:23:41:562	46,027	38,495	32	890,77	42,26	0,01152	-0,70	-624,55	1515,32
7/15/2025									
15:23:51:562	46,105	38,493	32	890,68	42,30	0,01156	-0,71	-631,18	1521,86
7/15/2025									
15:24:01:562	46,150	38,508	32	890,58	42,33	0,01160	-0,71	-633,67	1524,26
7/15/2025									
15:24:11:562	46,235	38,534	32	890,49	42,38	0,01166	-0,72	-638,56	1529,05
7/15/2025									
15:24:21:562	46,328	38,559	32	890,40	42,44	0,01173	-0,72	-644,20	1534,60
7/15/2025									
15:24:31:562	46,440	38,406	32	890,30	42,42	0,01171	-0,75	-666,18	1556,48
7/15/2025									
15:24:41:562	46,510	38,218	32	890,21	42,36	0,01164	-0,77	-687,57	1577,78
7/15/2025									
15:24:51:562	46,556	38,084	32	890,12	42,32	0,01159	-0,79	-702,50	1592,61
7/15/2025									
15:25:01:562	46,603	38,083	32	890,03	42,34	0,01162	-0,79	-706,48	1596,50
7/15/2025									
15:25:11:562	46,699	38,104	32	889,93	42,40	0,01169	-0,80	-712,69	1602,63
7/15/2025									
15:25:21:562	46,779	38,148	32	889,84	42,46	0,01176	-0,80	-715,68	1605,52
7/15/2025									
15:25:31:562	46,863	38,148	32	889,75	42,51	0,01181	-0,81	-722,65	1612,39
7/15/2025									
15:25:41:562	46,958	38,021	32	889,65	42,49	0,01179	-0,83	-741,05	1630,71
7/15/2025									
15:25:51:562	47,042	37,981	32	889,56	42,51	0,01182	-0,84	-751,34	1640,90
7/15/2025									
15:26:01:562	47,135	38,048	32	889,47	42,59	0,01191	-0,85	-753,49	1642,96
7/15/2025									
15:26:11:562	47,228	38,108	32	889,38	42,67	0,01199	-0,85	-756,23	1645,60
7/15/2025									
15:26:21:562	47,306	38,157	32	889,28	42,73	0,01207	-0,85	-758,63	1647,92
7/15/2025									
15:26:31:562	47,433	38,217	32	889,19	42,83	0,01217	-0,86	-764,19	1653,38
7/15/2025									
15:26:41:562	47,569	38,215	32	889,10	42,89	0,01225	-0,87	-775,63	1664,73
7/15/2025									
15:26:51:562	47,694	38,266	32	889,00	42,98	0,01235	-0,88	-781,77	1670,77
7/15/2025									
15:27:01:562	47,805	38,333	32	888,91	43,07	0,01245	-0,88	-785,42	1674,33
7/15/2025									
15:27:11:562	47,909	38,333	32	888,82	43,12	0,01251	-0,89	-794,04	1682,86
7/15/2025									
15:27:21:562	47,985	38,390	32	888,73	43,19	0,01259	-0,90	-795,61	1684,34
7/15/2025									
15:27:31:562	48,036	38,439	32	888,63	43,24	0,01265	-0,90	-795,78	1684,41
7/15/2025									
15:27:41:562	48,121	38,442	32	888,54	43,28	0,01270	-0,90	-802,58	1691,12
7/15/2025									
15:27:51:562	48,218	38,455	32	888,45	43,34	0,01276	-0,91	-809,55	1697,99
7/15/2025									
15:28:01:562	48,297	38,422	32	888,35	43,36	0,01279	-0,92	-818,83	1707,19
7/15/2025									
15:28:11:562	48,402	38,453	32	888,26	43,43	0,01287	-0,93	-824,97	1713,23

7/15/2025									
15:28:21:562	48,471	38,480	32	888,17	43,48	0,01292	-0,93	-828,45	1716,62
7/15/2025									
15:28:31:562	48,549	38,533	32	888,08	43,54	0,01300	-0,94	-830,52	1718,60
7/15/2025									
15:28:41:562	48,643	38,589	32	887,98	43,62	0,01308	-0,94	-833,67	1721,66
7/15/2025									
15:28:51:562	48,762	38,642	32	887,89	43,70	0,01318	-0,95	-839,15	1727,04
7/15/2025									
15:29:01:562	48,846	38,696	32	887,80	43,77	0,01326	-0,95	-841,64	1729,43
7/15/2025									
15:29:11:562	48,946	38,662	32	887,70	43,80	0,01330	-0,96	-852,75	1740,45
7/15/2025									
15:29:21:562	49,051	38,681	32	887,61	43,87	0,01337	-0,97	-859,88	1747,49
7/15/2025									
15:29:31:562	49,157	38,661	32	887,52	43,91	0,01342	-0,98	-870,33	1757,84
7/15/2025									
15:29:41:562	49,273	38,607	32	887,43	43,94	0,01345	-1,00	-884,42	1771,85
7/15/2025									
15:29:51:562	49,332	38,528	32	887,33	43,93	0,01344	-1,01	-895,86	1783,20
7/15/2025									
15:30:01:562	49,366	38,499	32	887,24	43,93	0,01345	-1,02	-901,09	1788,33
7/15/2025									
15:30:11:562	49,429	38,529	32	887,15	43,98	0,01350	-1,02	-903,82	1790,97
7/15/2025									
15:30:21:562	49,504	38,573	32	887,05	44,04	0,01357	-1,02	-906,40	1793,45
7/15/2025									
15:30:31:562	49,586	38,549	32	886,96	44,07	0,01361	-1,03	-915,18	1802,15
7/15/2025									
15:30:41:562	49,673	38,582	32	886,87	44,13	0,01367	-1,04	-919,66	1806,53
7/15/2025									
15:30:51:562	49,726	38,614	32	886,78	44,17	0,01372	-1,04	-921,40	1808,18
7/15/2025									
15:31:01:562	49,761	38,643	32	886,68	44,20	0,01376	-1,04	-921,90	1808,58
7/15/2025									
15:31:11:562	49,845	38,640	32	886,59	44,24	0,01381	-1,05	-929,12	1815,70
7/15/2025									
15:31:21:562	49,934	38,617	32	886,50	44,28	0,01385	-1,06	-938,40	1824,90
7/15/2025									
15:31:31:562	49,964	38,631	32	886,40	44,30	0,01387	-1,06	-939,73	1826,13
7/15/2025									
15:31:41:562	49,945	38,608	32	886,31	44,28	0,01385	-1,06	-940,06	1826,37
7/15/2025									
15:31:51:562	49,906	38,543	32	886,22	44,22	0,01379	-1,06	-942,22	1828,43
7/15/2025									
15:32:01:562	49,894	38,521	32	886,13	44,21	0,01378	-1,06	-943,05	1829,17
7/15/2025									
15:32:11:562	49,950	38,555	32	886,03	44,25	0,01383	-1,07	-944,87	1830,90
7/15/2025									
15:32:21:562	50,010	38,531	32	885,94	44,27	0,01385	-1,07	-951,84	1837,77
7/15/2025									
15:32:31:562	50,047	38,497	32	885,85	44,27	0,01385	-1,08	-957,72	1843,57
7/15/2025									
15:32:41:562	50,141	38,513	32	885,75	44,33	0,01392	-1,09	-964,19	1849,94
7/15/2025									
15:32:51:562	50,262	38,486	32	885,66	44,37	0,01397	-1,10	-976,46	1862,12

7/15/2025									
15:33:01:562	50,377	38,508	32	885,57	44,44	0,01405	-1,11	-984,17	1869,74
7/15/2025									
15:33:11:562	50,455	38,532	32	885,48	44,49	0,01411	-1,12	-988,65	1874,13
7/15/2025									
15:33:21:562	50,541	38,556	32	885,38	44,55	0,01417	-1,12	-993,79	1879,18
7/15/2025								-	
15:33:31:562	50,653	38,457	32	885,29	44,56	0,01418	-1,14	1011,29	1896,58
7/15/2025								-	
15:33:41:562	50,778	38,403	32	885,20	44,59	0,01422	-1,16	1026,13	1911,33
7/15/2025								-	
15:33:51:562	50,852	38,420	32	885,10	44,64	0,01428	-1,16	1030,86	1915,96
7/15/2025								-	
15:34:01:562	50,964	38,442	32	885,01	44,70	0,01435	-1,17	1038,32	1923,33
7/15/2025								-	
15:34:11:562	51,114	38,436	32	884,92	44,78	0,01444	-1,19	1051,26	1936,17
7/15/2025								-	
15:34:21:562	51,265	38,401	32	884,83	44,83	0,01450	-1,21	1066,68	1951,50
7/15/2025								-	
15:34:31:562	51,369	38,386	32	884,73	44,88	0,01456	-1,22	1076,55	1961,28
7/15/2025								-	
15:34:41:562	51,407	38,305	32	884,64	44,86	0,01453	-1,23	1086,41	1971,05
7/15/2025								-	
15:34:51:562	51,469	38,334	32	884,55	44,90	0,01459	-1,23	1089,15	1973,70
7/15/2025								-	
15:35:01:562	51,549	38,354	32	884,45	44,95	0,01464	-1,24	1094,13	1978,58
7/15/2025								-	
15:35:11:562	51,649	38,411	32	884,36	45,03	0,01473	-1,24	1097,69	1982,05
7/15/2025								-	
15:35:21:562	51,743	38,338	32	884,27	45,04	0,01475	-1,26	1111,54	1995,81
7/15/2025								-	
15:35:31:562	51,807	38,262	32	884,17	45,03	0,01474	-1,27	1123,15	2007,32
7/15/2025								-	
15:35:41:562	51,880	38,227	32	884,08	45,05	0,01477	-1,28	1132,10	2016,19
7/15/2025								-	
15:35:51:562	51,972	38,173	32	883,99	45,07	0,01479	-1,29	1144,21	2028,20
7/15/2025								-	
15:36:01:562	52,009	38,173	32	883,90	45,09	0,01481	-1,30	1147,28	2031,17
7/15/2025								-	
15:36:11:562	52,052	38,215	32	883,80	45,13	0,01486	-1,30	1147,36	2031,16
7/15/2025								-	
15:36:21:562	52,074	38,114	32	883,71	45,09	0,01482	-1,31	1157,56	2041,27
7/15/2025								-	
15:36:31:562	52,103	37,940	32	883,62	45,02	0,01474	-1,33	1174,39	2058,01
7/15/2025								-	
15:36:41:562	52,146	37,916	32	883,52	45,03	0,01475	-1,34	1179,95	2063,47
7/15/2025								-	
15:36:51:562	52,225	37,948	32	883,43	45,09	0,01481	-1,34	1183,84	2067,28
7/15/2025								-	
15:37:01:562	52,303	37,976	32	883,34	45,14	0,01487	-1,34	1187,99	2071,33
7/15/2025								-	
15:37:11:562	52,359	37,896	32	883,25	45,13	0,01486	-1,36	1199,27	2082,51
7/15/2025								-	
15:37:21:562	52,443	37,956	32	883,15	45,20	0,01495	-1,36	1201,26	2084,41
7/15/2025								-	
15:37:31:562	52,483	38,025	32	883,06	45,25	0,01501	-1,36	1198,85	2081,91

7/15/2025								-	
15:37:41:562	52,553	38,070	32	882,97	45,31	0,01508	-1,36	1200,93	2083,89
7/15/2025								-	
15:37:51:562	52,644	38,097	32	882,87	45,37	0,01514	-1,37	1206,23	2089,11
7/15/2025								-	
15:38:01:563	52,757	38,109	32	882,78	45,43	0,01522	-1,38	1214,61	2097,39
7/15/2025								-	
15:38:11:562	52,862	38,155	32	882,69	45,51	0,01530	-1,38	1219,50	2102,19
7/15/2025								-	
15:38:21:562	52,967	38,178	32	882,60	45,57	0,01538	-1,39	1226,30	2108,90
7/15/2025								-	
15:38:31:562	53,078	38,200	32	882,50	45,64	0,01545	-1,40	1233,68	2116,18
7/15/2025								-	
15:38:41:562	53,185	38,266	32	882,41	45,73	0,01555	-1,40	1237,08	2119,49
7/15/2025								-	
15:38:51:562	53,236	38,302	32	882,32	45,77	0,01561	-1,40	1238,32	2120,64
7/15/2025								-	
15:39:01:562	53,331	38,292	32	882,22	45,81	0,01566	-1,41	1247,03	2129,25
7/15/2025								-	
15:39:11:562	53,438	38,280	32	882,13	45,86	0,01571	-1,42	1256,90	2139,03
7/15/2025								-	
15:39:21:562	53,543	38,315	32	882,04	45,93	0,01579	-1,43	1262,70	2144,74
7/15/2025								-	
15:39:31:562	53,605	38,334	32	881,95	45,97	0,01584	-1,44	1266,27	2148,21
7/15/2025								-	
15:39:41:562	53,667	38,399	32	881,85	46,03	0,01591	-1,44	1266,02	2147,87
7/15/2025								-	
15:39:51:562	53,710	38,435	32	881,76	46,07	0,01596	-1,44	1266,60	2148,36
7/15/2025								-	
15:40:01:562	53,780	38,494	32	881,67	46,14	0,01603	-1,44	1267,51	2149,18
7/15/2025								-	
15:40:11:562	53,896	38,543	32	881,57	46,22	0,01613	-1,44	1273,07	2154,64
7/15/2025								-	
15:40:21:562	53,987	38,574	32	881,48	46,28	0,01620	-1,45	1278,04	2159,52
7/15/2025								-	
15:40:31:562	54,092	38,605	32	881,39	46,35	0,01628	-1,46	1284,18	2165,57
7/15/2025								-	
15:40:41:562	54,232	38,626	32	881,30	46,43	0,01637	-1,47	1294,05	2175,34
7/15/2025								-	
15:40:51:562	54,335	38,646	32	881,20	46,49	0,01644	-1,48	1300,93	2182,13
7/15/2025								-	
15:41:01:562	54,402	38,692	32	881,11	46,55	0,01651	-1,48	1302,67	2183,78
7/15/2025								-	
15:41:11:562	54,493	38,773	32	881,02	46,63	0,01661	-1,48	1303,50	2184,52
7/15/2025								-	
15:41:21:562	54,601	38,805	32	880,92	46,70	0,01669	-1,49	1309,80	2190,72
7/15/2025								-	
15:41:31:562	54,663	38,858	32	880,83	46,76	0,01676	-1,49	1310,55	2191,38
7/15/2025								-	
15:41:41:562	54,690	38,905	32	880,74	46,80	0,01680	-1,49	1308,89	2189,63
7/15/2025								-	
15:41:51:562	54,795	38,938	32	880,65	46,87	0,01688	-1,49	1314,86	2195,50
7/15/2025								-	
15:42:01:562	54,830	38,938	32	880,55	46,88	0,01690	-1,50	1317,76	2198,31
7/15/2025								-	
15:42:11:562	54,867	38,955	32	880,46	46,91	0,01694	-1,50	1319,42	2199,88

7/15/2025								-	
15:42:21:562	54,945	38,953	32	880,37	46,95	0,01698	-1,51	1326,05	2206,42
7/15/2025								-	
15:42:31:562	54,980	38,916	32	880,27	46,95	0,01698	-1,51	1332,02	2212,30
7/15/2025								-	
15:42:41:562	55,048	38,946	32	880,18	47,00	0,01704	-1,52	1335,17	2215,35
7/15/2025								-	
15:42:51:562	55,139	39,008	32	880,09	47,07	0,01713	-1,52	1337,58	2217,67
7/15/2025								-	
15:43:01:562	55,212	39,042	32	880,00	47,13	0,01719	-1,52	1340,81	2220,81
7/15/2025								-	
15:43:11:562	55,255	39,085	32	879,90	47,17	0,01724	-1,52	1340,81	2220,71
7/15/2025								-	
15:43:21:562	55,333	39,122	32	879,81	47,23	0,01731	-1,53	1344,21	2224,02
7/15/2025								-	
15:43:31:562	55,446	39,154	32	879,72	47,30	0,01739	-1,54	1350,93	2230,65
7/15/2025								-	
15:43:41:562	55,548	39,181	32	879,62	47,36	0,01747	-1,54	1357,15	2236,77
7/15/2025								-	
15:43:51:562	55,632	39,220	32	879,53	47,43	0,01754	-1,55	1360,88	2240,41
7/15/2025								-	
15:44:01:562	55,661	39,199	32	879,44	47,43	0,01755	-1,55	1365,02	2244,46
7/15/2025								-	
15:44:11:562	55,753	39,203	32	879,35	47,48	0,01760	-1,56	1372,32	2251,67
7/15/2025								-	
15:44:21:562	55,866	39,214	32	879,25	47,54	0,01767	-1,57	1380,78	2260,03
7/15/2025								-	
15:44:31:562	55,965	39,143	32	879,16	47,55	0,01769	-1,59	1394,88	2274,04
7/15/2025								-	
15:44:41:562	55,933	38,976	32	879,07	47,45	0,01758	-1,60	1406,07	2285,14
7/15/2025								-	
15:44:51:562	55,912	38,813	32	878,97	47,36	0,01748	-1,61	1417,84	2296,82
7/15/2025								-	
15:45:01:562	55,906	38,751	32	878,88	47,33	0,01744	-1,62	1422,49	2301,37
7/15/2025								-	
15:45:11:562	55,984	38,809	32	878,79	47,40	0,01752	-1,62	1424,15	2302,93
7/15/2025								-	
15:45:21:562	56,084	38,888	32	878,70	47,49	0,01762	-1,62	1425,89	2304,58
7/15/2025								-	
15:45:31:562	56,175	38,959	32	878,60	47,57	0,01772	-1,62	1427,55	2306,15
7/15/2025								-	
15:45:41:562	56,210	38,900	32	878,51	47,56	0,01771	-1,63	1435,34	2313,85
7/15/2025								-	
15:45:51:562	56,237	38,818	32	878,42	47,53	0,01768	-1,64	1444,38	2322,80
7/15/2025								-	
15:46:01:562	56,253	38,790	32	878,32	47,52	0,01767	-1,65	1448,03	2326,35
7/15/2025								-	
15:46:11:562	56,248	38,800	32	878,23	47,52	0,01768	-1,65	1446,78	2325,01
7/15/2025								-	
15:46:21:562	56,297	38,772	32	878,14	47,53	0,01769	-1,65	1453,17	2331,31
7/15/2025								-	
15:46:31:562	56,369	38,749	32	878,05	47,56	0,01772	-1,66	1461,05	2339,09
7/15/2025								-	
15:46:41:562	56,436	38,665	32	877,95	47,55	0,01771	-1,68	1473,57	2351,52
7/15/2025								-	
15:46:51:562	56,498	38,660	32	877,86	47,58	0,01775	-1,68	1479,12	2356,98

7/15/2025								-	
15:47:01:562	56,550	38,682	32	877,77	47,62	0,01779	-1,69	1481,61	2359,38
7/15/2025								-	
15:47:11:562	56,617	38,757	32	877,67	47,69	0,01787	-1,69	1480,95	2358,62
7/15/2025								-	
15:47:21:562	56,706	38,867	32	877,58	47,79	0,01799	-1,69	1479,20	2356,79
7/15/2025								-	
15:47:31:563	56,846	38,917	32	877,49	47,88	0,01810	-1,69	1486,67	2364,16
7/15/2025								-	
15:47:41:562	56,964	38,982	32	877,40	47,97	0,01821	-1,70	1491,06	2368,46
7/15/2025								-	
15:47:51:562	57,045	39,007	32	877,30	48,03	0,01827	-1,70	1495,71	2373,01
7/15/2025								-	
15:48:01:562	57,096	38,989	32	877,21	48,04	0,01829	-1,71	1501,43	2378,64
7/15/2025								-	
15:48:11:562	57,255	39,050	32	877,12	48,15	0,01842	-1,72	1509,55	2386,67
7/15/2025								-	
15:48:21:562	57,360	39,096	32	877,02	48,23	0,01850	-1,73	1514,45	2391,47
7/15/2025								-	
15:48:31:562	57,494	39,042	32	876,93	48,27	0,01855	-1,74	1530,03	2406,97
7/15/2025								-	
15:48:41:562	57,524	39,063	32	876,84	48,29	0,01858	-1,75	1530,78	2407,62
7/15/2025								-	
15:48:51:562	57,561	39,067	32	876,75	48,31	0,01861	-1,75	1533,52	2410,26
7/15/2025								-	
15:49:01:562	57,677	39,084	32	876,65	48,38	0,01869	-1,76	1541,73	2418,38
7/15/2025								-	
15:49:11:562	57,798	39,146	32	876,56	48,47	0,01879	-1,76	1546,62	2423,18
7/15/2025								-	
15:49:21:562	57,863	39,197	32	876,47	48,53	0,01886	-1,77	1547,78	2424,25
7/15/2025								-	
15:49:31:562	57,938	39,194	32	876,37	48,57	0,01890	-1,77	1554,25	2430,62
7/15/2025								-	
15:49:41:562	57,997	39,138	32	876,28	48,57	0,01891	-1,78	1563,78	2440,06
7/15/2025								-	
15:49:51:562	57,987	38,987	32	876,19	48,49	0,01882	-1,80	1575,47	2451,66
7/15/2025								-	
15:50:01:562	58,073	38,993	32	876,10	48,53	0,01887	-1,81	1582,11	2458,20
7/15/2025								-	
15:50:11:562	58,140	38,971	32	876,00	48,56	0,01890	-1,81	1589,49	2465,49
7/15/2025								-	
15:50:21:562	58,186	38,962	32	875,91	48,57	0,01892	-1,82	1594,05	2469,96
7/15/2025								-	
15:50:31:562	58,188	38,839	32	875,82	48,51	0,01885	-1,83	1604,41	2480,23
7/15/2025								-	
15:50:41:562	58,170	38,815	32	875,72	48,49	0,01883	-1,83	1604,91	2480,64
7/15/2025								-	
15:50:51:562	58,151	38,858	32	875,63	48,50	0,01885	-1,83	1599,77	2475,40
7/15/2025								-	
15:51:01:562	58,140	38,871	32	875,54	48,51	0,01885	-1,82	1597,78	2473,32
7/15/2025								-	
15:51:11:562	58,210	38,884	32	875,45	48,55	0,01890	-1,83	1602,51	2477,95
7/15/2025								-	
15:51:21:562	58,261	38,914	32	875,35	48,59	0,01895	-1,83	1604,25	2479,60
7/15/2025								-	
15:51:31:562	58,288	38,908	32	875,26	48,60	0,01896	-1,84	1606,98	2482,24

7/15/2025								-	
15:51:41:562	58,339	38,942	32	875,17	48,64	0,01901	-1,84	1608,39	2483,56
7/15/2025								-	
15:51:51:562	58,420	38,983	32	875,07	48,70	0,01909	-1,84	1611,71	2486,78
7/15/2025								-	
15:52:01:562	58,487	39,031	32	874,98	48,76	0,01915	-1,84	1613,29	2488,27
7/15/2025								-	
15:52:11:562	58,560	39,090	32	874,89	48,83	0,01923	-1,85	1614,45	2489,34
7/15/2025								-	
15:52:21:562	58,595	39,156	32	874,80	48,88	0,01929	-1,84	1611,88	2486,67
7/15/2025								-	
15:52:31:562	58,643	39,188	32	874,70	48,92	0,01934	-1,84	1613,20	2487,91
7/15/2025								-	
15:52:41:562	58,641	39,217	32	874,61	48,93	0,01936	-1,84	1610,63	2485,24
7/15/2025								-	
15:52:51:562	58,686	39,223	32	874,52	48,95	0,01939	-1,85	1613,87	2488,38
7/15/2025								-	
15:53:01:562	58,670	39,122	32	874,42	48,90	0,01932	-1,85	1620,91	2495,34
7/15/2025								-	
15:53:11:562	58,625	39,153	32	874,33	48,89	0,01932	-1,85	1614,61	2488,94
7/15/2025								-	
15:53:21:562	58,662	39,141	32	874,24	48,90	0,01933	-1,85	1618,68	2492,91
7/15/2025								-	
15:53:31:562	58,662	39,166	32	874,15	48,91	0,01935	-1,85	1616,60	2490,75
7/15/2025								-	
15:53:41:562	58,678	39,153	32	874,05	48,92	0,01935	-1,85	1619,01	2493,06
7/15/2025								-	
15:53:51:562	58,616	39,130	32	873,96	48,87	0,01931	-1,85	1615,77	2489,73
7/15/2025								-	
15:54:01:562	58,538	39,144	32	873,87	48,84	0,01927	-1,84	1608,15	2482,01
7/15/2025								-	
15:54:11:562	58,511	39,123	32	873,77	48,82	0,01925	-1,84	1607,65	2481,42
7/15/2025								-	
15:54:21:562	58,520	39,099	32	873,68	48,81	0,01924	-1,84	1610,38	2484,06
7/15/2025								-	
15:54:31:562	58,520	39,065	32	873,59	48,79	0,01922	-1,85	1613,20	2486,79
7/15/2025								-	
15:54:41:562	58,511	38,985	32	873,50	48,75	0,01917	-1,85	1619,09	2492,59
7/15/2025								-	
15:54:51:562	58,444	38,855	32	873,40	48,65	0,01906	-1,86	1624,31	2497,72
7/15/2025								-	
15:55:01:562	58,407	38,741	32	873,31	48,57	0,01898	-1,87	1630,70	2504,01
7/15/2025								-	
15:55:11:562	58,331	38,495	32	873,22	48,41	0,01880	-1,88	1644,80	2518,01
7/15/2025								-	
15:55:21:562	58,280	38,519	32	873,12	48,40	0,01878	-1,88	1638,58	2511,70
7/15/2025								-	
15:55:31:562	58,248	38,462	32	873,03	48,36	0,01873	-1,88	1640,65	2513,68
7/15/2025								-	
15:55:41:562	58,224	38,427	32	872,94	48,33	0,01870	-1,88	1641,56	2514,50
7/15/2025								-	
15:55:51:562	58,218	38,427	32	872,85	48,32	0,01870	-1,88	1641,06	2513,91
7/15/2025								-	
15:56:01:562	58,213	38,332	32	872,75	48,27	0,01865	-1,89	1648,53	2521,28
7/15/2025								-	
15:56:11:562	58,191	38,371	32	872,66	48,28	0,01866	-1,88	1643,47	2516,13

7/15/2025								-	
15:56:21:562	58,207	38,392	32	872,57	48,30	0,01868	-1,88	1643,05	2515,62
7/15/2025								-	
15:56:31:562	58,221	38,420	32	872,47	48,32	0,01871	-1,88	1641,89	2514,37
7/15/2025								-	
15:56:41:562	58,234	38,437	32	872,38	48,34	0,01873	-1,88	1641,56	2513,94
7/15/2025								-	
15:56:51:562	58,218	38,391	32	872,29	48,30	0,01869	-1,88	1644,05	2516,34
7/15/2025								-	
15:57:01:562	58,202	38,456	32	872,20	48,33	0,01872	-1,88	1637,33	2509,53
7/15/2025								-	
15:57:11:562	58,213	38,536	32	872,10	48,37	0,01878	-1,87	1631,61	2503,71
7/15/2025								-	
15:57:21:562	58,245	38,564	32	872,01	48,40	0,01881	-1,87	1631,94	2503,95
7/15/2025								-	
15:57:31:562	58,267	38,508	32	871,92	48,39	0,01879	-1,88	1638,41	2510,33
7/15/2025								-	
15:57:41:562	58,261	38,513	32	871,82	48,39	0,01880	-1,88	1637,50	2509,32
7/15/2025								-	
15:57:51:562	58,234	38,517	32	871,73	48,38	0,01879	-1,88	1634,93	2506,66
7/15/2025								-	
15:58:01:562	58,221	38,565	32	871,64	48,39	0,01881	-1,87	1629,87	2501,51
7/15/2025								-	
15:58:11:562	58,218	38,590	32	871,55	48,40	0,01882	-1,87	1627,55	2499,09
7/15/2025								-	
15:58:21:562	58,234	38,648	32	871,45	48,44	0,01887	-1,86	1624,07	2495,52
7/15/2025								-	
15:58:31:562	58,215	38,638	32	871,36	48,43	0,01885	-1,86	1623,32	2494,68
7/15/2025								-	
15:58:41:562	58,205	38,724	32	871,27	48,46	0,01890	-1,85	1615,36	2486,63
7/15/2025								-	
15:58:51:562	58,202	38,706	32	871,17	48,45	0,01889	-1,86	1616,60	2487,78
7/15/2025								-	
15:59:01:562	58,159	38,686	32	871,08	48,42	0,01885	-1,85	1614,70	2485,78
7/15/2025								-	
15:59:11:562	58,135	38,604	32	870,99	48,37	0,01879	-1,86	1619,51	2490,49
7/15/2025								-	
15:59:21:562	58,102	38,519	32	870,90	48,31	0,01873	-1,86	1623,82	2494,71
7/15/2025								-	
15:59:31:562	58,081	38,547	32	870,80	48,31	0,01873	-1,86	1619,75	2490,56
7/15/2025								-	
15:59:41:562	58,043	38,473	32	870,71	48,26	0,01867	-1,86	1622,74	2493,45
7/15/2025								-	
15:59:51:562	57,946	38,349	32	870,62	48,15	0,01855	-1,87	1624,98	2495,59
7/15/2025								-	
16:00:01:562	57,874	38,358	32	870,52	48,12	0,01851	-1,86	1618,26	2488,78
7/15/2025								-	
16:00:11:562	57,866	38,388	32	870,43	48,13	0,01853	-1,86	1615,11	2485,54
7/15/2025								-	
16:00:21:562	57,863	38,398	32	870,34	48,13	0,01853	-1,85	1614,03	2484,37
7/15/2025								-	
16:00:31:562	57,847	38,348	32	870,24	48,10	0,01850	-1,86	1616,85	2487,10
7/15/2025								-	
16:00:41:562	57,863	38,333	32	870,15	48,10	0,01850	-1,86	1619,42	2489,57
7/15/2025								-	
16:00:51:562	57,849	38,391	32	870,06	48,12	0,01853	-1,85	1613,45	2483,51

7/15/2025								-	
16:01:01:562	57,839	38,421	32	869,97	48,13	0,01854	-1,85	1610,14	2480,10
7/15/2025								-	
16:01:11:562	57,812	38,513	32	869,87	48,16	0,01858	-1,84	1600,27	2470,14
7/15/2025								-	
16:01:21:562	57,804	38,591	32	869,78	48,20	0,01862	-1,83	1593,14	2462,92
7/15/2025								-	
16:01:31:562	57,833	38,631	32	869,69	48,23	0,01866	-1,83	1592,22	2461,91
7/15/2025								-	
16:01:41:562	57,857	38,706	32	869,59	48,28	0,01872	-1,83	1588,00	2457,59
7/15/2025								-	
16:01:51:562	57,855	38,796	32	869,50	48,33	0,01878	-1,82	1580,37	2449,87
7/15/2025								-	
16:02:01:562	57,855	38,827	32	869,41	48,34	0,01880	-1,81	1577,80	2447,21
7/15/2025								-	
16:02:11:562	57,890	38,896	32	869,32	48,39	0,01886	-1,81	1574,98	2444,29
7/15/2025								-	
16:02:21:562	57,938	38,966	32	869,22	48,45	0,01893	-1,81	1573,15	2442,38
7/15/2025								-	
16:02:31:562	57,968	39,013	32	869,13	48,49	0,01897	-1,81	1571,74	2440,87
7/15/2025								-	
16:02:41:562	57,981	39,056	32	869,04	48,52	0,01901	-1,81	1569,26	2438,29
7/15/2025								-	
16:02:51:562	58,008	39,108	32	868,94	48,56	0,01906	-1,80	1567,18	2436,13
7/15/2025								-	
16:03:01:562	58,038	39,190	32	868,85	48,61	0,01912	-1,80	1562,87	2431,72
7/15/2025								-	
16:03:11:562	58,051	39,264	32	868,76	48,66	0,01917	-1,79	1557,81	2426,57
7/15/2025								-	
16:03:21:562	58,084	39,335	32	868,67	48,71	0,01924	-1,79	1554,66	2423,33
7/15/2025								-	
16:03:31:562	58,110	39,397	32	868,57	48,75	0,01929	-1,79	1551,68	2420,25
7/15/2025								-	
16:03:41:562	58,127	39,445	32	868,48	48,79	0,01933	-1,78	1549,11	2417,59
7/15/2025								-	
16:03:51:562	58,129	39,409	32	868,39	48,77	0,01931	-1,79	1552,26	2420,64
7/15/2025								-	
16:04:01:562	58,108	39,435	32	868,29	48,77	0,01932	-1,78	1548,36	2416,65
7/15/2025								-	
16:04:11:562	58,059	39,419	32	868,20	48,74	0,01928	-1,78	1545,62	2413,83
7/15/2025								-	
16:04:21:562	58,003	39,459	32	868,11	48,73	0,01927	-1,77	1537,66	2405,77
7/15/2025								-	
16:04:31:562	57,987	39,535	32	868,02	48,76	0,01931	-1,76	1530,03	2398,05
7/15/2025								-	
16:04:41:562	57,987	39,518	32	867,92	48,75	0,01930	-1,76	1531,44	2399,37
7/15/2025								-	
16:04:51:562	57,946	39,585	32	867,83	48,77	0,01932	-1,75	1522,49	2390,32
7/15/2025								-	
16:05:01:562	57,927	39,555	32	867,74	48,74	0,01929	-1,76	1523,40	2391,14
7/15/2025								-	
16:05:11:562	57,887	39,569	32	867,64	48,73	0,01928	-1,75	1518,92	2386,57
7/15/2025								-	
16:05:21:562	57,895	39,587	32	867,55	48,74	0,01930	-1,75	1518,09	2385,65
7/15/2025								-	
16:05:31:562	57,909	39,646	32	867,46	48,78	0,01934	-1,75	1514,36	2381,82

7/15/2025								-	
16:05:41:562	57,909	39,672	32	867,37	48,79	0,01936	-1,74	1512,21	2379,57
7/15/2025								-	
16:05:51:562	57,871	39,685	32	867,27	48,78	0,01935	-1,74	1507,98	2375,25
7/15/2025								-	
16:06:01:562	57,812	39,714	32	867,18	48,76	0,01933	-1,73	1500,68	2367,86
7/15/2025								-	
16:06:11:562	57,753	39,679	32	867,09	48,72	0,01928	-1,73	1498,69	2365,78
7/15/2025								-	
16:06:21:562	57,666	39,659	32	866,99	48,66	0,01922	-1,72	1493,14	2360,13
7/15/2025								-	
16:06:31:562	57,615	39,671	32	866,90	48,64	0,01920	-1,72	1487,91	2354,81
7/15/2025								-	
16:06:41:562	57,613	39,638	32	866,81	48,63	0,01918	-1,72	1490,48	2357,29
7/15/2025								-	
16:06:51:562	57,586	39,624	32	866,72	48,61	0,01916	-1,72	1489,40	2356,12
7/15/2025								-	
16:07:01:562	57,580	39,675	32	866,62	48,63	0,01919	-1,71	1484,68	2351,30
7/15/2025								-	
16:07:11:562	57,613	39,730	32	866,53	48,67	0,01924	-1,71	1482,85	2349,38
7/15/2025								-	
16:07:21:562	57,666	39,710	32	866,44	48,69	0,01926	-1,72	1488,91	2355,34
7/15/2025								-	
16:07:31:562	57,672	39,747	32	866,34	48,71	0,01929	-1,72	1486,34	2352,68
7/15/2025								-	
16:07:41:562	57,672	39,778	32	866,25	48,73	0,01931	-1,71	1483,77	2350,02
7/15/2025								-	
16:07:51:562	57,629	39,797	32	866,16	48,71	0,01930	-1,71	1478,62	2344,78
7/15/2025								-	
16:08:01:562	57,583	39,825	32	866,07	48,70	0,01929	-1,70	1472,49	2338,55
7/15/2025								-	
16:08:11:562	57,580	39,685	32	865,97	48,63	0,01921	-1,71	1483,85	2349,82
7/15/2025								-	
16:08:21:562	57,599	39,701	32	865,88	48,65	0,01923	-1,71	1484,10	2349,98
7/15/2025								-	
16:08:31:562	57,591	39,739	32	865,79	48,67	0,01925	-1,71	1480,28	2346,07
7/15/2025								-	
16:08:41:562	57,572	39,797	32	865,69	48,68	0,01927	-1,70	1473,90	2339,59
7/15/2025								-	
16:08:51:562	57,553	39,869	32	865,60	48,71	0,01931	-1,69	1466,35	2331,95
7/15/2025								-	
16:09:01:562	57,551	39,859	32	865,51	48,71	0,01930	-1,69	1467,02	2332,52
7/15/2025								-	
16:09:11:562	57,548	39,874	32	865,42	48,71	0,01931	-1,69	1465,52	2330,94
7/15/2025								-	
16:09:21:562	57,543	39,897	32	865,32	48,72	0,01932	-1,69	1463,20	2328,52
7/15/2025								-	
16:09:31:562	57,575	39,935	32	865,23	48,76	0,01936	-1,69	1462,70	2327,93
7/15/2025								-	
16:09:41:562	57,556	39,949	32	865,14	48,75	0,01936	-1,69	1459,97	2325,10
7/15/2025								-	
16:09:51:562	57,551	39,969	32	865,04	48,76	0,01937	-1,69	1457,89	2322,94
7/15/2025								-	
16:10:01:562	57,545	40,013	32	864,95	48,78	0,01940	-1,68	1453,75	2318,70
7/15/2025								-	
16:10:11:562	57,548	40,048	32	864,86	48,80	0,01942	-1,68	1451,10	2315,95

7/15/2025								-	
16:10:21:562	57,594	40,056	32	864,77	48,83	0,01946	-1,68	1454,25	2319,01
7/15/2025								-	
16:10:31:562	57,675	40,013	32	864,67	48,84	0,01948	-1,69	1464,53	2329,20
7/15/2025								-	
16:10:41:562	57,720	40,004	32	864,58	48,86	0,01950	-1,70	1469,01	2333,59
7/15/2025								-	
16:10:51:562	57,723	39,930	32	864,49	48,83	0,01946	-1,71	1475,39	2339,88
7/15/2025								-	
16:11:01:562	57,763	39,962	32	864,39	48,86	0,01951	-1,71	1476,05	2340,45
7/15/2025								-	
16:11:11:562	57,771	39,996	32	864,30	48,88	0,01953	-1,71	1473,90	2338,20
7/15/2025								-	
16:11:21:562	57,774	40,022	32	864,21	48,90	0,01955	-1,70	1471,99	2336,20
7/15/2025								-	
16:11:31:562	57,812	39,988	32	864,12	48,90	0,01956	-1,71	1477,96	2342,08
7/15/2025								-	
16:11:41:562	57,825	39,995	32	864,02	48,91	0,01957	-1,71	1478,46	2342,48
7/15/2025								-	
16:11:51:562	57,828	39,948	32	863,93	48,89	0,01955	-1,72	1482,60	2346,53
7/15/2025								-	
16:12:01:562	57,817	39,834	32	863,84	48,83	0,01948	-1,73	1491,15	2354,98
7/15/2025								-	
16:12:11:562	57,790	39,725	32	863,74	48,76	0,01940	-1,73	1497,94	2361,69
7/15/2025								-	
16:12:21:562	57,742	39,647	32	863,65	48,69	0,01933	-1,74	1500,43	2364,08
7/15/2025								-	
16:12:31:562	57,720	39,636	32	863,56	48,68	0,01931	-1,74	1499,52	2363,08
7/15/2025								-	
16:12:41:562	57,728	39,681	32	863,47	48,70	0,01935	-1,73	1496,45	2359,92
7/15/2025								-	
16:12:51:562	57,707	39,727	32	863,37	48,72	0,01936	-1,73	1490,90	2354,27
7/15/2025								-	
16:13:01:562	57,691	39,781	32	863,28	48,74	0,01939	-1,72	1485,09	2348,37
7/15/2025								-	
16:13:11:562	57,715	39,815	32	863,19	48,77	0,01942	-1,72	1484,26	2347,45
7/15/2025								-	
16:13:21:562	57,718	39,850	32	863,09	48,78	0,01945	-1,72	1481,61	2344,70
7/15/2025								-	
16:13:31:562	57,750	39,818	32	863,00	48,78	0,01945	-1,72	1486,92	2349,92
7/15/2025								-	
16:13:41:562	57,753	39,844	32	862,91	48,80	0,01947	-1,72	1485,01	2347,92
7/15/2025								-	
16:13:51:562	57,723	39,871	32	862,82	48,80	0,01947	-1,72	1480,28	2343,10
7/15/2025								-	
16:14:01:562	57,699	39,866	32	862,72	48,78	0,01945	-1,71	1478,71	2341,43
7/15/2025								-	
16:14:11:562	57,599	39,875	32	862,63	48,74	0,01940	-1,70	1469,67	2332,30
7/15/2025								-	
16:14:21:562	57,559	39,887	32	862,54	48,72	0,01939	-1,70	1465,36	2327,89
7/15/2025								-	
16:14:31:562	57,518	39,922	32	862,44	48,72	0,01939	-1,69	1459,06	2321,50
7/15/2025								-	
16:14:41:562	57,505	39,949	32	862,35	48,73	0,01940	-1,69	1455,74	2318,09
7/15/2025								-	
16:14:51:562	57,516	39,980	32	862,26	48,75	0,01942	-1,69	1454,08	2316,34

7/15/2025								-	
16:15:01:562	57,526	40,011	32	862,17	48,77	0,01945	-1,68	1452,34	2314,50
7/15/2025								-	
16:15:11:562	57,516	40,041	32	862,07	48,78	0,01946	-1,68	1449,02	2311,09
7/15/2025								-	
16:15:21:562	57,561	40,036	32	861,98	48,80	0,01949	-1,69	1453,17	2315,15
7/15/2025								-	
16:15:31:562	57,599	40,073	32	861,89	48,84	0,01953	-1,69	1453,25	2315,14
7/15/2025								-	
16:15:41:562	57,666	40,103	32	861,79	48,88	0,01959	-1,69	1456,32	2318,11
7/15/2025								-	
16:15:51:562	57,685	40,091	32	861,70	48,89	0,01960	-1,69	1458,89	2320,59
7/15/2025								-	
16:16:01:562	57,696	40,088	32	861,61	48,89	0,01961	-1,69	1460,05	2321,66
7/15/2025								-	
16:16:11:562	57,701	40,071	32	861,52	48,89	0,01960	-1,70	1461,87	2323,39
7/15/2025								-	
16:16:21:562	57,707	40,060	32	861,42	48,88	0,01960	-1,70	1463,28	2324,71
7/15/2025								-	
16:16:31:562	57,723	40,095	32	861,33	48,91	0,01963	-1,70	1461,71	2323,04
7/15/2025								-	
16:16:41:562	57,758	40,123	32	861,24	48,94	0,01967	-1,70	1462,29	2323,53
7/15/2025								-	
16:16:51:562	57,798	40,162	32	861,14	48,98	0,01972	-1,70	1462,37	2323,52
7/15/2025								-	
16:17:01:562	57,836	40,222	32	861,05	49,03	0,01978	-1,70	1460,55	2321,60
7/15/2025								-	
16:17:11:562	57,871	40,203	32	860,96	49,04	0,01979	-1,70	1465,03	2325,98
7/15/2025								-	
16:17:21:562	57,903	40,219	32	860,87	49,06	0,01982	-1,70	1466,35	2327,22
7/15/2025								-	
16:17:31:562	57,890	40,292	32	860,77	49,09	0,01986	-1,70	1459,22	2319,99
7/15/2025								-	
16:17:41:562	57,901	40,360	32	860,68	49,13	0,01990	-1,69	1454,49	2315,17
7/15/2025								-	
16:17:51:562	57,898	40,374	32	860,59	49,14	0,01991	-1,69	1453,09	2313,67
7/15/2025								-	
16:18:01:562	57,909	40,425	32	860,49	49,17	0,01995	-1,68	1449,77	2310,26
7/15/2025								-	
16:18:11:562	57,927	40,423	32	860,40	49,18	0,01996	-1,69	1451,43	2311,83
7/15/2025								-	
16:18:21:562	57,906	40,294	32	860,31	49,10	0,01988	-1,70	1460,38	2320,69
7/15/2025								-	
16:18:31:562	57,866	40,218	32	860,22	49,04	0,01981	-1,70	1463,37	2323,58
7/15/2025								-	
16:18:41:562	57,814	40,232	32	860,12	49,02	0,01979	-1,69	1457,89	2318,02
7/15/2025								-	
16:18:51:562	57,836	40,284	32	860,03	49,06	0,01984	-1,69	1455,41	2315,44
7/15/2025								-	
16:19:01:562	57,828	40,362	32	859,94	49,10	0,01988	-1,68	1448,28	2308,21
7/15/2025								-	
16:19:11:562	57,809	40,440	32	859,84	49,12	0,01992	-1,67	1440,23	2300,08
7/15/2025								-	
16:19:21:562	57,761	40,362	32	859,75	49,06	0,01984	-1,68	1442,72	2302,47
7/15/2025								-	
16:19:31:562	57,712	40,322	32	859,66	49,02	0,01980	-1,68	1441,97	2301,63

7/15/2025								-	
16:19:41:562	57,683	40,184	32	859,57	48,93	0,01970	-1,69	1451,01	2310,58
7/15/2025								-	
16:19:51:562	57,602	40,217	32	859,47	48,91	0,01967	-1,68	1441,56	2301,03
7/15/2025								-	
16:20:01:562	57,586	40,257	32	859,38	48,92	0,01969	-1,67	1436,92	2296,30
7/15/2025								-	
16:20:11:562	57,570	40,250	32	859,29	48,91	0,01968	-1,67	1436,17	2295,46
7/15/2025								-	
16:20:21:562	57,551	40,297	32	859,19	48,92	0,01970	-1,67	1430,70	2289,89
7/15/2025								-	
16:20:31:562	57,516	40,331	32	859,10	48,92	0,01970	-1,66	1424,98	2284,08
7/15/2025								-	
16:20:41:562	57,462	40,349	32	859,01	48,91	0,01968	-1,65	1419,01	2278,01
7/15/2025								-	
16:20:51:562	57,405	40,330	32	858,92	48,87	0,01964	-1,65	1415,85	2274,77
7/15/2025								-	
16:21:01:562	57,403	40,218	32	858,82	48,81	0,01957	-1,66	1424,98	2283,80
7/15/2025								-	
16:21:11:562	57,384	39,969	32	858,73	48,68	0,01942	-1,68	1444,05	2302,78
7/15/2025								-	
16:21:21:562	57,354	39,666	32	858,64	48,51	0,01923	-1,71	1466,68	2325,32
7/15/2025								-	
16:21:31:562	57,298	39,589	32	858,54	48,44	0,01915	-1,71	1468,43	2326,97
7/15/2025								-	
16:21:41:562	57,273	39,630	32	858,45	48,45	0,01916	-1,70	1462,95	2321,40
7/15/2025								-	
16:21:51:562	57,255	39,689	32	858,36	48,47	0,01919	-1,70	1456,57	2314,93
7/15/2025								-	
16:22:01:562	57,217	39,751	32	858,27	48,48	0,01921	-1,69	1448,28	2306,54
7/15/2025								-	
16:22:11:562	57,222	39,786	32	858,17	48,50	0,01923	-1,68	1445,79	2303,96
7/15/2025								-	
16:22:21:562	57,228	39,828	32	858,08	48,53	0,01926	-1,68	1442,80	2300,88
7/15/2025								-	
16:22:31:562	57,252	39,881	32	857,99	48,57	0,01931	-1,68	1440,40	2298,38
7/15/2025								-	
16:22:41:562	57,303	39,944	32	857,89	48,62	0,01938	-1,68	1439,40	2297,30
7/15/2025								-	
16:22:51:562	57,349	39,931	32	857,80	48,64	0,01940	-1,68	1444,30	2302,10
7/15/2025								-	
16:23:01:562	57,352	39,875	32	857,71	48,61	0,01937	-1,69	1449,19	2306,90
7/15/2025								-	
16:23:11:562	57,333	39,814	32	857,62	48,57	0,01933	-1,69	1452,67	2310,29
7/15/2025								-	
16:23:21:562	57,341	39,830	32	857,52	48,59	0,01934	-1,69	1452,01	2309,53
7/15/2025								-	
16:23:31:562	57,354	39,880	32	857,43	48,62	0,01938	-1,69	1448,94	2306,37
7/15/2025								-	
16:23:41:562	57,378	39,954	32	857,34	48,67	0,01944	-1,69	1444,79	2302,13
7/15/2025								-	
16:23:51:562	57,416	40,007	32	857,24	48,71	0,01949	-1,68	1443,55	2300,79
7/15/2025								-	
16:24:01:562	57,467	40,064	32	857,15	48,77	0,01956	-1,68	1443,05	2300,20
7/15/2025								-	
16:24:11:562	57,440	40,076	32	857,06	48,76	0,01955	-1,68	1439,82	2296,88

7/15/2025								-	
16:24:21:562	57,411	39,870	32	856,97	48,64	0,01942	-1,70	1454,49	2311,46
7/15/2025								-	
16:24:31:562	57,343	39,816	32	856,87	48,58	0,01935	-1,70	1453,33	2310,21
7/15/2025								-	
16:24:41:562	57,354	39,775	32	856,78	48,56	0,01933	-1,70	1457,65	2314,42
7/15/2025								-	
16:24:51:562	57,333	39,642	32	856,69	48,49	0,01925	-1,71	1466,93	2323,62
7/15/2025								-	
16:25:01:562	57,271	39,582	32	856,59	48,43	0,01918	-1,71	1466,77	2323,36
7/15/2025								-	
16:25:11:562	57,185	39,369	32	856,50	48,28	0,01900	-1,72	1477,30	2333,80
7/15/2025								-	
16:25:21:562	57,123	39,367	32	856,41	48,25	0,01897	-1,72	1472,32	2328,73
7/15/2025								-	
16:25:31:562	57,072	39,304	32	856,31	48,19	0,01890	-1,72	1473,32	2329,63
7/15/2025								-	
16:25:41:562	57,034	39,348	32	856,22	48,19	0,01891	-1,71	1466,52	2322,74
7/15/2025								-	
16:25:51:562	57,020	39,432	32	856,13	48,23	0,01895	-1,70	1458,39	2314,52
7/15/2025								-	
16:26:01:562	57,069	39,473	32	856,04	48,27	0,01901	-1,70	1459,06	2315,09
7/15/2025								-	
16:26:11:562	57,093	39,548	32	855,94	48,32	0,01907	-1,70	1454,83	2310,77
7/15/2025								-	
16:26:21:562	57,128	39,605	32	855,85	48,37	0,01912	-1,70	1453,00	2308,85
7/15/2025								-	
16:26:31:562	57,123	39,603	32	855,76	48,36	0,01912	-1,70	1452,75	2308,51
7/15/2025								-	
16:26:41:562	57,128	39,544	32	855,66	48,34	0,01909	-1,70	1458,06	2313,73
7/15/2025								-	
16:26:51:562	57,107	39,459	32	855,57	48,28	0,01903	-1,71	1463,37	2318,94
7/15/2025								-	
16:27:01:562	57,037	39,333	32	855,48	48,19	0,01892	-1,72	1468,01	2323,49
7/15/2025								-	
16:27:11:562	56,937	39,166	32	855,39	48,05	0,01877	-1,72	1473,57	2328,95
7/15/2025								-	
16:27:21:562	56,870	38,998	32	855,29	47,93	0,01863	-1,73	1481,94	2337,23
7/15/2025								-	
16:27:31:562	56,811	38,864	32	855,20	47,84	0,01852	-1,74	1488,16	2343,36
7/15/2025								-	
16:27:41:562	56,776	38,930	32	855,11	47,85	0,01854	-1,73	1479,79	2334,89
7/15/2025								-	
16:27:51:562	56,754	38,998	32	855,01	47,88	0,01857	-1,72	1472,32	2327,34
7/15/2025								-	
16:28:01:562	56,784	39,058	32	854,92	47,92	0,01862	-1,72	1469,83	2324,76
7/15/2025								-	
16:28:11:562	56,805	39,093	32	854,83	47,95	0,01866	-1,72	1468,67	2323,50
7/15/2025								-	
16:28:21:562	56,805	39,046	32	854,74	47,93	0,01863	-1,72	1472,57	2327,31
7/15/2025								-	
16:28:31:562	56,800	38,960	32	854,64	47,88	0,01858	-1,73	1479,29	2333,93
7/15/2025								-	
16:28:41:562	56,786	38,824	32	854,55	47,81	0,01850	-1,74	1489,40	2343,95
7/15/2025								-	
16:28:51:562	56,727	38,666	32	854,46	47,70	0,01837	-1,75	1497,61	2352,07

7/15/2025								-	
16:29:01:562	56,646	38,615	32	854,36	47,63	0,01829	-1,75	1495,13	2349,49
7/15/2025								-	
16:29:11:562	56,582	38,593	32	854,27	47,59	0,01825	-1,75	1491,64	2345,91
7/15/2025								-	
16:29:21:562	56,560	38,613	32	854,18	47,59	0,01825	-1,74	1488,16	2342,34
7/15/2025								-	
16:29:31:562	56,625	38,718	32	854,09	47,67	0,01835	-1,74	1484,84	2338,93
7/15/2025								-	
16:29:41:562	56,636	38,835	32	853,99	47,74	0,01843	-1,73	1476,05	2330,05
7/15/2025								-	
16:29:51:562	56,625	38,878	32	853,90	47,75	0,01845	-1,72	1471,58	2325,48
7/15/2025								-	
16:30:01:562	56,587	38,856	32	853,81	47,72	0,01841	-1,72	1470,25	2324,06
7/15/2025								-	
16:30:11:562	56,593	38,748	32	853,71	47,67	0,01836	-1,73	1479,70	2333,42
7/15/2025								-	
16:30:21:562	56,625	38,745	32	853,62	47,69	0,01837	-1,74	1482,60	2336,23
7/15/2025								-	
16:30:31:562	56,614	38,791	32	853,53	47,70	0,01840	-1,73	1477,88	2331,41
7/15/2025								-	
16:30:41:562	56,601	38,845	32	853,44	47,72	0,01842	-1,73	1472,32	2325,76
7/15/2025								-	
16:30:51:562	56,585	38,904	32	853,34	47,74	0,01845	-1,72	1466,10	2319,45
7/15/2025								-	
16:31:01:562	56,550	38,940	32	853,25	47,75	0,01845	-1,71	1460,22	2313,47
7/15/2025								-	
16:31:11:562	56,544	39,014	32	853,16	47,78	0,01849	-1,70	1453,58	2306,74
7/15/2025								-	
16:31:21:562	56,568	39,044	32	853,06	47,81	0,01853	-1,70	1453,09	2306,15
7/15/2025								-	
16:31:31:562	56,576	38,897	32	852,97	47,74	0,01845	-1,72	1465,94	2318,91
7/15/2025								-	
16:31:41:562	56,504	38,688	32	852,88	47,60	0,01829	-1,73	1477,30	2330,18
7/15/2025								-	
16:31:51:562	56,447	38,581	32	852,79	47,51	0,01819	-1,74	1481,44	2334,23
7/15/2025								-	
16:32:01:562	56,364	38,484	32	852,69	47,42	0,01809	-1,74	1482,60	2335,30
7/15/2025								-	
16:32:11:562	56,361	38,510	32	852,60	47,44	0,01810	-1,74	1480,20	2332,80
7/15/2025								-	
16:32:21:562	56,353	38,608	32	852,51	47,48	0,01816	-1,73	1471,41	2323,92
7/15/2025								-	
16:32:31:562	56,358	38,686	32	852,41	47,52	0,01821	-1,72	1465,36	2317,77
7/15/2025								-	
16:32:41:562	56,342	38,765	32	852,32	47,55	0,01825	-1,71	1457,48	2309,80
7/15/2025								-	
16:32:51:562	56,315	38,859	32	852,23	47,59	0,01829	-1,70	1447,45	2299,68
7/15/2025								-	
16:33:01:562	56,294	38,741	32	852,14	47,52	0,01821	-1,71	1455,49	2307,63
7/15/2025								-	
16:33:11:562	56,283	38,532	32	852,04	47,41	0,01808	-1,73	1471,91	2323,95
7/15/2025								-	
16:33:21:562	56,232	38,468	32	851,95	47,35	0,01802	-1,73	1472,99	2324,94
7/15/2025								-	
16:33:31:562	56,208	38,485	32	851,86	47,35	0,01802	-1,73	1469,59	2321,44

7/15/2025								-	
16:33:41:562	56,210	38,386	32	851,76	47,30	0,01796	-1,74	1477,96	2329,73
7/15/2025								-	
16:33:51:562	56,229	38,187	32	851,67	47,21	0,01786	-1,76	1496,04	2347,71
7/15/2025								-	
16:34:01:562	56,162	38,215	32	851,58	47,19	0,01784	-1,75	1488,16	2339,74
7/15/2025								-	
16:34:11:562	56,135	38,283	32	851,49	47,21	0,01786	-1,74	1480,28	2331,77
7/15/2025								-	
16:34:21:562	56,157	38,351	32	851,39	47,25	0,01792	-1,73	1476,47	2327,86
7/15/2025								-	
16:34:31:562	56,210	38,409	32	851,30	47,31	0,01798	-1,73	1476,05	2327,35
7/15/2025								-	
16:34:41:562	56,259	38,374	32	851,21	47,32	0,01799	-1,74	1483,02	2334,23
7/15/2025								-	
16:34:51:562	56,283	38,270	32	851,11	47,28	0,01795	-1,75	1493,63	2344,75
7/15/2025								-	
16:35:01:562	56,297	38,251	32	851,02	47,27	0,01795	-1,76	1496,37	2347,39
7/15/2025								-	
16:35:11:562	56,297	38,281	32	850,93	47,29	0,01797	-1,76	1493,88	2344,81
7/15/2025								-	
16:35:21:562	56,302	38,259	32	850,84	47,28	0,01796	-1,76	1496,12	2346,96
7/15/2025								-	
16:35:31:562	56,310	38,258	32	850,74	47,28	0,01797	-1,76	1496,87	2347,61
7/15/2025								-	
16:35:41:562	56,256	38,248	32	850,65	47,25	0,01793	-1,76	1493,22	2343,87
7/15/2025								-	
16:35:51:562	56,245	38,342	32	850,56	47,29	0,01798	-1,75	1484,51	2335,07
7/15/2025								-	
16:36:01:562	56,267	38,435	32	850,46	47,35	0,01805	-1,74	1478,62	2329,09
7/15/2025								-	
16:36:11:562	56,278	38,515	32	850,37	47,40	0,01811	-1,73	1472,90	2323,27
7/15/2025								-	
16:36:21:562	56,288	38,601	32	850,28	47,44	0,01816	-1,72	1466,60	2316,88
7/15/2025								-	
16:36:31:562	56,288	38,697	32	850,19	47,49	0,01822	-1,72	1458,64	2308,83
7/15/2025								-	
16:36:41:562	56,270	38,717	32	850,09	47,49	0,01823	-1,71	1455,49	2305,58