



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ANTE LA RADIACIÓN SOLAR DE LA CUBIERTA DE UN CAPTADOR DE POLICARBONATO

Autor: Iván Flores Fentanes

Directores: Eva María Arenas Pinilla

José Luis Becerra García

Madrid

Junio 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Estudio del comportamiento ante la radiación solar de la cubierta de un captador de  
policarbonato

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.: Iván Flores Fentanes

Fecha: 15/07/2025

Autorizada la entrega del proyecto

Eva María Arenas Pinilla

José Luis Becerra García

Fdo.: Eva María Arenas Pinilla y José Luis Becerra García

Fecha: 21/07/2025



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

## TRABAJO FIN DE GRADO ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ANTE LA RADIACIÓN SOLAR DE LA CUBIERTA DE UN CAPTADOR DE POLICARBONATO

Autor: Iván Flores Fentanes

Directores: Eva María Arenas Pinilla

José Luis Becerra García

Madrid

Junio 2025

# ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ANTE LA RADIACIÓN SOLAR DE LA CUBIERTA DE UN CAPTADOR DE POLICARBONATO

**Autor: Flores Fentanes, Iván.**

Directores: Arenas Pinilla, Eva María; Becerra García, José Luis.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

El trabajo estudia la respuesta térmica de cubiertas de policarbonato alveolar utilizadas en un captador solar térmico, evaluando su desempeño frente a la radiación solar en función de la disposición de sus canales y el ángulo de incidencia. Los resultados obtenidos establecen bases sólidas fomentando el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles.

**Palabras clave:** Captadores Solares, Colectores Solares, Radiación Solar, Policarbonato

### 1. Introducción

La energía solar ha acompañado a la humanidad desde siempre, pasando de simples sistemas pasivos a complejas instalaciones termoeléctricas modernas [1]. El impulsado interés en tecnologías verdes favorece el desarrollo de captadores solares térmicos al ser estos esenciales en la transición hacia energías sostenibles [2]. El policarbonato alveolar surge como alternativa al vidrio, aunque su transmitancia requiere caracterización detallada, ofrece un menor peso y mayor resistencia al impacto [3].

En este contexto, el presente estudio aborda un análisis experimental de la absorción solar a través de cubiertas de policarbonato empleando varias configuraciones, variando el ángulo de incidencia, siguiendo los criterios normalizados del ensayo UNE-EN 12975-2:2006.

### 2. Definición del proyecto

El objetivo general del proyecto consiste en determinar la configuración óptima de un colector solar térmico con panel o paneles de policarbonato midiendo su comportamiento frente a la radiación solar incidente. Para ello, se ensayaron tres disposiciones diferentes: panel simple con canales en vertical, doble panel con los canales de ambos en vertical y doble panel con los canales del menos expuesto en vertical, y del más expuesto en horizontal.

El ensayo fue diseñado para recoger datos de radiación solar variando ángulos de incidencia longitudinales y transversales. Todo ello contribuye a validar al policarbonato como una opción técnicamente viable y asequible para aplicaciones energéticas renovables y sostenibles.

### 3. Descripción del modelo

Se construyó un banco de ensayos compuesto por una estructura de aluminio sujeta por madera con paneles de policarbonato alveolar de 10 milímetros de espesor acoplados a un piranómetro DeltaOHM PYRA sense LPS020C0 con un reloj solar para controlar los ángulos de medición.

El sistema permite regular la inclinación y orientación cumpliendo con los ángulos normalizados,  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  y  $50^\circ$ , tanto longitudinales como transversales. Se registraron medidas de radiación para calcular la eficiencia de cada configuración, siguiendo la metodología IAM.

Las Ilustraciones 1, 2 y 3 muestran el banco de ensayos:



*Ilustración 1. Vista lateral de la estructura con un único panel*



*Ilustración 2. Vista frontal de la estructura con doble panel con los canales del más externo en vertical*



*Ilustración 3. Vista frontal de la estructura con doble panel con los canales del más externo en horizontal*

#### **4. Resultados**

Se realizaron tres ensayos: junio 2024, febrero 2025 y mayo 2025; abarcando distintas condiciones meteorológicas. Se observó un mejor comportamiento de la configuración con panel simple tanto para la variación de ángulos longitudinales como transversales. En cuanto a las configuraciones de doble panel, la que tiene ambos canales en posición vertical destaca frente a la otra al variar ángulos longitudinales, pues sus canales se orientan de forma paralela a la incidencia solar. Mediante la misma explicación, el comportamiento de la configuración con doble panel con los canales del más expuesto en posición horizontal destaca frente a la que presente ambos en vertical en términos de variación transversal del ángulo de incidencia.

A pesar de ciertas limitaciones en cuanto a la repetición de las medidas y errores al tomarlas, se comprobaron claras tendencias que confirman la capacidad del policarbonato para mejorar la viabilidad de captadores solares económicas y sostenibles.

#### **5. Conclusiones**

Este proyecto contribuye al desarrollo de tecnologías accesibles y adaptadas a contextos donde la sostenibilidad energética sea fundamental. Además, se ha demostrado que las cubiertas de policarbonato ofrecen prestaciones realmente competitivas frente al vidrio convencional en cuanto a colectores solares térmicos, pues combinan alta resistencia mecánica y bajo coste teniendo en cuenta su durabilidad.

Gracias a los ensayos experimentales, se confirma que la orientación de los canales respecto a la radiación incidente influye decisivamente en el rendimiento energético, aportando una referencia de diseño para futuras instalaciones.

En cuanto a trabajos futuros, se recomienda automatizar el sistema de medida, analizar otros materiales y evaluar la eficiencia térmica estudiando el comportamiento de un fluido caloportador.

## 6. Referencias

- [1] U.S. Department of Energy. (2003). The History of Solar. [The History of Solar](#)
- [2] Duffie, J.A., Beckman, W.A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition. *John Wiley and Sons*. [John A. Duffie, William A. Beckman\(auth.\)-Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth Edition \(2013\).pdf](#)
- [3] Perelló, D., Fasulo, A. (2001). Comparación de las transmitancias de policarbonatos y vidrio. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5(8), 143-148. [Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf](#)

# STUDY OF THE BEHAVIOUR OF A POLYCARBONATE COLLECTOR COVER UNDER SOLAR RADIATION

**Author: Flores Fentanes, Iván.**

Supervisors: Arenas Pinilla, Eva María; Becerra García, José Luis.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## ABSTRACT

The study analyses the thermal response of alveolar polycarbonate covers used in a solar thermal collector, evaluating its performance against solar radiation considering the arrangement of the channels and the angle of incidence. The results obtained establish a solid and strong foundation for promoting the development of sustainable energy solutions.

**Keywords:** Solar Thermal Collectors, Solar Radiation, Polycarbonate

## 1. Introduction

Solar energy has been developing throughout history, progressing from simple passive systems to complex thermoelectric installations [1]. The growing interest in green technologies is driving the development of solar thermal collectors, as they are essential for the transition towards sustainable energy sources [2]. Alveolar polycarbonate has emerged as a promising alternative to glass, as it offers lower weight and greater impact resistance [3].

In this context, the present study undertakes an experimental analysis of solar absorption through polycarbonate covers using three configurations and varying the angle of incidence, in accordance with the standardised UNE-EN 12975-2:2006 criteria.

## 2. Project definition

The general objective of the project is to determine the optimal configuration of a solar thermal collector using one or two polycarbonate panels by measuring its behaviour under incident solar radiation. To this end, three different configurations were tested: a single panel with vertical channels, a double panel with both channels in a vertical arrangement, and a double panel with the channels of the less exposed in a vertical arrangement and those of the more exposed in an horizontal way.

The test was designated to record solar radiation data while varying both longitudinal and transversal angles of incidence. Altogether contributes to validating polycarbonate as a technically viable and cost-effective option for renewable and sustainable energy applications.

## 3. Model description

A test bench was manufactured. It consisted of an aluminium frame supported by wooden elements with a 10-millimetre-thick alveolar polycarbonate panels fitted to a DeltaOHM PYRASense LPS020C0 pyranometer equipped with a solar dial to control the measurement angles.

The system allows the inclination and orientation to be adjusted in accordance with the standardised angles of 0°, 20°, 30°, 40° and 50°, both longitudinal and transversal. The radiation measurements were recorded in order to calculate the efficiency of each configuration, following the IAM methodology.

Figures 1, 2, and 3 illustrate the test bench:



*Figure 1. Side view of the structure with a single panel*



*Figure 2. Frontal view of the structure with double panel with the channels of the most exposed one in a vertical arrangement.*



*Figure 3. Frontal view of the structure with double panel with the channels of the most exposed one in a horizontal arrangement.*

#### **4. Results**

Three tests were executed: in June 2024, February 2025, and May 2025, covering different weather conditions. The configuration with a single panel showed better performance for both longitudinal and transversal angle variations. Among the double-panel configurations, the one with both channels in a vertical position stood out when varying the longitudinal angles, whereas the one where the channels of the most exposed panel are in a horizontal position performed in a better way when varying transversal angles. This phenomenon is due to the fact that the channels have to be orientated parallel to the incident solar radiation if trying to reach the peak performance.

Despite certain limitations in terms of repeating the measurements and human errors, clear trends were observed that confirm the capability of polycarbonate to improve the viability of affordable and sustainable solar thermal collectors.

#### **5. Conclusion**

This project contributes to the development of accessible technologies adapted to context where energy sustainability is essential. Furthermore, it has been demonstrated that polycarbonate covers offer highly competitive performance compared to conventional glass in solar thermal collectors, as they combine high mechanical resistance with low cost, considering its durability.

Thanks to the experimental tests, it has been confirmed that the orientation of the channels with respect to the incident radiation decisively influences the energy performance, providing a design reference for future installations.

For further research, it is recommended to automate the measurement system, as well as testing other materials and assessing thermal efficiency with a heat-transfer fluid.

## 6. References

- [1] U.S. Department of Energy. (2003). The History of Solar. [The History of Solar](#)
- [2] Duffie, J.A., Beckman, W.A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition. *John Wiley and Sons*. [John A. Duffie, William A. Beckman\(auth.\)-Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth Edition \(2013\).pdf](#)
- [3] Perelló, D., Fasulo, A. (2001). Comparación de las transmitancias de policarbonatos y vidrio. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5(8), 143-148. [Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf](#)

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>7</b>
1.1 Historia de los captadores.....	7
1.2 Captadores Solares .....	9
1.2.1 Captadores solares térmicos de placa plana .....	12
1.2.2 Captadores solares térmicos de tubos de vacío .....	14
1.2.3 Captadores solares térmicos de concentración.....	17
1.3 Descripción de la tecnología .....	18
1.4 Justificación.....	20
1.5 Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	21
<b>Capítulo 2. Estado de la Cuestión</b> .....	<b>22</b>
<b>Capítulo 3. Metodología</b> .....	<b>26</b>
3.1 Modelo desarrollado.....	28
3.2 Implementación .....	39
<b>Capítulo 4. Resultados</b> .....	<b>41</b>
4.1 Medidas de junio de 2024 .....	42
4.2 Medidas de febrero de 2025 .....	51
4.3 Medidas de mayo de 2025 .....	63
<b>Capítulo 5. Conclusiones y Trabajos Futuros</b> .....	<b>74</b>
5.1 Conclusiones .....	74
5.2 Trabajos Futuros.....	76
<b>Capítulo 6. Bibliografía</b> .....	<b>77</b>

## *Índice de figuras*

Figura 1. Captador solar creado por Horace-Bénédict de Saussure [1].....	8
Figura 2. Efecto termosifónico [4] .....	10
Figura 3. Colectores solares pasivos y activos [2].....	11
Figura 4. Sección transversal de un captador solar de placa plana [12].....	12
Figura 5. Captador solar de tubos de vacío [8].....	15
Figura 6. Captadores solares de tubos de vacío bajo el efecto de la nieve y hielo [1] .....	15
Figura 7. Captadores solares de placa plana bajo el efecto de la nieve y hielo [1] .....	15
Figura 8. Tipos de captadores solares térmicos de concentración: (a) Captador parabólico compuesto; (b) Captador parabólico pasante; (c) Reflector lineal de Fresnel; (d) Captador solar en forma de plato [11].....	18
Figura 9. Tres configuraciones: a) Panel único con los canales en vertical; b) Panel doble con los canales de ambos en vertical; c) Panel doble con los canales del menos expuesto en vertical, y los del más expuesto en horizontal. ....	20
Figura 10. Estructura molecular del policarbonato .....	22
Figura 11. Ensayo propuesto por Perelló y Fasulo [12] .....	24
Figura 12. Modificación del diseño del absorbedor [15].....	25
Figura 13. Ensayo de factor de modificador de ángulo .....	26
Figura 14. Marco .....	28
Figura 15. Estructura de sujeción del piranómetro .....	29
Figura 16. Sensibilidad espectral relativa del piranómetro y espectro solar estándar [17]	30
Figura 17. Diagrama de conexión del piranómetro LPS020C0 [17].....	31
Figura 18. Fuente de alimentación .....	32
Figura 19. Amperímetro .....	32
Figura 20. Planta del reloj solar.....	33
Figura 21. Lateral del reloj solar .....	34
Figura 22. Unión del marco a madera. ....	36

Figura 23. Madera para evitar el contacto del panel con el suelo .....	36
Figura 24. Varilla.....	37
Figura 25. Lateral de la estructura .....	37
Figura 26. Unión entre las maderas .....	38
Figura 27. Alzado de la estructura.....	38
Figura 28. Azotea de ICAI .....	39
Figura 29. Zona de trabajo.....	39
Figura 30. Absorción solar con el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales. Junio de 2024.....	46
Figura 31. Absorción solar con el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales. Junio de 2024.....	47
Figura 32. Pérdida respecto a las medidas sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales. Junio de 2024 .....	49
Figura 33. Pérdida respecto a las medidas sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales. Junio de 2024 .....	49
Figura 34. Error relativo variando ángulos longitudinales. Junio de 2024.....	50
Figura 35. Error relativo variando ángulos transversales. Junio de 2024.....	51
Figura 36. Absorción solar sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales. Febrero de 2025 .....	55
Figura 37. Absorción solar sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales. Febrero de 2025 .....	56
Figura 38. Absorción solar con el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales. Febrero de 2025 .....	57
Figura 39. Absorción solar con el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales. Febrero de 2025 .....	58
Figura 40. Pérdida respecto a las medidas sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales. Febrero de 2025 .....	59
Figura 41. Pérdida respecto a las medidas sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales. Febrero de 2025 .....	60
Figura 42. Error relativo variando ángulos longitudinales. Febrero de 2025.....	61

Figura 43. Error relativo variando ángulos transversales. Febrero de 2025.....	61
Figura 44. Absorción solar sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales. Mayo de 2025 .....	66
Figura 45. Absorción solar sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales. Mayo de 2025 .....	67
Figura 46. Absorción solar con el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales. Mayo de 2025 .....	68
Figura 47. Absorción solar con el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales. Mayo de 2025 .....	69
Figura 48. Pérdida respecto a las medidas sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales. Mayo de 2025 .....	70
Figura 49. Pérdida respecto a las medidas sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales. Mayo de 2025 .....	71
Figura 50. Error relativo variando ángulos longitudinales. Mayo de 2025 .....	72
Figura 51. Error relativo variando ángulos transversales. Mayo de 2025 .....	72

## *Índice de tablas*

Tabla 1. Cálculo de los valores de los radios del reloj solar .....	34
Tabla 2. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de panel simple, variando el ángulo longitudinal. Junio de 2024.....	42
Tabla 3. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de panel simple, variando el ángulo transversal. Junio de 2024.....	43
Tabla 4. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical, variando el ángulo longitudinal. Junio de 2024.....	43
Tabla 5. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical, variando el ángulo transversal. Junio de 2024.....	44
Tabla 6. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal, variando el ángulo longitudinal. Junio de 2024 ..	44
Tabla 7. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal, variando el ángulo transversal. Junio de 2024 ....	45
Tabla 8. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de panel simple, variando el ángulo longitudinal. Febrero de 2025.....	52
Tabla 9. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de panel simple, variando el ángulo transversal. Febrero de 2025.....	52
Tabla 10. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical, variando el ángulo longitudinal. Febrero de 2025...	53
Tabla 11. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical, variando el ángulo transversal. Febrero de 2025.....	53
Tabla 12. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal, variando el ángulo longitudinal. Febrero de 2025 .....	54
Tabla 13. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal, variando el ángulo transversal. Febrero de 2025.	54

---

Tabla 14. Radiación captada por el piranómetro para la configuración panel simple, variando el ángulo longitudinal. Mayo de 2025 .....	63
Tabla 15. Radiación captada por el piranómetro para la configuración panel simple, variando el ángulo transversal. Mayo de 2025 .....	63
Tabla 16. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical, variando el ángulo longitudinal. Mayo de 2025 .....	64
Tabla 17. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical, variando el ángulo transversal. Mayo de 2025 .....	64
Tabla 18. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal, variando el ángulo longitudinal. Mayo de 2025..	65
Tabla 19. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal, variando el ángulo transversal. Mayo de 2025....	65

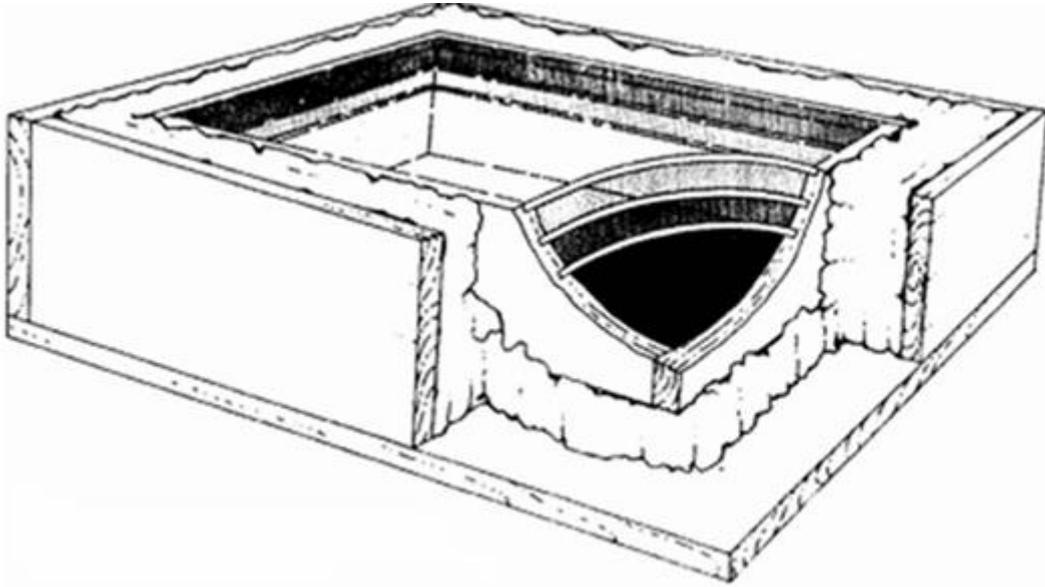
## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

### ***1.1 HISTORIA DE LOS CAPTADORES***

La humanidad ha aprovechado la energía solar desde tiempos antiguos, con el primer uso registrado en el siglo VII a.C, cuando se utilizaban piezas de vidrio cóncavas para concentrar la luz del sol y así poder encender fuego. Las civilizaciones antiguas, tanto griegos como romanos, diseñaban sus edificios para poder captar la luz del Sol especialmente en invierno, empleando principios de diseño solar pasivo, que serán explicados posteriormente [1].

La antigua ciudad griega de Priene, situada en la costa occidental de la actual Turquía, fue una de las primeras en aplicar una planificación urbana amplia y una orientación solar pasiva de una manera totalmente optimizada [2].

Con el paso de los siglos surgieron dispositivos más avanzados y complejos. En la década de 1760, el científico suizo Horace-Bénédict de Saussure creó el primer colector solar térmico, que se puede observar en la Figura 1. Este constaba de una caja aislada cubierta de vidrio que podía alcanzar temperaturas suficientemente altas como para poder cocinar alimentos, hecho que probó Sir John Herschel durante una expedición en Sudáfrica en la década de 1830.



*Figura 1. Captador solar creado por Horace-Bénédict de Saussure [1]*

Durante el siglo XIX, el matemático francés Augustin Mouchet fue uno de los primeros en desarrollar y crear un motor solar funcional. Sin embargo, la energía solar perdió relevancia debido al precio tan asequible de los combustibles fósiles. A causa de las crisis energéticas y preocupaciones ambientales, el interés por la energía solar aumentó en el siglo XX. Los primeros colectores solares, planos y de tubos de vacío fueron instalados en las viviendas para poder calentar agua [1].

Gracias al avance de la tecnología, los sistemas de concentración solar comenzaron a desarrollarse a gran escala debido a su gran capacidad de generar electricidad a través de plantas solares térmicas.

Los captadores solares han evolucionado a pasos agigantados; desde una simple caja de vidrio hasta sistemas térmicos y eléctricos realmente sofisticados. En la sociedad de hoy en día juegan un papel clave y fundamental en la transición hacia fuentes de energía sostenibles y renovables. Concretamente, en España, a finales de 2022 se acumulaban más de 5 millones de m<sup>2</sup> de superficie de colectores solares térmicos instalados [3]. Asumiendo que un sistema doméstico estándar ronda entre los 3 m<sup>2</sup> y 6 m<sup>2</sup>, la cifra total implicaría entre 800.000 y 1,6

millones de instalaciones. De todos modos, esta cifra es muy aproximada, pues no hay datos publicados sobre el número exacto de paneles o sistemas establecidos.

## ***1.2 CAPTADORES SOLARES***

Un captador solar, o colector solar, es aquel dispositivo que consigue transformar radiación solar en energía térmica o en electricidad. La manera más directa y común de llevar a cabo esta transformación es mediante captadores solares fotovoltaicos o captadores solares térmicos. Los solares fotovoltaicos se componen de células solares interconectadas, que son dispositivos eléctricos que utilizan el efecto fotoeléctrico para convertir luz solar, de forma directa, en electricidad de corriente continua.

Aunque en los últimos años ha habido un desmesurado interés en los captadores solares fotovoltaicos, los solares térmicos siguen siendo una variante muy competitiva en la que se emplean tecnologías fuertemente establecidas combinando fiabilidad y sencillez, y ellos son el objeto de estudio de este proyecto.

De esta manera, se puede definir un captador solar térmico como aquel dispositivo que consigue transformar radiación solar en energía térmica transferida a un fluido caloportador provocando su aumento de temperatura. Además de producir calor de manera eficiente, el captador ha de estar perfectamente diseñado en términos de robustez, pues tiene que estar expuesto a condiciones exteriores y soportar temperaturas extremas.

A su vez, debe maximizar la captación de la radiación solar y minimizar las pérdidas térmicas, sobre todo con el exterior. Su desempeño está basado en aprovechar las propiedades de transmisión de la cubierta permitiendo el paso de la radiación solar que incide sobre su superficie produciendo el calentamiento del fluido/ambiente.

Los colectores solares térmicos se dividen en dos categorías principales:

1. Colectores solares pasivos: denominados de esta manera pues no se utilizan otros dispositivos electromecánicos, como bombas o ventiladores, entre otros; emplean la flotabilidad natural del agua para garantizar la correcta circulación a lo largo del colector. Dado que el agua caliente es menos densa que el agua fría, el agua fría se calienta a la entrada del colector para empezar a circular de manera natural. Este efecto es conocido como termosifón y se debe a que las sustancias al calentarse se dilatan, disminuyendo su densidad [2].

Su observación se aprecia de una manera más clara en la Figura 2:

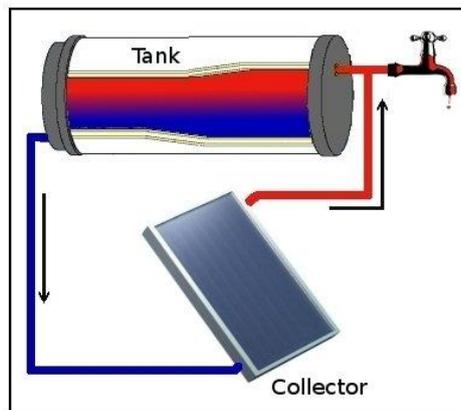
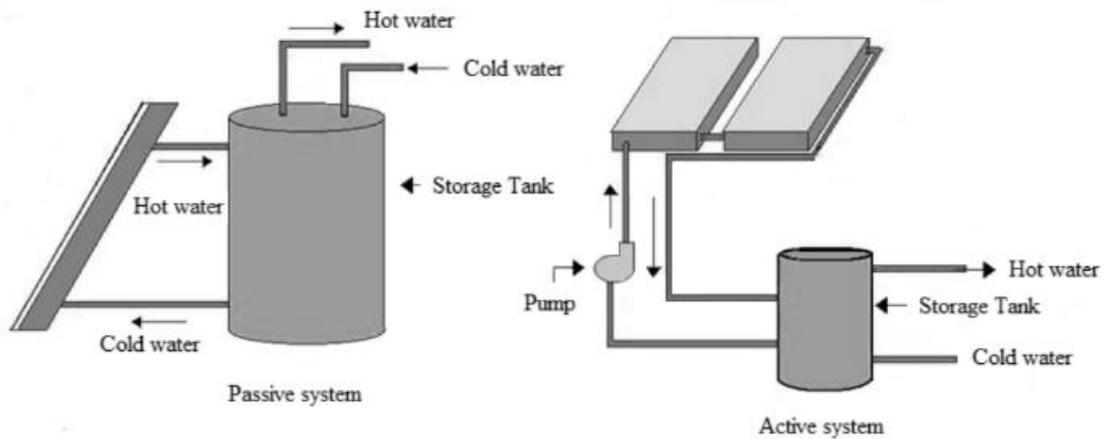


Figura 2. Efecto termosifónico [4]

2. Colectores solares activos: utilizan elementos electromecánicos como bombas para hacer circular el agua, o el fluido con el que se trabaja, a lo largo del sistema. Aunque estos colectores necesitan energía externa para mover la bomba, las principales ventajas respecto de los sistemas pasivos son las siguientes:
  - i. Pueden proporcionar un rendimiento superior y más consistente, ya que pueden ajustarse a las condiciones climáticas y de demanda cambiantes.
  - ii. Hay muchas menos restricciones a la hora de su configuración.

La Figura 3 ilustra los colectores solares pasivos y activos:



*Figura 3. Colectores solares pasivos y activos [2]*

Aunque ya se ha visto que los colectores pueden ser pasivos o activos, dependiendo de su funcionamiento, estos pueden clasificarse en varias categorías según su diseño y aplicación, entre otras características.

Los captadores solares más utilizados para aplicaciones comerciales e incluso domésticas son los de placa plana, utilizando una placa absorbente capaz de capturar el calor proveniente de los rayos solares. Otros captadores comunes son los de tubos de vacío, que están formados a partir de cristal y metal, y los captadores esféricos o parabólicos.

### 1.2.1 CAPTADORES SOLARES TÉRMICOS DE PLACA PLANA

Los captadores solares de placa plana están diseñados para aplicaciones que demandan un suministro de energía a una temperatura moderada [5]. Estos captadores absorben tanto la radiación difusa como la directa y no requieren un seguimiento solar. Además, es el tipo mecánicamente más sencillo de construir, precisando un mantenimiento realmente bajo [12].

En cuanto a su composición, en la superficie contiene un absorbedor de placa plana oscuro y un acristalamiento plano transparente (puede ser simple o doble) que permite la absorción de la energía solar por parte de un fluido caloportador, típicamente agua mezclada con glicol, que actúa como anticongelante eliminando el calor residual tanto en el absorbedor como en el aislamiento [2].

El absorbedor consta de una capa muy fina, normalmente de aluminio o cobre, recubierto con una pintura oscura para incrementar sus propiedades absorbentes.

La Figura 4 muestra la estructura de los captadores solares de placa plana.

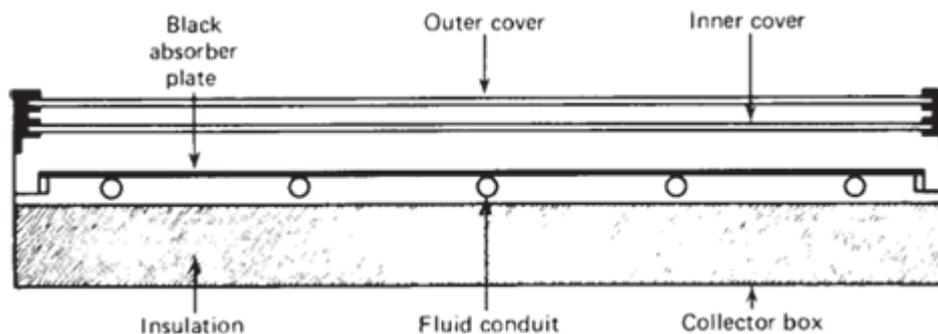


Figura 4. Sección transversal de un captador solar de placa plana [12]

Los colectores solares de placa plana calientan el fluido que circula por él a una temperatura menor que la del punto de ebullición del agua. Estos captadores son los mejores para aplicaciones que demanden una temperatura entre 30° y 70° y/o para aplicaciones que necesiten calor durante los meses de invierno. Comúnmente se aplica en sistemas de calentamiento de agua para calefacción o refrigeración de edificios.

En este proceso de refrigeración, el captador solar calienta agua mezclada con glicol mediante la incidencia de la radiación solar. Se utiliza agua mezclada con glicol porque este último actúa como anticongelante, protegiendo al sistema de climas fríos; además, los glicoles incluyen aditivos inhibidores de corrosión, evitando posibles daños en los componentes del sistema [12]. Una vez el fluido se encuentra caliente, se dirige a un generador térmico, donde calienta una mezcla de refrigerante y absorbente. Al calentarse, el refrigerante se separa del absorbente y pasa por un ciclo en el que se condensa, expande y evapora, generando así el efecto de enfriamiento. Por último, para cerrar el ciclo, el refrigerante se vuelve a mezclar con el absorbente, estando preparados para un nuevo ciclo.

De esta manera, se emplea energía solar térmica en vez de electricidad para enfriar un espacio, resultando especialmente útil en climas cálidos donde la demanda de refrigeración es alta durante las horas de mayor radiación solar.

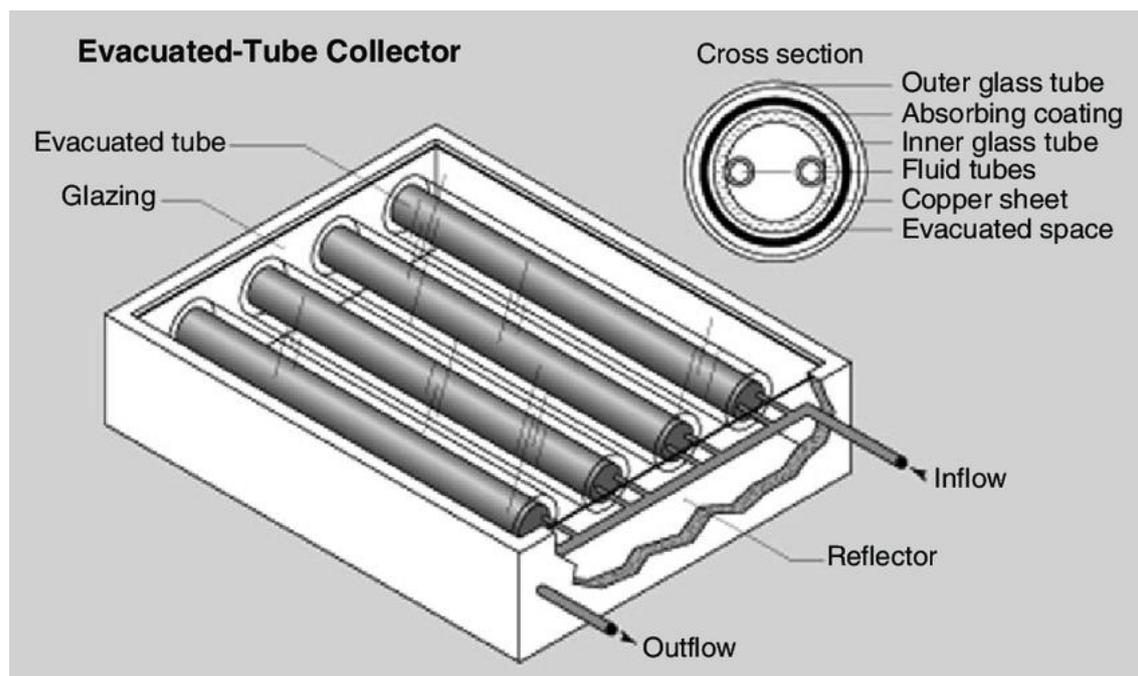
## 1.2.2 CAPTADORES SOLARES TÉRMICOS DE TUBOS DE VACÍO

Los captadores solares de tubos de vacío consisten en una tubería de metal, normalmente cobre, al que se fija una placa absorbente dentro de un tubo solar sellado al vacío. La tubería está hueca y en su interior puede albergar agua purificada a presión reducida o alcoholes como, por ejemplo, glicol.

Este tipo de colectores suelen ser utilizados para procesos industriales de media-alta temperatura, pues pueden alcanzar fácilmente el rango de temperatura al que este proceso suele darse, entre 70°C y 120°C [7].

En cuanto a su funcionamiento, cuando la radiación solar es absorbida por la superficie de la placa absorbente, el líquido se evapora, ascendiendo a la parte superior de la tubería que está sellada e insertada en un colector. El agua, o el alcohol empleado, que se encuentra en el interior de la tubería, fluye a través del colector a la par que se empieza a calentar, mientras que el fluido en el tubo de metal, una vez liberado el calor capturado, se condensa y fluye de regreso por el tubo para que se pueda repetir el proceso [12].

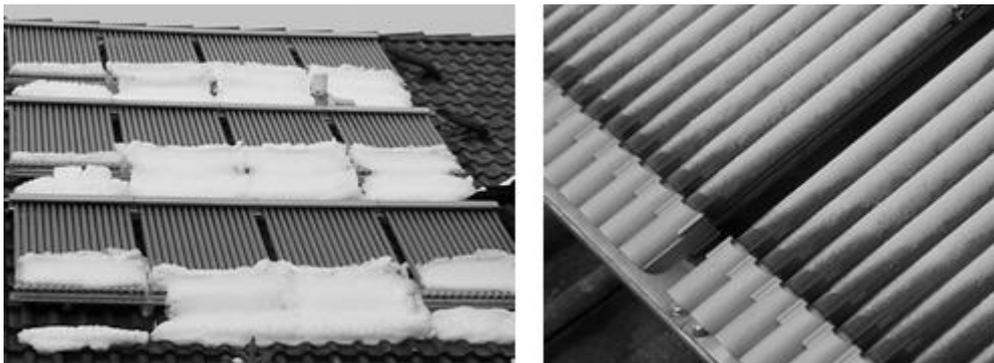
La Figura 5 describe la configuración y el proceso.



*Figura 5. Captador solar de tubos de vacío [8]*

Pese a que este tipo de captadores son mucho más complejos y parecen más completos, presentan diversas desventajas respecto a los de placa plana:

- i) En cuanto a su rendimiento en temperaturas más frías, la nieve y el hielo son realmente cruciales. Mientras que en los colectores de placa plana la nieve se derrite y cae por la superficie del acristalamiento, en los de tubos de vacío se puede quedar atrapada entre estos, provocando el colapso de todo el sistema [9], como se puede apreciar en las Figuras 6 y 7:



*Figura 6. Captadores solares de tubos de vacío bajo el efecto de la nieve y hielo [1]*



*Figura 7. Captadores solares de placa plana bajo el efecto de la nieve y hielo [1]*

- ii) En cuanto a la instalación, los colectores solares de tubos de vacío requieren un mayor tiempo y esfuerzo para ensamblar todas sus piezas, además que son más frágiles y requieren de un mayor mantenimiento.
- iii) Finalmente, los colectores solares de placa plana son generalmente más asequibles en cuanto al precio y proporcionan más energía por unidad monetaria gastada [9].

### **1.2.3 CAPTADORES SOLARES TÉRMICOS DE CONCENTRACIÓN**

Los captadores de concentración son tecnologías realmente prometedoras para todas aquellas aplicaciones que demandan un nivel de temperatura medio-alto, siendo esto posible al reducir el área de donde se producen las pérdidas mayoritarias. Para hacer posible este fenómeno, se interpone un dispositivo óptico entre la fuente de radiación y la superficie que absorbe dicha energía.

Este tipo de captadores están formados por un receptor y un concentrador, siendo este último el encargado de entregar grandes cantidades de radiación solar al receptor. Los tubos de vacío suelen actuar como receptores para minimizar las pérdidas térmicas a altas temperaturas. El receptor es el elemento del sistema que capta la radiación que proviene del sol; incluye el absorbedor, sus cubiertas y aislamiento asociados [12].

Los concentradores, en cuanto a su función, pueden ser reflectores o refractores; y en cuanto a su forma, cilíndricos o de cualquier superficie de revolución. Por otro lado, los receptores pueden ser cóncavos, convexos o planos y pueden estar cubiertos o descubiertos.

Hay muchísimos tipos de captadores de concentración, pero su descripción no es objeto de este estudio. Sin embargo, los más importantes se pueden visualizar en la Figura 8:

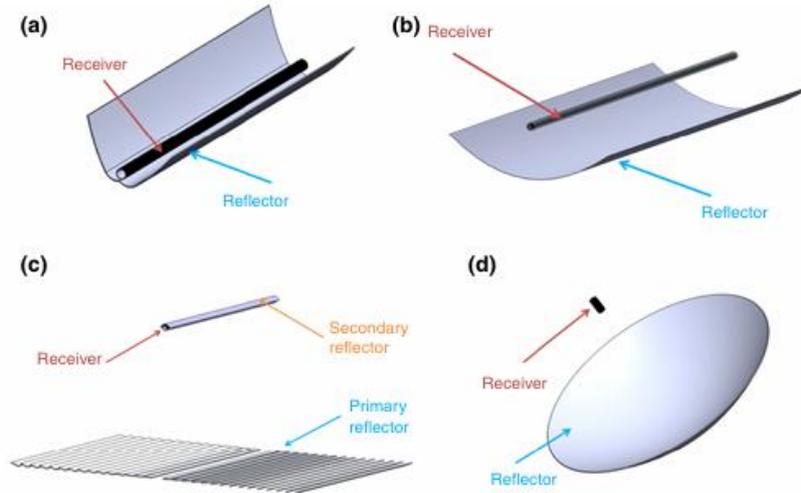


Figura 8. Tipos de captadores solares térmicos de concentración: (a) Captador parabólico compuesto; (b) Captador parabólico pasante; (c) Reflector lineal de Fresnel; (d) Captador solar en forma de plato [11]

Desde un punto de vista ingenieril, los captadores de concentración presentan diversas desventajas. Deben estar obligados a seguir la estela del sol, para que la radiación directa del mismo sea absorbida por el receptor. Además, requieren de un mantenimiento exhaustivo para conservar la calidad de los sistemas ópticos a lo largo del tiempo [12].

### 1.3 DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

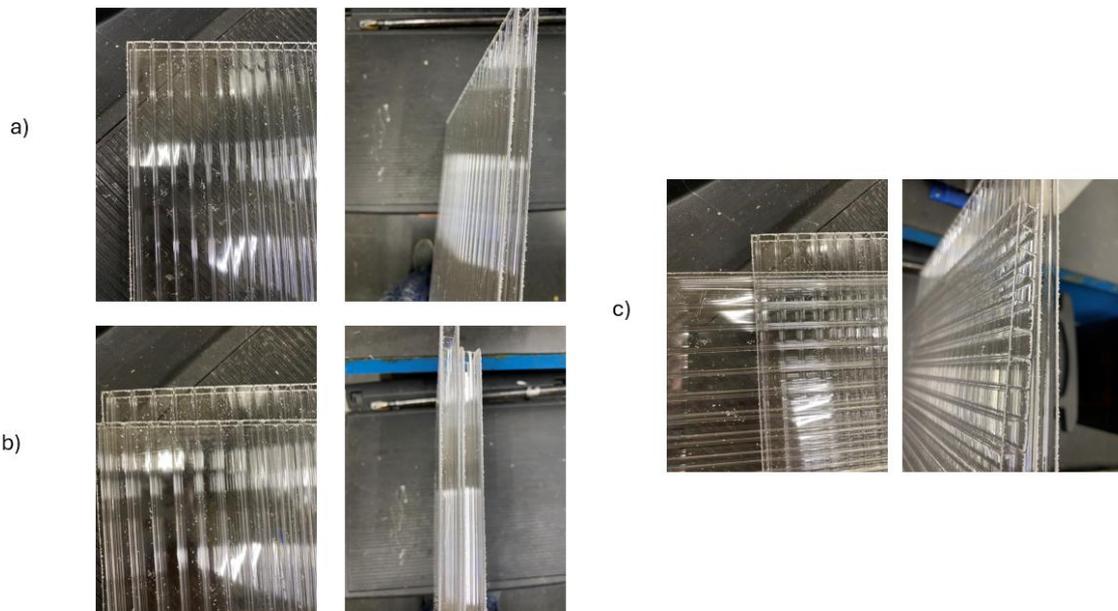
Después de haber revisado los principales conceptos teóricos relacionados con la energía solar y su aprovechamiento, se enfocará ahora en la descripción detallada de lo que se persigue con el colector solar trabajado, mencionando posibles semejanzas y diferencias con los mencionados anteriormente.

El colector solar sobre el que se va a trabajar es uno de placas de policarbonato planas. La elección del policarbonato como material base no es casualidad, pues responde a la intención de buscar soluciones viables desde el punto de vista técnico, pero, sobre todo, económico. El policarbonato, que será ampliamente estudiado en el siguiente capítulo, destaca por ser un material ligero, resistente al impacto y con buenas propiedades térmicas y ópticas, entre

otras. De esta manera, este trabajo persigue el diseño de un captador solar térmico de bajo coste, sencillo de fabricar e instalar.

Dada la forma del panel, al tener presencia de canales, surgió la duda cuál sería la configuración óptima a la hora de absorber el calor proveniente de la radiación solar. De esta manera, a grandes rasgos, se pretende realizar un ensayo similar al de factor de modificador de ángulo de incidencia (IAM) que propone la norma de ensayo de captadores UNE-EN 12975-2:2006. El ensayo que se realiza consiste en medir cuánta radiación atraviesa la placa de policarbonato en su configuración simple; un único panel con los canales en vertical, o doble, con dos paneles uno sobre otro. Para la configuración con doble panel, el panel más exterior variará su configuración; es decir, se medirá la radiación que le incide con sus canales en ambas posiciones, horizontal y vertical, mientras que el panel menos expuesto siempre tendrá la configuración de sus canales en vertical. Todo ello se hará variando el ángulo de incidencia.

La Figura 9 ilustra los canales de las tres configuraciones:



*Figura 9. Tres configuraciones: a) Panel único con los canales en vertical; b) Panel doble con los canales de ambos en vertical; c) Panel doble con los canales del menos expuesto en vertical, y los del más expuesto en horizontal.*

## **1.4 JUSTIFICACIÓN**

En un contexto global que exige cada vez más soluciones energéticas sostenibles, el desarrollo de captadores solares térmicos eficientes, resistentes y económicos se convierte en una necesidad fundamental y clave. Tradicionalmente, el vidrio ha sido el material de referencia para las cubiertas de los captadores debido a su alta transmitancia; sin embargo, presenta claras limitaciones en términos de fragilidad, peso y coste.

Frente a estos retos, el policarbonato alveolar se presenta como una clara alternativa técnica de gran interés. Es un material termoplástico que ofrece una resistencia al impacto hasta 300 veces superior a la del vidrio, gran flexibilidad y un peso considerablemente menor [12]. A pesar de sus numerosas ventajas, sus respuestas ante la radiación solar y capacidad de absorción en diferentes configuraciones no han sido analizadas con suficiente profundidad.

De esta manera, la relevancia de esta investigación es doble. En primer lugar, proporciona una alternativa viable y sostenible al uso del vidrio y, en segundo, contribuye a abrir el camino hacia soluciones de bajo coste y alto rendimiento, especialmente útiles en zonas donde el acceso a tecnologías más valiosas resulta realmente limitado.

A través de este proyecto, no sólo se intenta encontrar la configuración más eficiente, sino que también se quiere contribuir al desarrollo de sistemas energéticos sostenibles y adaptados a situaciones donde la sencillez y rentabilidad sean criterios altamente prioritarios.

El objetivo principal de este trabajo es determinar experimentalmente la configuración óptima de una cubierta de policarbonato alveolar en un captador solar térmico en función del ángulo con el que le incide la radiación solar. Además, se definen los subobjetivos:

- i. Aprender a utilizar métodos correctos para la recopilación y análisis de resultados.

- ii. Elaborar un documento coherente, estructurado y conciso en el que se analiza de forma correcta la mejor disposición del captador solar empleado.

## ***1.5 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE***

Adicionalmente, se mencionan los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible, ODS, propuestos por la Organización de las Naciones Unidas:

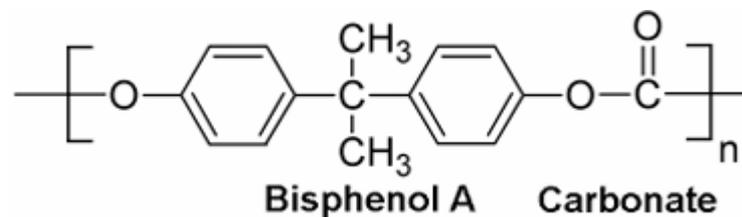
- i. ODS 4: Educación de calidad. Este proyecto fomenta la investigación académica y científica, generando conocimiento preciso y de calidad en el área de las energías renovables.
- ii. ODS 7: Energía asequible y no contaminante. El análisis del policarbonato para su uso en captadores solares contribuye a una mejora en la eficiencia y accesibilidad a tecnologías solares. Esto fomentará una transición hacia energías más sostenibles.
- iii. ODS 13: Acción por el clima. Gracias al desarrollo y optimización de la energía solar, este trabajo contribuye a reducir el cambio climático mediante el apoyo a la reducción de la huella de carbono promoviendo soluciones en base a energías renovables.

## Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El policarbonato es un polímero de tipo termoplástico transparente, resistente, dimensionalmente estable y ampliamente utilizado en la industria automovilística y en la construcción. Este polímero fue desarrollado, de manera independiente, por primera vez en 1953 por General Electric en Estados Unidos, y por Bayer en Alemania [13].

Como curiosidad, la molécula de policarbonato está compuesta de bisfenol-A y un grupo de carbono. El compuesto orgánico del bisfenol-A contiene dos anillos aromáticos, responsables de su imposibilidad de cristalización. A su vez, esta estructura es la encargada de darle al polímero su característica transparencia [13].

La Figura 10 representa la estructura molecular del policarbonato:



*Figura 10. Estructura molecular del policarbonato*

El policarbonato destaca por su peso, flexibilidad y resistencia al impacto; aproximadamente 300 veces superior a la del vidrio, que es el material que comúnmente se usa. También está dotado de una gran resistencia a las altas temperaturas y puede mantener sus propiedades fisicoquímicas en un rango de temperaturas de trabajo entre -40°C y 120°C [12].

Continuando con sus características, presentan un exhaustivo bloqueo frente a los rayos ultravioleta (UV) evitando aproximadamente el 98% de la radiación catalogada como dañina y reduciendo la degradación de los materiales expuestos directamente a la radiación solar.

Los paneles de policarbonato se han consolidado como materiales aislantes transparentes de última generación y son ampliamente utilizados en la industria debido a su estructura, proporcionando un aislamiento térmico óptimo y un rendimiento óptico excepcional [14].

En concreto, el funcionamiento del colector solar térmico de policarbonato es relativamente sencillo. Las placas de policarbonato permiten el paso de la radiación solar, la cual es absorbida por un material oscuro localizado en el interior de las placas. Este material se calienta, al ser oscuro y poder absorber todo el espectro de colores, provocando el consecuente calentamiento del agua o del fluido que circule por el interior de las placas.

Existen diversos ejemplos en la literatura donde se han construido y ensayado captadores de este tipo. Concretamente, Perelló y Fasulo [12], realizaron un estudio para evaluar la transmitancia del policarbonato alveolar en función del ángulo de incidencia de la radiación solar. Posteriormente la compararon con la del vidrio.

Para medir la radiación solar global incidente se empleó un piranómetro KIPP & ZONEN dispuesto de tal forma que siempre estuviese paralelo a la superficie de las cubiertas, asegurando que toda la radiación que le llega es únicamente la que transmiten las placas. La Figura 11 ilustra el ensayo de Perelló y Fasulo:



*Figura 11. Ensayo propuesto por Perelló y Fasulo [12]*

Con las medidas y su posterior análisis se llegó a la conclusión de que, con independencia de la inclinación solar y para cualquier espesor, el policarbonato alveolar posee una menor transmitancia que el vidrio.

Si se recuerda la propiedad de transmitancia, esta se puede representar como  $T = \frac{P}{P_0}$ , siendo  $T$ , la transmitancia,  $P$ , la potencia de la radiación saliente, y  $P_0$ , la incidente.

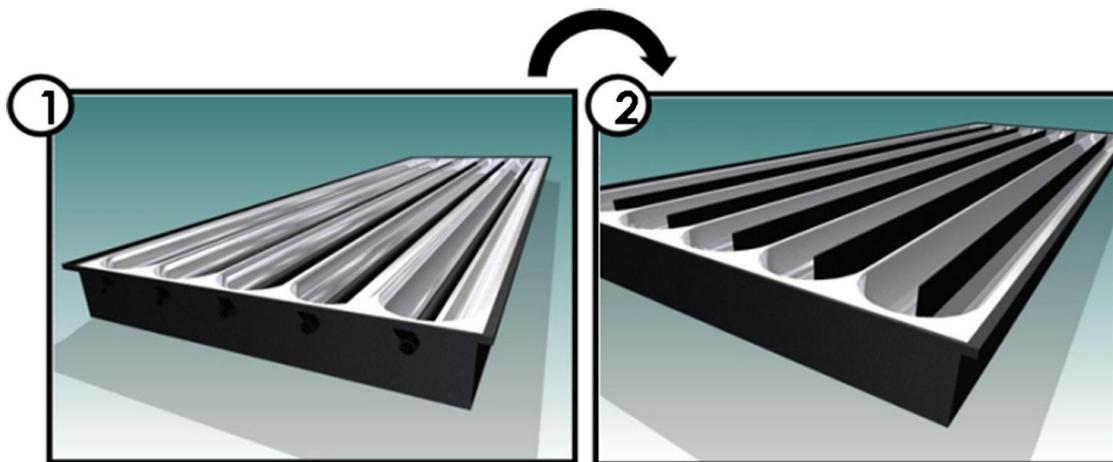
A pesar de la menor transmitancia del policarbonato a la radiación solar que el vidrio, la primera se presenta como una alternativa altamente válida y eficiente, especialmente en el uso en colectores solares, puesto que su menor peso y mayor resistencia al impacto contrarrestan las pequeñas desventajas que se pueden apreciar.

Cabe añadir una inconveniencia propia de la naturaleza del vidrio, su rigidez unida con su peso que deriva en fragilidad. De esta manera, si se dispone de un colector solar de vidrio habría que añadir una malla antigranizo para evitar su posible rotura cuando el clima es adverso, reduciendo así su transmitancia e igualándola a la del policarbonato.

Por último, en términos de coste, el policarbonato suele ser más caro que otros tipos de termoplásticos, pero sigue siendo mucho más económico que el vidrio especialmente cuando se tiene en cuenta su durabilidad y vida útil. Puede verse como una inversión inicial que se ve altamente compensada por su rendimiento a largo plazo.

Fernández y Dieste [15], desarrollaron un colector solar térmico para suministrar calor entre 40°C y 90°C de manera muy económica. A diferencia de los colectores convencionales, reemplazaron los tubos tradicionales por canales reflectantes semicirculares, rediseñando los absorbedores como placas rectangulares colocadas en el centro de los canales, mejorando la transferencia térmica al eliminar interfaces innecesarias.

La Figura 12 muestra la modificación del diseño del absorbedor:



*Figura 12. Modificación del diseño del absorbedor [15]*

Se empleó una placa de vidrio templado como cubierta superior, pero la estructura principal del captador se selló con una lámina de policarbonato.

Uno de los resultados más innovadores e importantes fue la validación de materiales poliméricos como el policarbonato para sustituir completamente estructuras metálicas, reduciendo así hasta un 50% de los costes de producción. Gracias a la resistencia mecánica y térmica del policarbonato, el sistema se convirtió en una opción claramente viable para aplicaciones domésticas y comerciales de pequeña y mediana escala [15].

## Capítulo 3. METODOLOGÍA

El ensayo de factor de modificador de ángulo pretende evaluar cuánta radiación solar atraviesa las placas de policarbonato dependiendo de la disposición de los canales; vertical u horizontal; si se emplea panel simple o doble, y del ángulo con el que incide la radiación. Para poder realizar este ensayo con éxito, se debe cumplir la condición de tener un día completamente despejado, y las medidas han de realizarse entre las 12:00 y las 14:00, en la medida de lo posible. Además, se han de medir los ángulos  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  y  $50^\circ$  en dirección longitudinal; es decir, paralela a los canales por los que tendría que circular el fluido, y en dirección transversal; es decir, perpendicular a los canales por los que tendría que circular el fluido. El panel irá variando su ángulo de inclinación respecto del suelo y el acimut para poder conseguir los ángulos de incidencia previamente mencionados. Una representación del ensayo al que se va a someter el panel de policarbonato se muestra en la Figura 13:

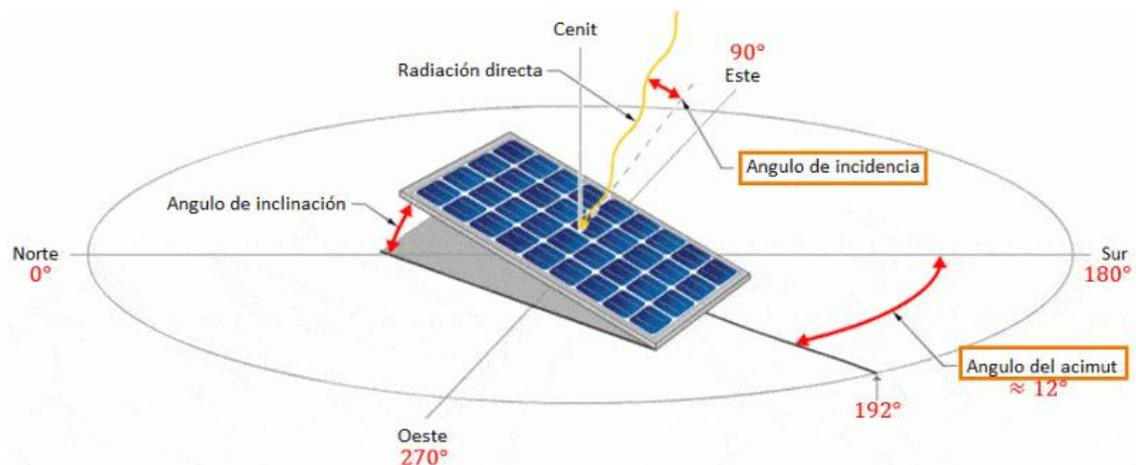


Figura 13. Ensayo de factor de modificador de ángulo

Para la realización del ensayo son necesarios los siguientes aparatos de medida. Un piranómetro, que debe estar instalado en el plano del captador, y un reloj solar angular, con un fiel de 50 milímetros en el centro, cuya sombra, al llegar a un círculo de un radio determinado, nos indique el ángulo de incidencia de la radiación solar.

El procedimiento de medida es el siguiente. Se parte del ángulo de incidencia  $0^\circ$ ; es decir, radiación perpendicular. Se mide la radiación en el plano del captador y detrás de él. Por cada nueva posición adoptada se han de esperar, al menos, tres minutos antes de tomar la nueva medida.

Posteriormente, se varían la inclinación y el acimut (orientación del panel solar, de  $-100^\circ$  a  $260^\circ$ ) del captador solar para tener un ángulo  $20^\circ$  longitudinal, y se repiten las medidas. Lo mismo se hace para obtener las medidas de los ángulos  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  y  $50^\circ$ .

Por último, se vuelve a hacer una medida perpendicular, y tras ella, se miden los ángulos  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  y  $50^\circ$  de manera transversal. Estos ángulos se conseguirán variando tanto la inclinación del captador como el azimut.

Ambas medidas, la del plano del captador y detrás de él, se realizan para así compararlas y verificar cuál es la mejor disposición de las placas de policarbonato; la disposición más eficiente.

Para alcanzar los objetivos planteados, se ha seguido una metodología experimental basada en la toma sistemática de medidas de radiación solar.

En primer lugar, se construyó una estructura capaz de regular el acimut e inclinación del panel solar, permitiendo ángulos de medición de  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  y  $50^\circ$ , tanto longitudinales como transversales. Posteriormente, se añadieron las placas de policarbonato alveolar de 10 milímetros de ancho en tres configuraciones diferentes: panel simple con sus canales en posición vertical, doble panel con los canales del más exterior en posición vertical y doble panel con los canales del más exterior en posición horizontal. En las configuraciones de doble panel, el interior siempre tiene sus canales en posición vertical.

En cuanto a la instrumentación, se utilizó un piranómetro DeltaOHM PYRA sense LPS020C0 conectado a una fuente de alimentación LABPS3005, junto con un amperímetro G45 de GEF y un reloj solar diseñado con un fiel de 50 milímetros.

Para cada configuración y ángulo, se midió la radiación sin panel (paneles) y detrás del panel (paneles). Se elaboraron gráficas de absorción solar, pérdidas respecto a la medida sin panel (paneles) y error relativo para comparar de manera rigurosa el comportamiento de las diferentes configuraciones.

### **3.1 MODELO DESARROLLADO**

Como se ha mencionado con anterioridad, el ensayo se va a realizar sobre un panel solar compuesto por una o dos placas planas de policarbonato.

La estructura en sí del captador; es decir, el marco, se ha construido a partir de perfiles de aluminio extruido, anodizado tipo E6/EV1, cuyas piezas se han ido uniendo a otras mediante el uso de tornillos y arandelas. Una vez construido el marco, se le añadió una pequeña estructura del mismo material para poder sujetar el piranómetro, el cual medirá la radiación que incide sobre el panel, ya sea en su configuración simple o doble. En la Figura 14 se puede observar el marco, y en la Figura 15, la estructura montada para sujetar el piranómetro.



*Figura 14. Marco*



*Figura 15. Estructura de sujeción del piranómetro*

El piranómetro a emplear será el DeltaOHM PYRASense LPS020C0 series. Pertenece a *Spectrally Class Flat Class B* según la norma ISO 9060, que es la encargada de regular la calidad de los piranómetros. *Class B* implica un buen nivel de precisión, adecuado para aplicaciones como monitoreo solar en sistemas fotovoltaicos, estudios ambientales o meteorología. *Spectrally Flat* significa que el sensor responde de manera uniforme a distintas longitudes de onda del espectro solar, mejorando la exactitud de la medición. Este piranómetro está capacitado para absorber la radiación solar de forma casi completa en un amplio rango espectral, de 283 nm a 2800 nm; es decir, desde ultravioleta hasta infrarrojo cercano.

Los piranómetros de esta serie se basan en un sensor de termopila, que es una superficie hipersensible recubierta de una pintura negro mate, no permitiendo al piranómetro ser selectivo a la hora de captar diferentes longitudes de onda; es decir, capta prácticamente todas.

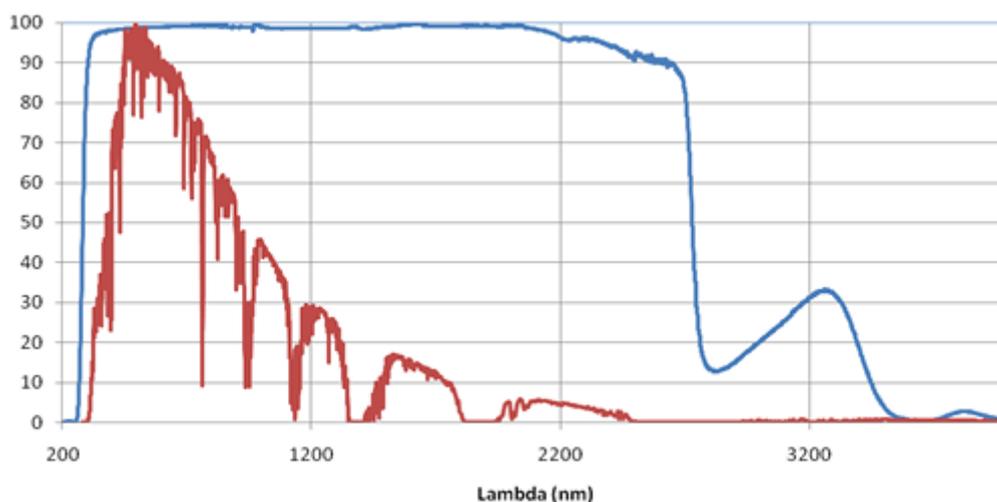
La energía que radia el sol es enteramente absorbida por la superficie de la termopila, creando una diferencia de temperatura entre el centro de la pila (*hot junction*) y el resto del cuerpo del piranómetro (*cold junction*).

Gracias al efecto Seebeck, la diferencia de temperatura entre las uniones fría y caliente se convierte en una diferencia de potencial. El efecto es que se crea un voltaje a partir de una diferencia de temperaturas entre dos conductores o semiconductores, pues los electrones se ven excitados a niveles energéticos de manera diferente dependiendo del material, provocando una diferencia de potencial en la unión de estos y, como consecuencia, se crea una corriente de cortocircuito y un campo magnético.

Además, cumple con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial y con la norma IEC 61724-1, que regula los requisitos para la monitorización de rendimiento en sistemas fotovoltaicos, validándolo como energéticamente eficiente [14].

Este piranómetro es un instrumento de alta calidad y precisión, versátil, fácil de instalar e ideal para investigaciones relaciones con los captadores solares. Su uso en ensayos como el IAM permite optimizar configuraciones gracias a sus datos confiables y perfectamente calibrados.

El sensor está protegido por dos cúpulas concéntricas de vidrio que lo aíslan térmicamente del viento, reducen su sensibilidad a la radiación térmica no desea y lo protegen del polvo [17].

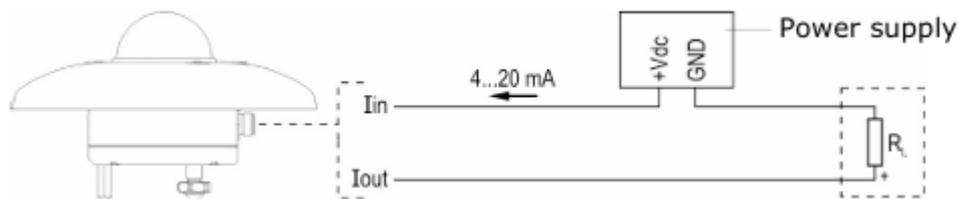


*Figura 16. Sensibilidad espectral relativa del piranómetro y espectro solar estándar [17]*

La línea roja de la Figura 16 representa la distribución real de la radiación solar que le llega a la Tierra en condiciones estándar ( $1000 \frac{W}{m^2}$ , 25°C y 1,5 atmósferas). Por otro lado, la línea azul indica cómo responde el sensor a diferentes longitudes de onda.

De esta forma, en la Figura 16 se puede observar que el piranómetro mantiene una respuesta estable y no selectiva prácticamente a lo largo de todo el espectro solar relevante, desde 250 nm hasta 2800 nm, aproximadamente.

Para que el piranómetro trabaje de manera funcional, ha de ir conectado a una fuente de alimentación cuya tensión tiene que estar entre los 10 VDC (voltios de corriente continua) y los 30 VDC. Entre el LPS020C0 y la fuente de alimentación se coloca un amperímetro con resistencia menor a igual a  $500 \Omega$  para asegurar que el sensor pueda operar correctamente incluso a 10 VDC. La conexión se puede visualizar en la Figura 17:



*Figura 17. Diagrama de conexión del piranómetro LPS020C0 [17]*



*Figura 18. Fuente de alimentación*

La Figura 18 muestra la fuente de alimentación empleada; cuyo modelo es LABPS3005 de Velleman. Es una fuente de alimentación de corriente continua controlada digitalmente.



*Figura 19. Amperímetro*

De igual manera, la Figura 19 muestra el amperímetro empleado. Concretamente es un multímetro digital, modelo G45 de la marca GEF. La función a medir será la corriente continua, con rango en miliamperios.

Continuando con la construcción de la estructura del captador, de manera similar que con el piranómetro, se construyó una estructura en el plano del panel de policarbonato sobre el que irá sujeto el reloj solar. Un reloj solar es un instrumento dotado de un fiel, que es una barra que proyecta su sombra sobre una superficie plana que posee una escala determinada, que en este caso indica el ángulo con el que incide la radiación solar al panel (o paneles). En las Figuras 20 y 21 se observa el reloj solar empleado en el proyecto:



*Figura 20. Planta del reloj solar*



*Figura 21. Lateral del reloj solar*

En este caso, se utilizó un fiel de 50 milímetros en el centro y se dibujaron seis diferentes radios correspondientes con seis diferentes ángulos sobre los que se va a medir la radiación. Se aplica trigonometría básica en un triángulo rectángulo para obtener los diferentes radios del círculo.

$$\text{Radio (mm)} = \text{Altura del fiel (mm)} * \tan \alpha$$

La altura del fiel viene determinada, 50 milímetros, y  $\alpha$  es el ángulo de incidencia solar. La Figura 13 vista anteriormente puede ser de gran ayuda para visualizar este ángulo. De esta manera, se procede al cálculo de los radios:

*Tabla 1. Cálculo de los valores de los radios del reloj solar*

Ángulo (°)	Cálculo	Radio (mm)
20°	50 * tan 20°	18,20
30°	50 * tan 30°	28,87

<b>40°</b>	$50 * \tan 40^\circ$	41,95
<b>50°</b>	$50 * \tan 50^\circ$	59,59
<b>60°</b>	$50 * \tan 60^\circ$	86,60
<b>70°</b>	$50 * \tan 70^\circ$	137,37

Siguiendo con la construcción, se empleó madera para dar sustentabilidad a toda la estructura, permitiendo su apoyo en el suelo para así poder realizar las medidas. Estas maderas se unieron al panel mediante el uso de tornillos, y entre ellas gracias a una fina varilla de aluminio, permitiendo a la estructura rotar respecto de esta.

Por último, se utilizó otra pieza de madera para unir el lateral de la estructura con la base, también de madera, mediante un tornillo y una arandela. La varilla anteriormente mencionada es la encargada de dar libertad al marco y poder rotar, pero este elemento de madera es el responsable de que el sistema actúe como un único bloque, evitando la caída al suelo del marco, y con él, los paneles.

Las Figuras 22, 23 y 24 permiten visualizar de una manera más clara la estructura.



*Figura 22. Unión del marco a madera.*



*Figura 23. Madera para evitar el contacto del panel con el suelo*



*Figura 24. Varilla*

Se realizaron pequeños agujeros a la base de madera para así poder variar el ángulo de inclinación del marco respecto del suelo y conseguir los ángulos necesarios para llevar a cabo con éxito el ensayo propuesto. Se pueden observar en las Figuras 25, 26 y 27.



*Figura 25. Lateral de la estructura*



*Figura 26. Unión entre las maderas*



*Figura 27. Alzado de la estructura*

### 3.2 IMPLEMENTACIÓN

Ya construida y montada la estructura, se procede a subir a la azotea del edificio con dirección Calle Alberto Aguilera, 25, 28015, Madrid. En las Figuras 28 y 29 se visualiza la zona de trabajo.



*Figura 28. Azotea de ICAI*



*Figura 29. Zona de trabajo*

Se adapta la colocación de la estructura para ir obteniendo la radiación que le incide al panel en función de los diferentes ángulos de medida, transversales y longitudinales, variando el acimut, el ángulo del panel respecto del suelo, o ambos al mismo tiempo. Una vez el reloj solar marca el ángulo requerido, se conecta el piranómetro a la fuente de alimentación y se esperan tres minutos para tomar la medida dada por el amperímetro, en mA. Se anota la medida y la hora a la que se ha hecho en una tabla en el programa Excel, y automáticamente nos la dará en las unidades deseadas,  $\frac{W}{m^2}$ . Esta transformación se realiza gracias al factor de conversión entre mA y  $\frac{W}{m^2}$  dado por la calibración del piranómetro. Según la ficha de calibración del piranómetro, 7,8 mA corresponden a  $475 \frac{W}{m^2}$ .

Este proceso se repite una y otra vez hasta que todas las medidas necesarias quedan anotadas de la manera más correcta y precisa posible. En caso de notar alguna medida errónea o poco intuitiva, se procede a su repetición, siempre respetando los tres minutos para garantizar que ésta sea lo más estable posible.

## Capítulo 4. RESULTADOS

Las medidas se han llevado a cabo en función de tres configuraciones de panel diferentes y en función de la variación de los ángulos de incidencia solar en dos direcciones.

Las tres configuraciones de panel son las expuestas con anterioridad:

- i) Panel único con los canales en posición vertical; es decir, sin cubierta.
- ii) Doble panel, ambos con los canales en posición vertical.
- iii) Doble panel con los canales del interno en posición vertical y los del externo, en horizontal.

Respecto a los ángulos de incidencia solar:

- i) Ángulos longitudinales:  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  y  $50^\circ$ . Se han conseguido variando la inclinación del panel respecto de su eje vertical; desde  $5^\circ$  hasta  $70^\circ$ .
- ii) Ángulos transversales:  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  y  $50^\circ$ . Estas medidas se han realizado regulando la orientación; de  $-100^\circ$  hasta  $260^\circ$  de acimut, e inclinación: de  $5^\circ$  hasta  $70^\circ$ , del captador solar empleado.

Se han realizado tres tandas diferentes de medidas. La primera en junio de 2024, la segunda en febrero de 2025 y la tercera en mayo de 2025.

Para el análisis de resultados, se presentarán todas las medidas realizadas en formato tabla, y posteriormente se presentarán en forma de gráfica, mostrando los siguientes conceptos:

- i) Cantidad de radiación absorbida. Este primer parámetro representa la eficiencia de la placa en cuanto al paso de radiación hacia el interior del captador. Una mayor radiación absorbida implica un mejor aprovechamiento de la energía solar disponible.

- ii) Pérdidas respecto a la medida sin panel (o paneles). El segundo parámetro cuantifica cuánta radiación se deja de absorber al colocar el panel (paneles) delante del piranómetro, permitiendo analizar el impacto energético al emplearlo.

Las pérdidas han sido calculadas mediante la ecuación 1.

$$E. 1 \quad \text{Pérdidas (\%)} = \frac{\text{Radiación sin panel (mA)} - \text{Radiación con panel (mA)}}{\text{Radiación sin panel (mA)}} * 100$$

- iii) Error relativo; es decir, la diferencia entre la medida teórica y la real. Este último parámetro es fundamental para valorar la fiabilidad de las mediciones; pues sirve para comparar si las diferencias observadas entre configuraciones son significativas, evitando tomar decisiones basadas en posibles errores de medida. El cálculo teórico fue calculado empleando el producto entre el valor de radiación sin el efecto del panel (paneles) para el ángulo 0° y el coseno del ángulo del que se quiere obtener el valor.

Este error ha sido calculado con la ecuación 2.

$$E. 2 \quad \text{Error relativo (\%)} = \frac{\text{Medida teórica (mA)} - \text{Medida real (mA)}}{\text{Medida teórica (mA)}} * 100$$

## 4.1 MEDIDAS DE JUNIO DE 2024

Se presentan los resultados de la primera tanda de medidas, realizada en junio de 2024 en presencia de nubes. En primer lugar, se mostrarán las medidas tomadas por el piranómetro para la configuración de panel simple. En segundo lugar, las medidas para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical. Por último, aquellas para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal.

*Tabla 2. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de panel simple, variando el ángulo longitudinal. Junio de 2024*

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin panel	13,05	794,71
	Detrás del panel	11,93	726,51
Ángulo 20 longitudinal	Sin panel	12,6	767,31
	Detrás del panel	11,69	711,89
Ángulo 30 longitudinal	Sin panel	12,17	741,12
	Detrás del panel	8,99	547,47
Ángulo 40 longitudinal	Sin panel	10,53	641,25
	Detrás del panel	8,31	506,06
Ángulo 50 longitudinal	Sin panel	8,67	527,98
	Detrás del panel	7,46	454,29

Tabla 3. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de panel simple, variando el ángulo transversal. Junio de 2024

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin panel	13,05	794,71
	Detrás del panel	11,93	726,51
Ángulo 20 transversal	Sin panel	12,12	738,08
	Detrás del panel	10,11	615,67
Ángulo 30 transversal	Sin panel	10,95	666,83
	Detrás del panel	9,06	551,73
Ángulo 40 transversal	Sin panel	10,42	634,55
	Detrás del panel	8,31	506,06
Ángulo 50 transversal	Sin panel	10,43	635,16
	Detrás del panel	8,46	515,19

Tabla 4. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical, variando el ángulo longitudinal. Junio de 2024

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin paneles	13,05	794,71
	Detrás paneles	10,78	656,47
Ángulo 20 longitudinal	Sin paneles	12,60	767,31

	Detrás paneles	10,34	629,68
Ángulo 30 longitudinal	Sin paneles	12,17	741,12
	Detrás paneles	8,67	527,98
Ángulo 40 longitudinal	Sin paneles	10,53	641,25
	Detrás paneles	8,37	509,71
Ángulo 50 longitudinal	Sin paneles	8,67	527,98
	Detrás paneles	6,64	404,36

Tabla 5. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical, variando el ángulo transversal. Junio de 2024

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin paneles	13,05	794,71
	Detrás paneles	10,78	656,47
Ángulo 20 transversal	Sin paneles	12,12	738,08
	Detrás paneles	9,79	596,19
Ángulo 30 transversal	Sin paneles	10,95	666,83
	Detrás paneles	8,20	499,36
Ángulo 40 transversal	Sin paneles	10,42	634,55
	Detrás paneles	7,93	482,92
Ángulo 50 transversal	Sin paneles	10,43	635,16
	Detrás paneles	7,85	478,04

Tabla 6. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal, variando el ángulo longitudinal. Junio de 2024

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin paneles	13,05	794,71
	Detrás paneles	11,26	685,71
Ángulo 20 longitudinal	Sin paneles	12,60	767,31
	Detrás paneles	10,21	621,76
Ángulo 30 longitudinal	Sin paneles	12,17	741,12
	Detrás paneles	8,58	522,50

Ángulo 40 longitudinal	Sin paneles	10,53	641,25
	Detrás paneles	8,02	488,40
Ángulo 50 longitudinal	Sin paneles	8,67	527,98
	Detrás paneles	6,37	387,92

Tabla 7. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal, variando el ángulo transversal. Junio de 2024

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin paneles	13,05	794,71
	Detrás paneles	11,26	685,71
Ángulo 20 transversal	Sin paneles	12,12	738,08
	Detrás paneles	10,77	655,87
Ángulo 30 transversal	Sin paneles	10,95	666,83
	Detrás paneles	8,20	499,36
Ángulo 40 transversal	Sin paneles	10,42	634,55
	Detrás paneles	9,01	548,69
Ángulo 50 transversal	Sin paneles	10,43	635,16
	Detrás paneles	7,67	467,08

A primera vista se puede observar que la medida de radiación para el mismo ángulo sin ningún obstáculo por delante es la misma para todas las configuraciones. Teóricamente, esto es correcto; sin embargo, debido a la espera de tres minutos por medida, los valores deberían cambiar levemente. En esta primera tanda se midió solo al principio, pensando que se mantendría constante, pero esto no es exactamente así, por lo que, en los futuros ensayos esta medida ha de ser tomada cada vez.

Recopilando todos los datos medidos, se elaboraron las gráficas mencionadas anteriormente para poder analizar los resultados de forma más completa.

Para las gráficas de absorción solar, se toma como valor de referencia (100%) la radiación que le incide al piranómetro perpendicularmente sin ningún obstáculo; es decir, sin panel o paneles:

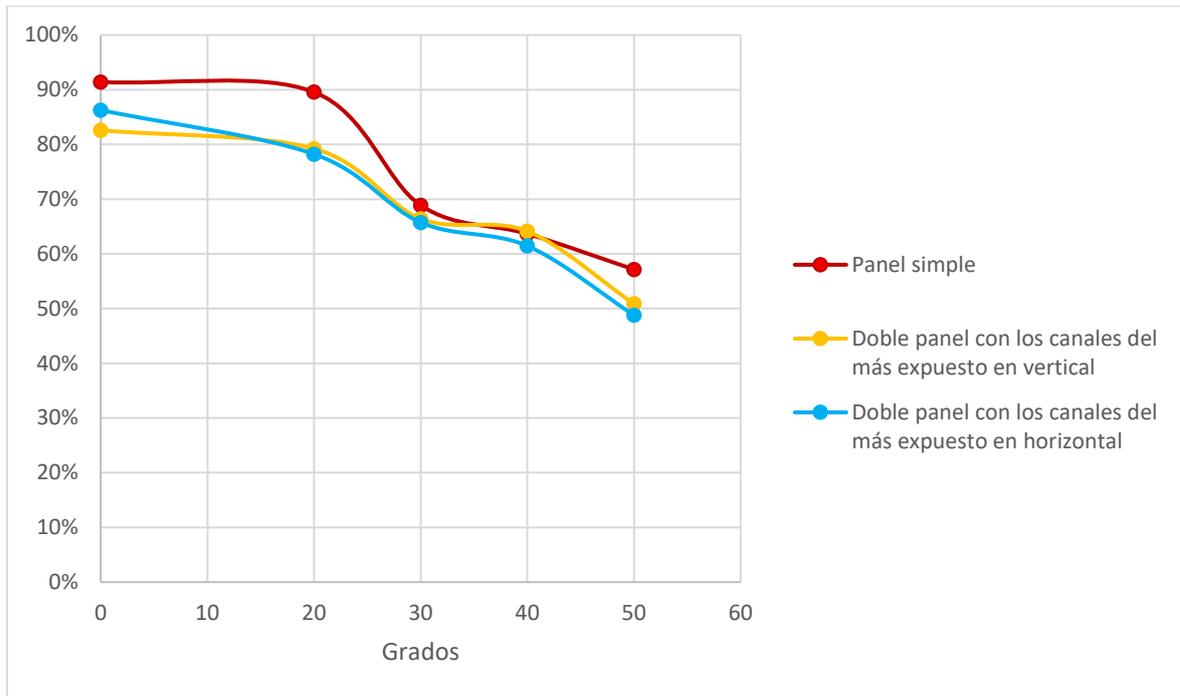


Figura 30. Absorción solar con el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales. Junio de 2024

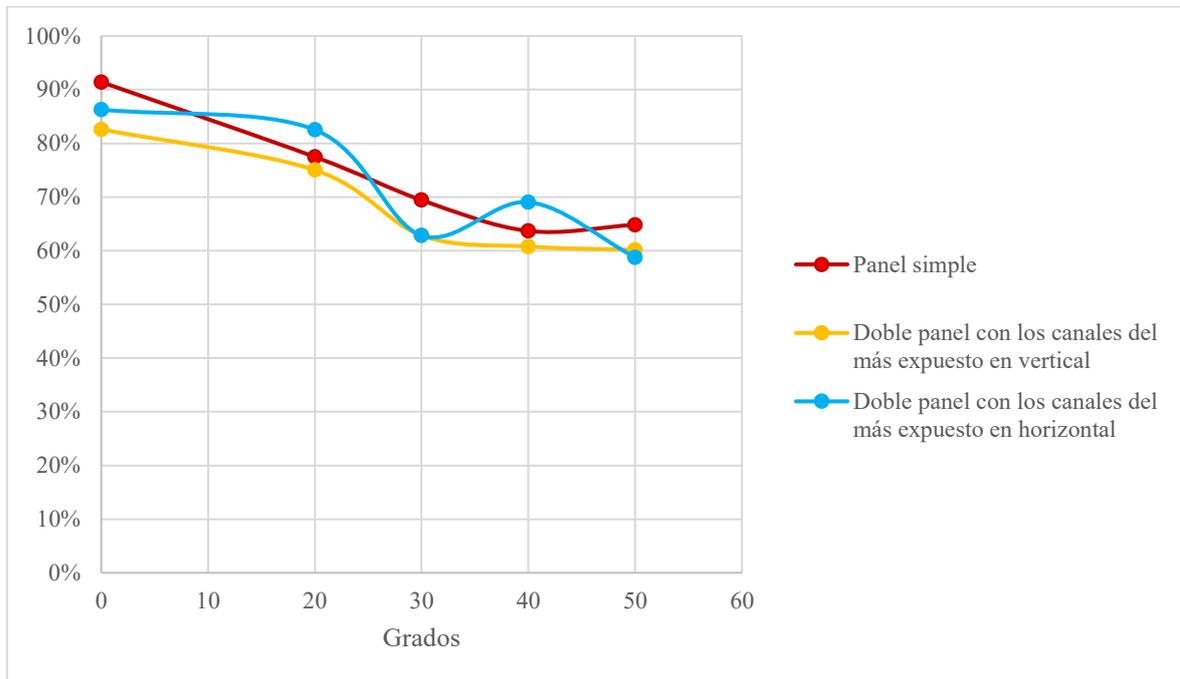


Figura 31. Absorción solar con el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales. Junio de 2024

Observando la Figura 30, absorción solar con ángulos longitudinales detrás del panel (paneles), se aprecia cómo la configuración de panel simple es la que más cantidad de radiación absorbe. Esto es bastante lógico, pues hay una relación inversamente proporcional entre la cantidad de paneles y la radiación solar absorbida por el piranómetro. Cuantos menos obstáculos haya entre el piranómetro y los rayos solares, mayor cantidad de radiación captará. En cuanto a las configuraciones con doble panel, salvo en la primera medida; rayos incidiendo perpendicularmente, en el resto, la configuración con los canales del más expuesto en posición vertical absorbe ligeramente mayor cantidad respecto a su valor de referencia.

En este caso, teóricamente, para las configuraciones de doble panel, aquella que tiene los canales del más expuesto alineados con los rayos solares; es decir, canales en vertical, debe absorber mayor radiación que si los tuviera en horizontal. Esta alineación facilita que más radiación penetre al piranómetro sin ser desviada o reflejada.

De esta manera, queda claro que, para la incidencia de ángulos longitudinales, la configuración que más radiación absorbe es la de panel simple, seguido de la de doble panel con los canales del más expuesto en posición vertical. En un último escalón quedaría la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en posición horizontal.

En cuanto a la Figura 31, absorción solar con ángulos transversales detrás del panel (paneles), se observa mayor incongruencia. No tiene sentido que la radiación absorbida por configuraciones de doble panel sea mayor que la que absorbe la de panel simple. Este fenómeno se aprecia para los ángulos  $20^\circ$  y  $40^\circ$ . Estas medidas estuvieron influenciadas, claramente, por la presencia de nubes, luego no pueden ser analizadas de una manera correcta.

Teóricamente, cuando la radiación incide de manera transversal, la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal debe absorber mayor cantidad que cuando los tiene en posición vertical. El argumento es el mismo que antes. Cuando hay incidencia transversal, si los canales están orientados de manera vertical, la radiación le llega lateralmente; mientras que, si están orientados de manera horizontal, llegan perpendicularmente. La manera de maximizar la absorción solar es intentando que la incidencia de sus rayos sea lo más perpendicular posible, minimizando pérdidas por dispersión.

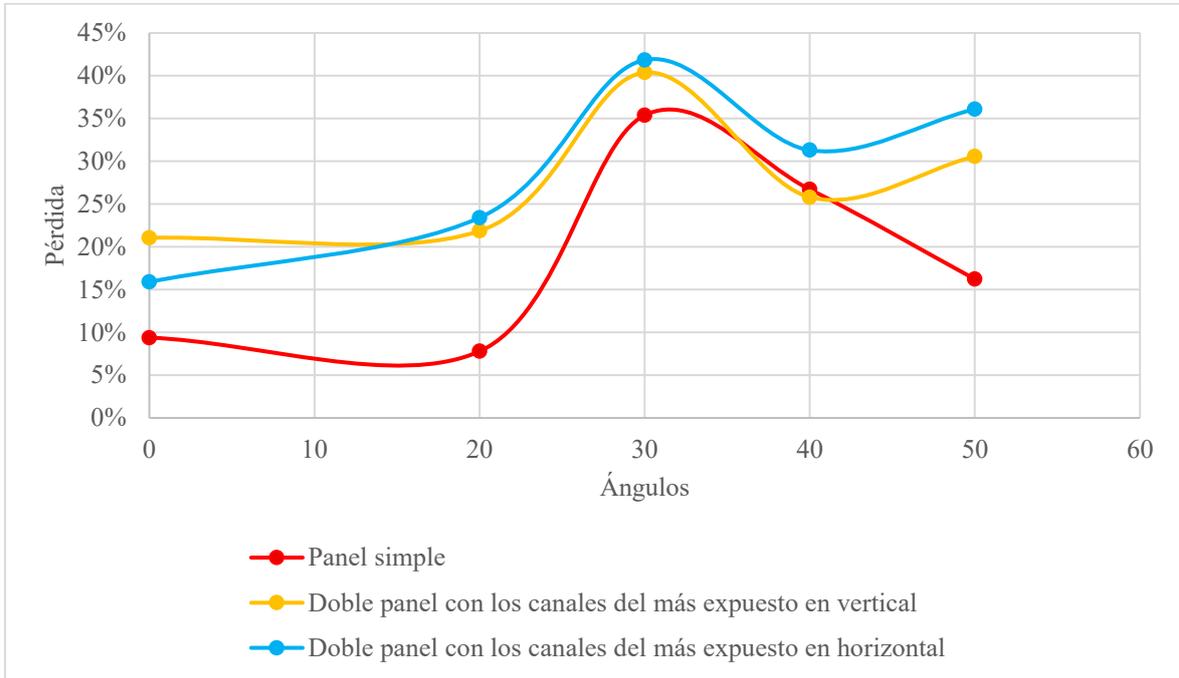


Figura 32. Pérdida respecto a las medidas sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales.  
Junio de 2024

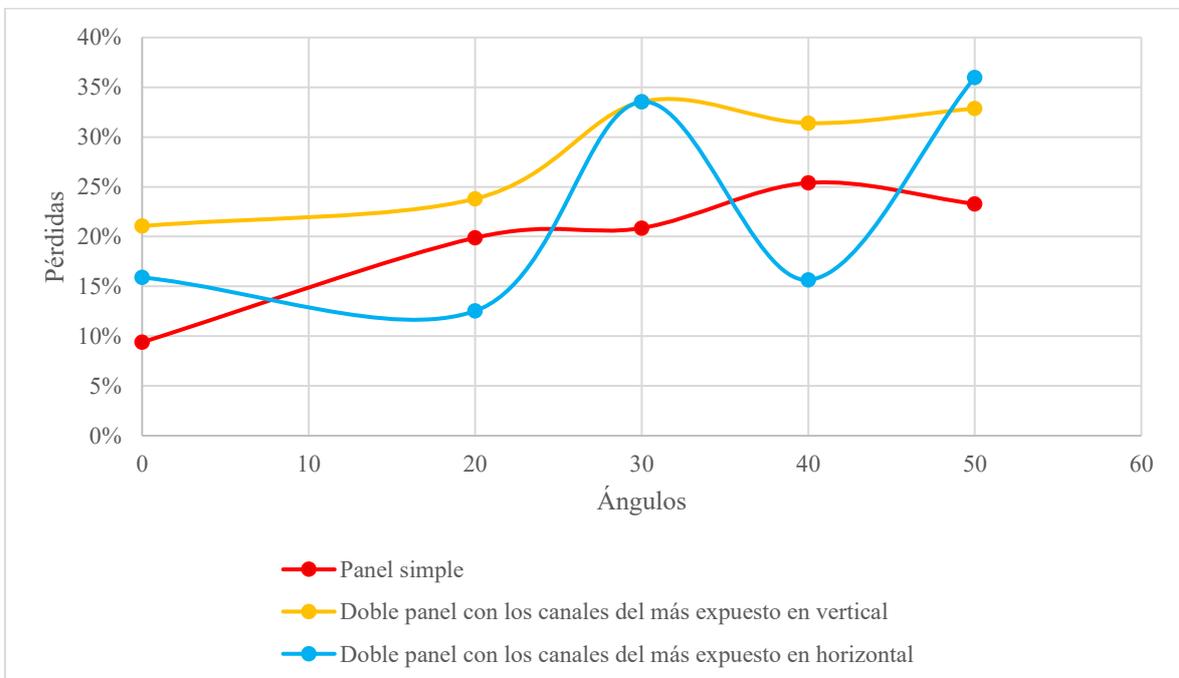


Figura 33. Pérdida respecto a las medidas sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales.  
Junio de 2024

Empezando con la Figura 32, se observa un máximo para el ángulo de 30°, llegando a tener pérdidas superiores al 40% por la acción de colocar el doble panel con los canales del más expuesto en posición horizontal. Esta gráfica corrobora que la configuración con doble panel con los canales del más expuesto en horizontal presenta unas pérdidas mayores que cualquier otra configuración.

Sin embargo, para ángulos transversales en la Figura 33, la gráfica no tiene el aspecto deseado. Sí que es cierto que la configuración con doble panel con los canales del más expuesto en vertical es la que más sufre, pero no tiene ningún sentido que el efecto de un panel único atenúe en mayor medida la radiación incidente que el efecto del doble panel. Las medidas para los ángulos 20° y 40° tienen grandes indicios de ser erróneas.

Finalmente, se muestran las gráficas de error relativo con respecto a la medida teórica.

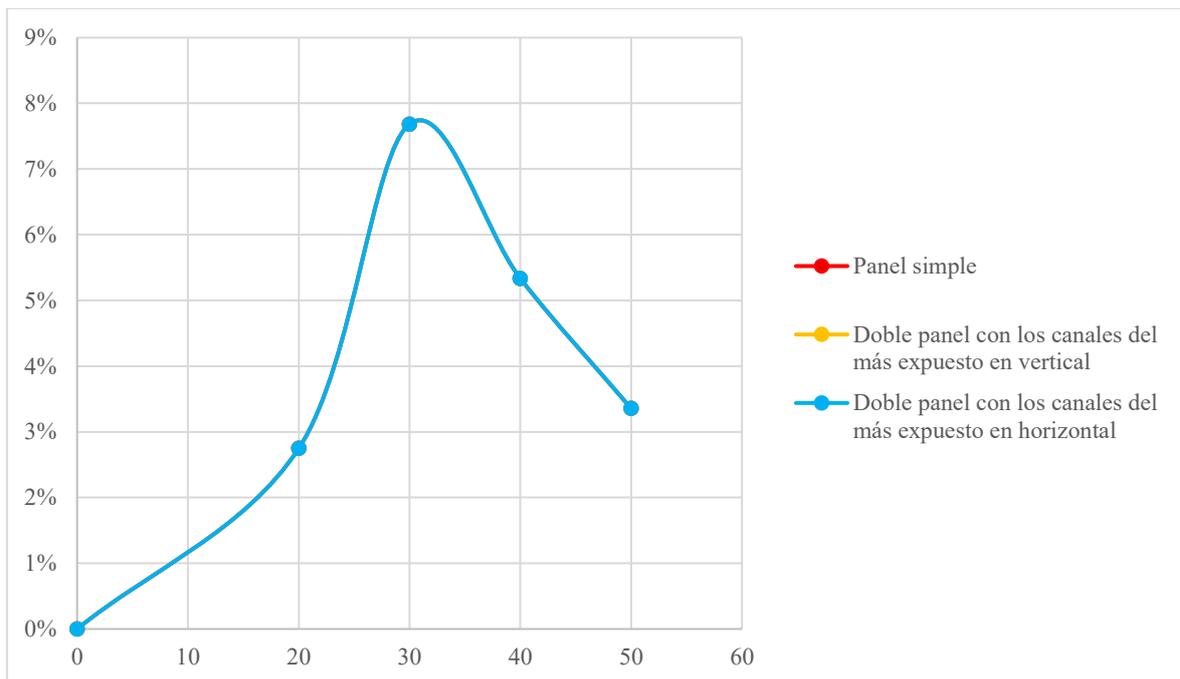


Figura 34. Error relativo variando ángulos longitudinales. Junio de 2024

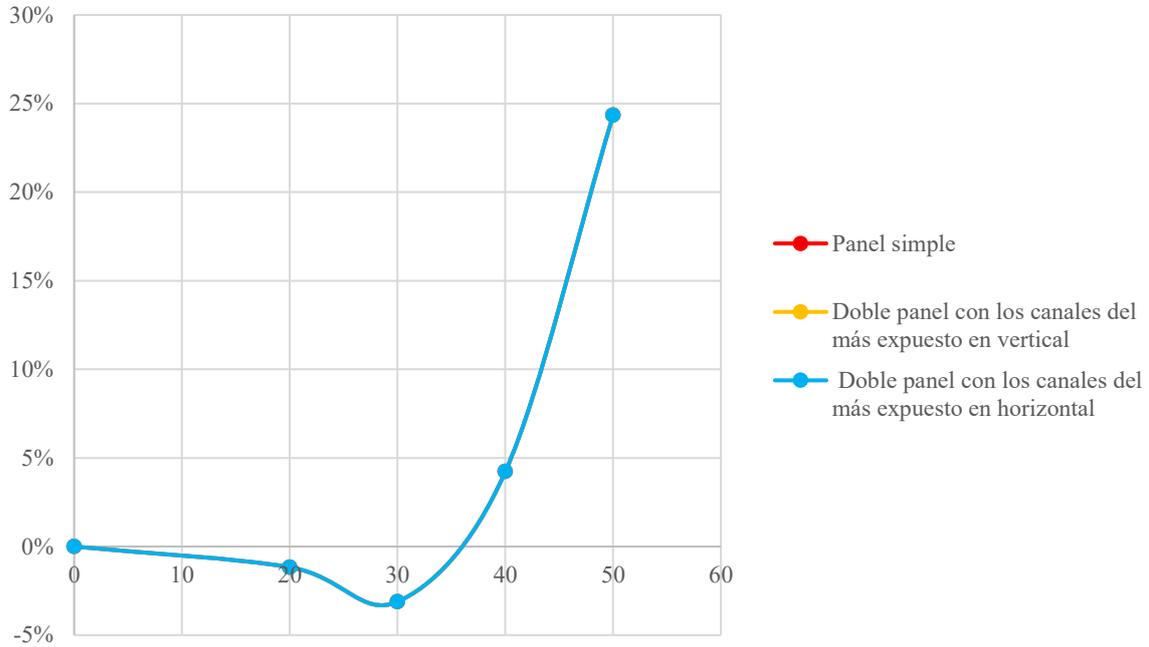


Figura 35. Error relativo variando ángulos transversales. Junio de 2024

Las Figuras 34 y 35 no tiene mucho sentido analizarlas debido a la explicación dada con anterioridad sobre la primera toma de medidas. Se asumió que el valor de la radiación incidente para cualquier ángulo captada por el piranómetro sin la presencia de ningún panel es constante, independientemente de la hora a la que se realizó la medida, de ahí que todas las configuraciones tengan el mismo error relativo.

Una vez presentados los datos de las primeras medidas llevadas a cabo en junio de 2024, se procederá a su evaluación y análisis.

## 4.2 MEDIDAS DE FEBRERO DE 2025

Se presentan las medidas tomadas en febrero de 2025. En primer lugar, se mostrarán los datos relacionados con la primera configuración; panel único. Seguidamente las de la segunda configuración; doble panel con los canales del más expuesto en vertical. Por último,

se expondrán las de la tercera configuración; doble panel con los canales del más expuesto en horizontal.

*Tabla 8. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de panel simple, variando el ángulo longitudinal. Febrero de 2025*

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin panel	13,06	795,32
	Detrás del panel	11,87	722,85
Ángulo 20 longitudinal	Sin panel	12,57	765,48
	Detrás del panel	11,72	713,72
Ángulo 30 longitudinal	Sin panel	12,68	772,18
	Detrás del panel	10,04	611,41
Ángulo 40 longitudinal	Sin panel	11,6	706,41
	Detrás del panel	8,90	541,99
Ángulo 50 longitudinal	Sin panel	9,75	593,75
	Detrás del panel	8,72	531,03

*Tabla 9. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de panel simple, variando el ángulo transversal. Febrero de 2025*

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin panel	14,17	862,92
	Detrás del panel	13,48	820,90
Ángulo 20 transversal	Sin panel	13,64	830,64
	Detrás del panel	11,11	676,57
Ángulo 30 transversal	Sin panel	12,83	781,31
	Detrás del panel	10,01	609,58
Ángulo 40 transversal	Sin panel	11,72	713,72
	Detrás del panel	9,63	586,44
Ángulo 50 transversal	Sin panel	10,38	632,11
	Detrás del panel	8,50	517,63

Tabla 10. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical, variando el ángulo longitudinal. Febrero de 2025

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin paneles	14,10	858,65
	Detrás paneles	12,29	748,43
Ángulo 20 longitudinal	Sin paneles	12,82	780,71
	Detrás paneles	10,88	662,56
Ángulo 30 longitudinal	Sin paneles	12,13	738,69
	Detrás paneles	9,69	590,10
Ángulo 40 longitudinal	Sin paneles	11,12	677,18
	Detrás paneles	8,00	487,18
Ángulo 50 longitudinal	Sin paneles	10,00	608,97
	Detrás paneles	7,86	478,65

Tabla 11. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical, variando el ángulo transversal. Febrero de 2025

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin paneles	14,14	861,09
	Detrás paneles	12,14	739,29
Ángulo 20 transversal	Sin paneles	13,55	825,16
	Detrás paneles	10,20	621,15
Ángulo 30 transversal	Sin paneles	12,84	781,92
	Detrás paneles	9,70	590,71
Ángulo 40 transversal	Sin paneles	11,48	699,10
	Detrás paneles	8,86	539,55
Ángulo 50 transversal	Sin paneles	10,12	616,28
	Detrás paneles	7,80	475,00

Tabla 12. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal, variando el ángulo longitudinal. Febrero de 2025

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin paneles	13,62	829,42
	Detrás paneles	11,26	685,71
Ángulo 20 longitudinal	Sin paneles	12,99	791,06
	Detrás paneles	11,62	707,63
Ángulo 30 longitudinal	Sin paneles	12,17	741,12
	Detrás paneles	9,34	568,78
Ángulo 40 longitudinal	Sin paneles	11,25	685,10
	Detrás paneles	8,15	496,31
Ángulo 50 longitudinal	Sin paneles	10,06	612,63
	Detrás paneles	8,30	505,45

Tabla 13. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal, variando el ángulo transversal. Febrero de 2025

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin paneles	13,62	829,42
	Detrás paneles	12,44	757,56
Ángulo 20 transversal	Sin paneles	13,76	837,95
	Detrás paneles	10,51	640,03
Ángulo 30 transversal	Sin paneles	12,82	780,71
	Detrás paneles	8,84	538,33
Ángulo 40 transversal	Sin paneles	11,89	724,07
	Detrás paneles	9,60	584,62
Ángulo 50 transversal	Sin paneles	10,26	624,81
	Detrás paneles	7,36	448,21

Al contrario que en la primera tanda, en esta segunda sí se han medido a diferentes horas los valores de radiación captados por el piranómetro sin la presencia de ningún obstáculo. Como ya se ha mencionado, estos valores han de coincidir teóricamente, pero en la práctica se va a mostrar que varían sensiblemente, de igual manera que la intensidad solar; no incide con la misma fuerza a las 12:23 que a las 13:01, por ejemplo.

De igual manera que con la anterior tanda, se elaboraron gráficas de la absorción solar, de pérdidas respecto a la medida sin panel (o sin paneles) y otra en la que se muestra el error relativo con respecto a las medidas teóricas.

Para las gráficas de absorción solar, se toma como valor de referencia (100%) la radiación que le incide al piranómetro perpendicularmente sin ningún obstáculo; es decir, sin panel o paneles:

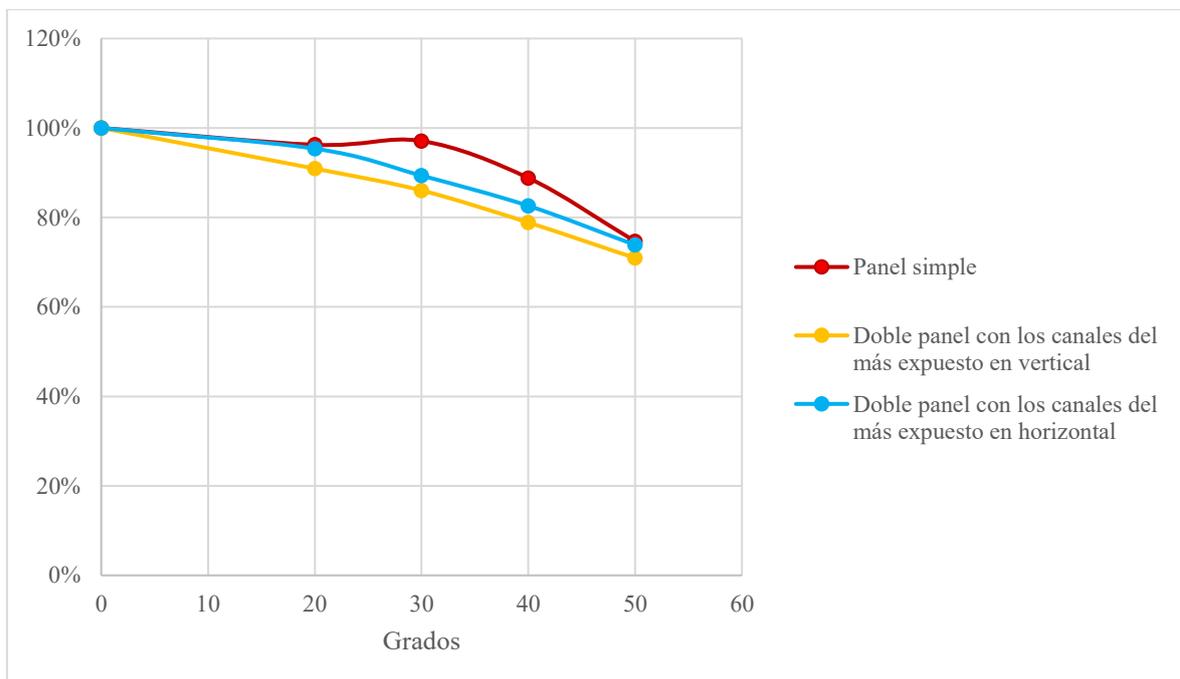
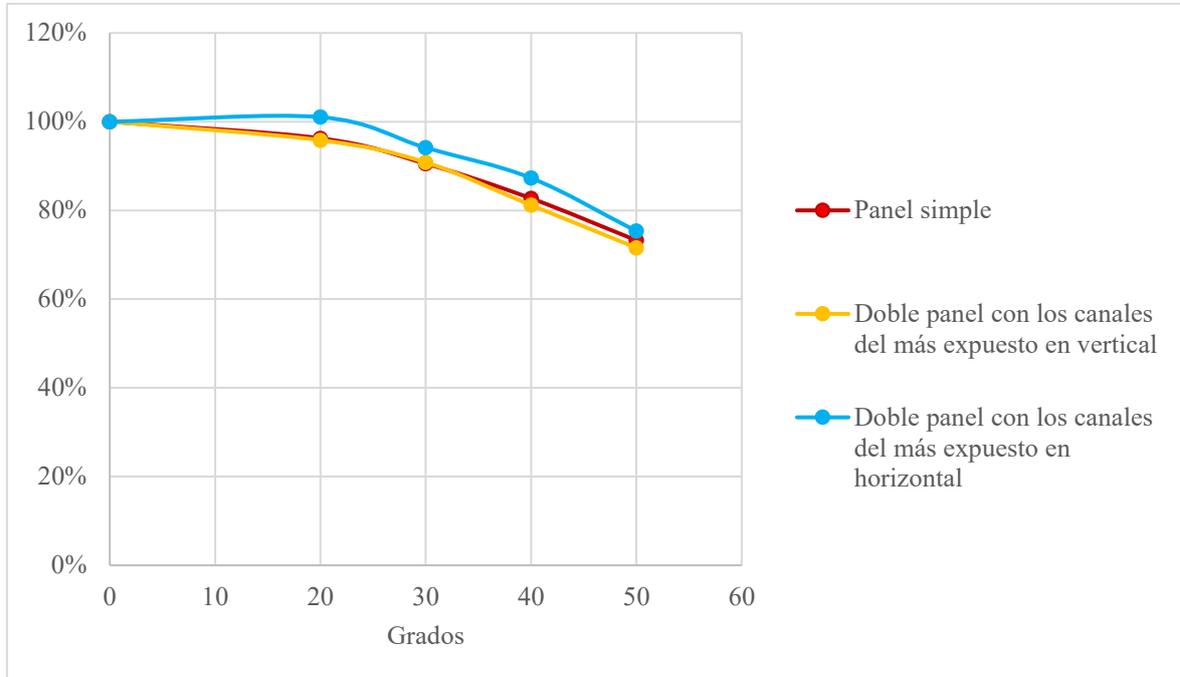


Figura 36. Absorción solar sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales. Febrero de 2025

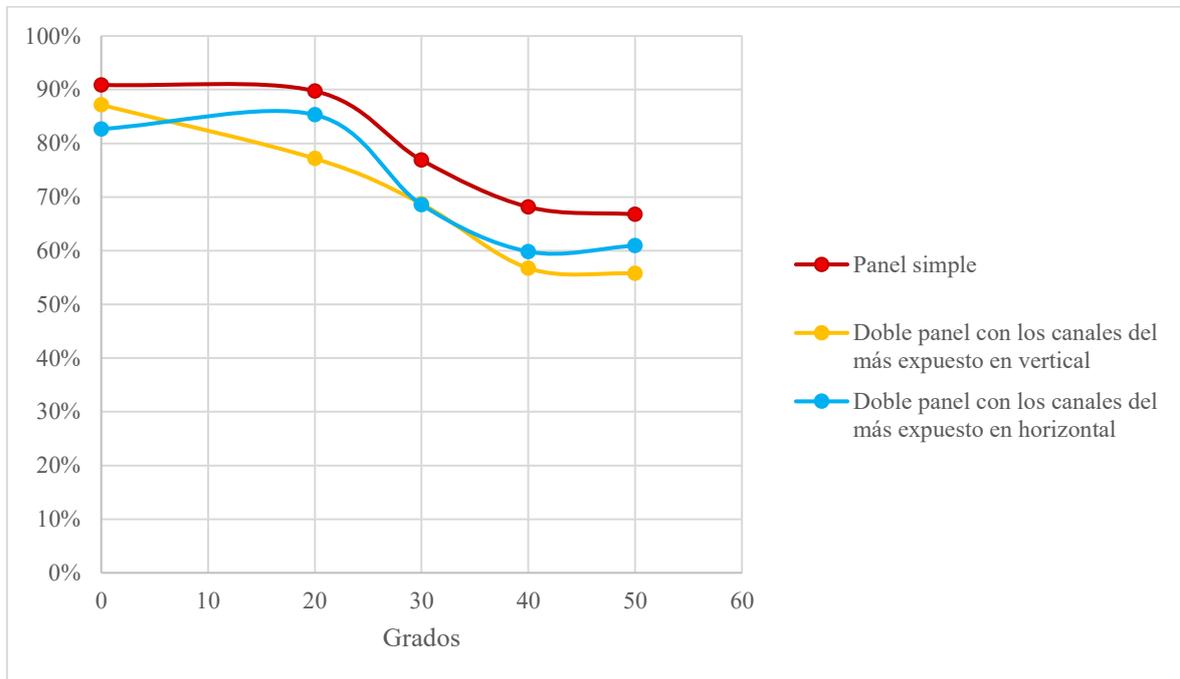


*Figura 37. Absorción solar sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales. Febrero de 2025*

Las Figuras 36 y 37 se ilustran para comprobar y, en mayor medida, garantizar la validez de las medidas. Representan la absorción solar sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales y transversales, respectivamente.

Al no haber presencia de ningún obstáculo delante del piranómetro, las tres curvas han de presentar la misma forma. Como los valores reales no pueden ser los mismos, pues no se ha tenido la posibilidad de medir al mismo tiempo los valores para las tres configuraciones, se han normalizado.

De esta manera, se puede concluir que las medidas realizadas en febrero de 2025 no son del todo relevantes, pues se aprecia una grave discordancia en los ángulos 30° y 40° longitudinales en la Figura 36 y en los ángulos 20°, 30° y 40° transversales en la Figura 37.

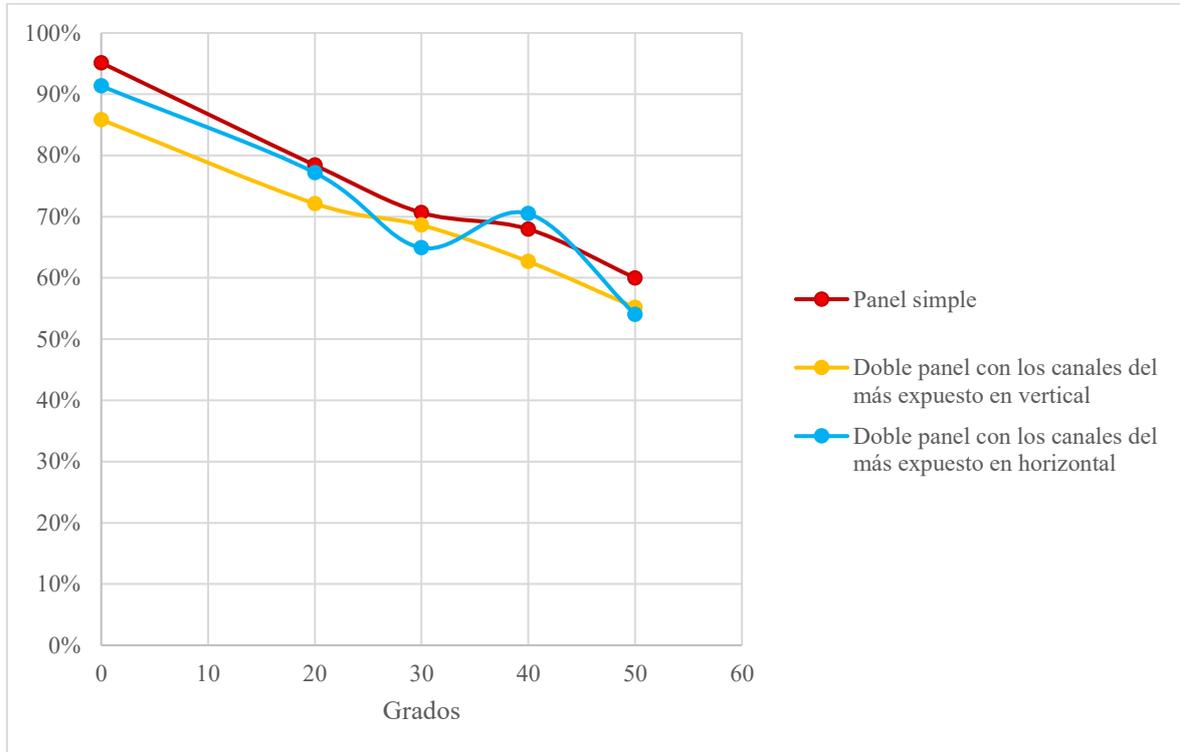


*Figura 38. Absorción solar con el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales. Febrero de 2025*

Visualizando la Figura 38, que representa la absorción solar detrás del panel (paneles) variando los ángulos longitudinales, se aprecia cómo la configuración de panel simple es la que más radiación absorbe. Coincidiendo con la explicación dada en la Sección 4.1, a menor número de obstáculos entre el piranómetro y los rayos solares, mayor radiación captará.

Como también se ha explicado en la Sección 4.1, las configuraciones que tienen los canales del panel más expuesto alineados con los rayos solares son las que deben absorber mayor radiación; pues esta incide de una manera más perpendicular sobre las paredes internas del canal recorriendo una trayectoria mucho más directa, reduciendo las pérdidas por reflexión interna.

Sin embargo, esta noción teórica sólo se cumple para el ángulo inicial,  $0^\circ$ , luego estas medidas no son del todo significativas.



*Figura 39. Absorción solar con el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales. Febrero de 2025*

En cuanto a la absorción solar bajo el efecto del panel (paneles) variando los ángulos transversales marcada por la Figura 39, se perciben dos medidas claramente erróneas; la asociada al ángulo 30°, pues la absorción para ángulos transversales con configuración de doble panel con los canales del más expuesto en posición vertical no puede ser mayor a la que tiene los canales del más expuesto en posición horizontal, y la del ángulo 40°, pues la radiación captada por el piranómetro para cualquier configuración de doble panel no puede ser mayor a la de panel único.

Las pérdidas mostradas en las Figuras 40 y 41 se calcularon empleando la ecuación E. 1:

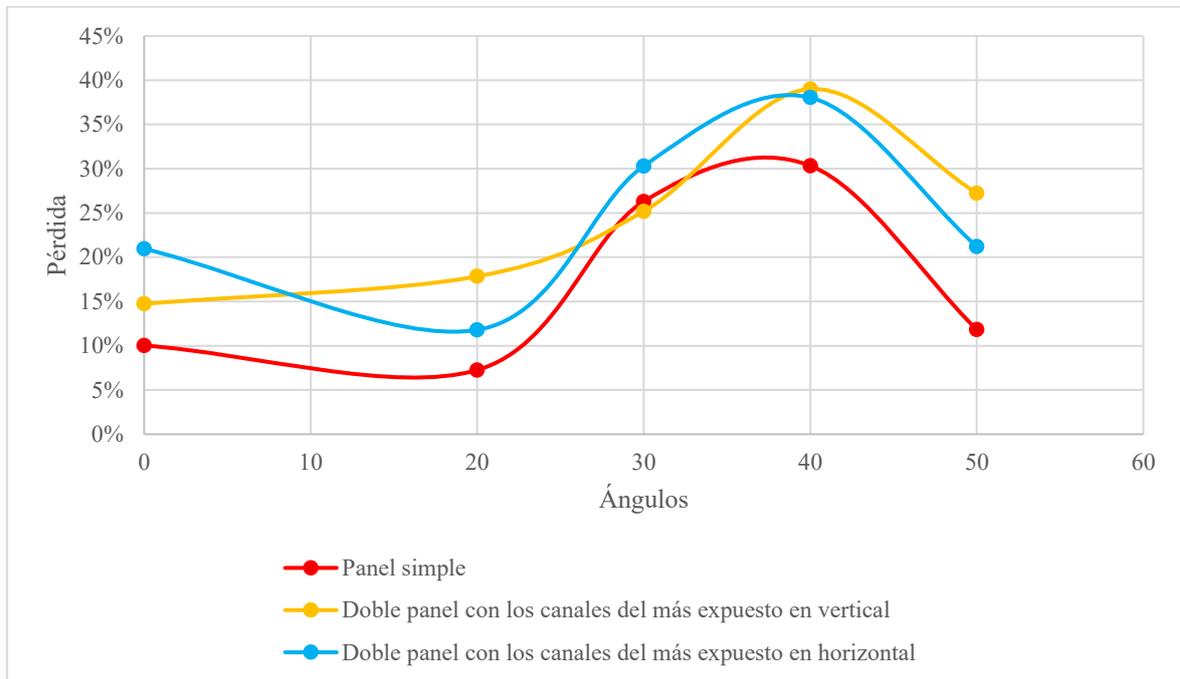


Figura 40. Pérdida respecto a las medidas sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales.  
Febrero de 2025

La gráfica propuesta por la Figura 40 resulta congruente con la de la Figura 36 explicada con anterioridad. Se observa que la configuración con panel único es la que menor pérdidas refleja, mientras que las configuraciones con doble panel se van alternando. Para los ángulos  $0^\circ$  y  $30^\circ$  las mayores pérdidas las registra la configuración con doble panel con los canales del más expuesto en posición horizontal, siendo esta misma la que también presenta menor absorción solar. En cambio, para  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  y  $50^\circ$ , las mayores pérdidas corresponden con la disposición de doble panel con los canales del más expuesto en posición vertical, también coincidiendo con la menor absorción solar.

Aunque las medidas no sean del todo correctas, hay una clara relación entre las diferentes gráficas propuestas.

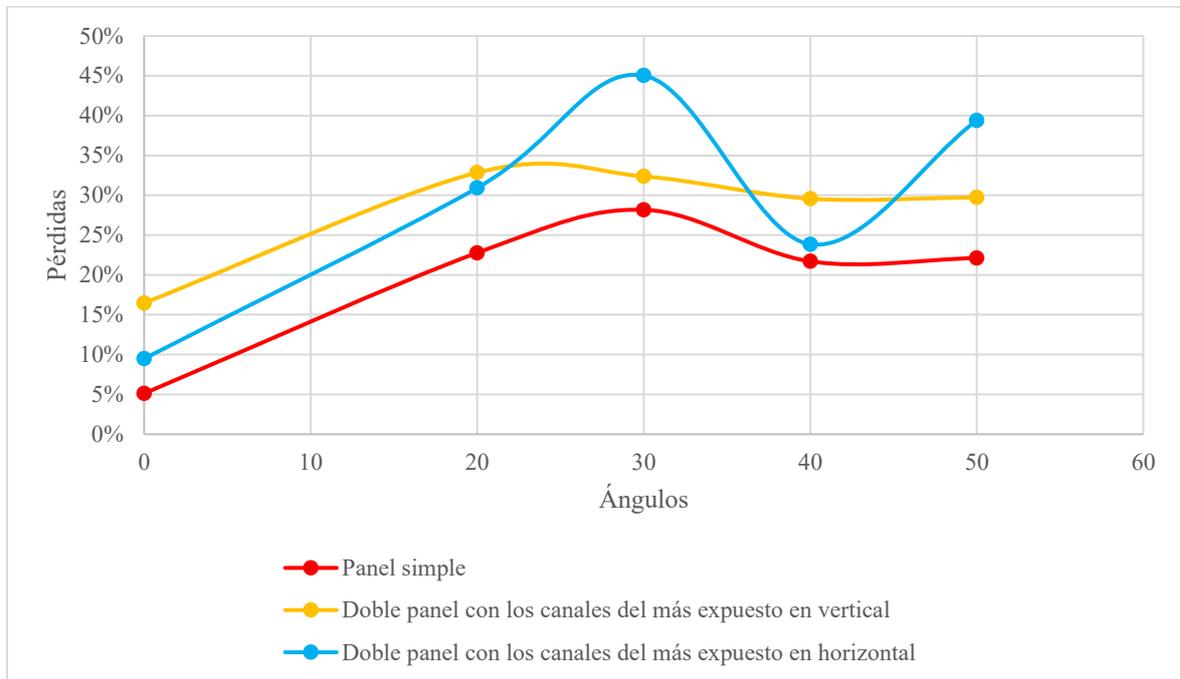


Figura 41. Pérdida respecto a las medidas sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales.

Febrero de 2025

Empleando un análisis similar al establecido con la Figura 40, la Figura 41 también presenta una correcta relación con la Figura 37. Salvando las medidas para los ángulos transversales de 30° y 50°, el resto parece guardar una semejanza con la realidad, pues para las disposiciones en las que se varía el ángulo transversal, la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en posición horizontal presenta menores pérdidas que su homólogo con los canales en vertical al tener sus canales alineados con la radiación solar.

Para ilustrar el error relativo, se utilizó la ecuación E. 2:

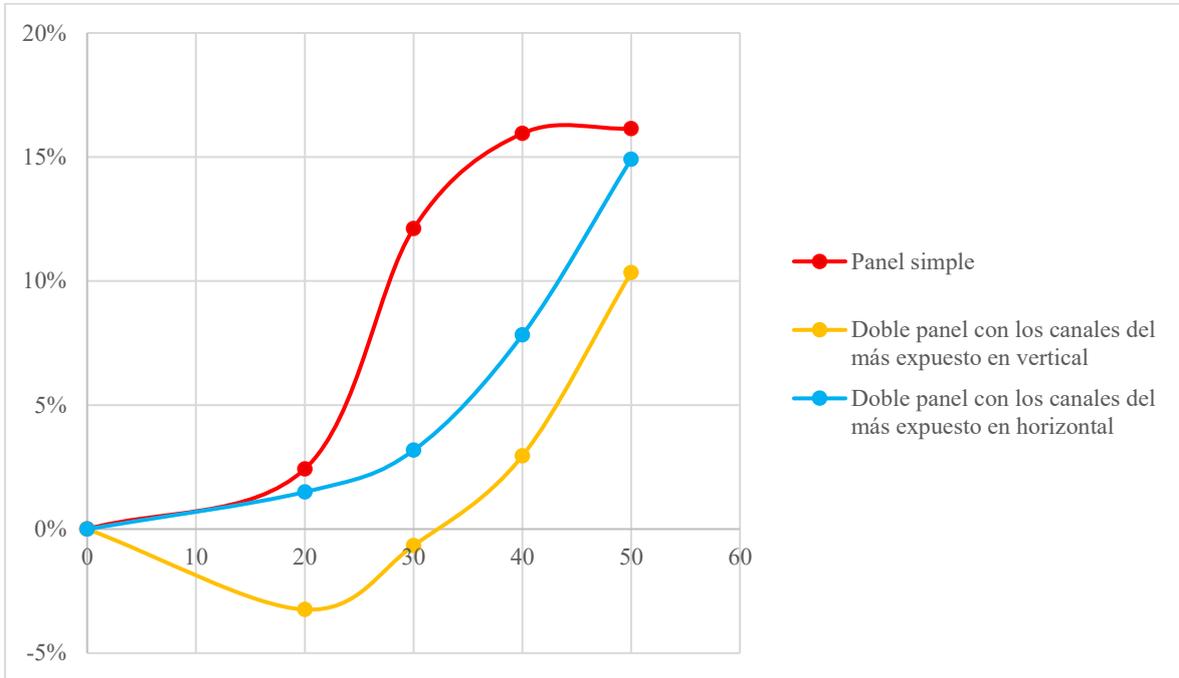


Figura 42. Error relativo variando ángulos longitudinales. Febrero de 2025

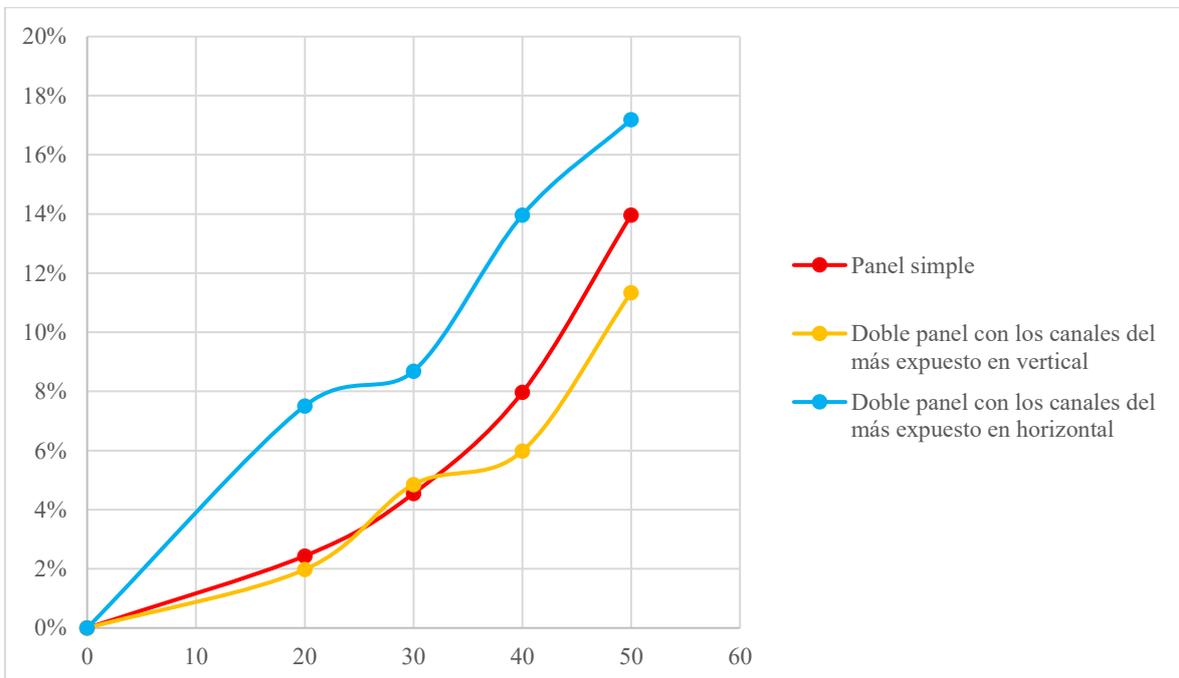


Figura 43. Error relativo variando ángulos transversales. Febrero de 2025

Las Figuras 42 y 43 representa el error entre la medida real y teórica sin la presencia de ningún obstáculo entre el piranómetro y la radiación solar variando los ángulos longitudinales y transversales, respectivamente. El análisis de ambas figuras va de la mano con el previamente realizado para las Figuras 36 y 37. Las tres curvas deberían tener la misma forma, pues se está midiendo lo que se pierde respecto a la medida teórica; sin la presencia de ningún panel (paneles). Las curvas que representan el error relativo para ángulos transversales guardan una mayor concordancia que en las que se varían los longitudinales, pero nuevamente se concluye que estas medidas no son totalmente relevantes.

### 4.3 MEDIDAS DE MAYO DE 2025

Se presentan los resultados de la tercera tanda de medidas, realizada en mayo de 2025. Primeramente, se facilitarán las medidas tomadas para la configuración de panel simple. En segundo lugar, las medidas para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical. Finalmente, aquellas para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal.

*Tabla 14. Radiación captada por el piranómetro para la configuración panel simple, variando el ángulo longitudinal. Mayo de 2025*

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin panel	14,07	856,83
	Detrás del panel	11,58	705,19
Ángulo 20 longitudinal	Sin panel	13,45	819,07
	Detrás del panel	11,98	729,55
Ángulo 30 longitudinal	Sin panel	12,77	777,66
	Detrás del panel	11,70	712,50
Ángulo 40 longitudinal	Sin panel	11,76	716,15
	Detrás del panel	9,98	607,76
Ángulo 50 longitudinal	Sin panel	10,98	668,65
	Detrás del panel	8,87	540,16

*Tabla 15. Radiación captada por el piranómetro para la configuración panel simple, variando el ángulo transversal. Mayo de 2025*

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin panel	14,14	861,09
	Detrás del panel	10,59	644,90
Ángulo 20 transversal	Sin panel	13,4	816,03
	Detrás del panel	10,59	644,90
Ángulo 30 transversal	Sin panel	12,47	759,39
	Detrás del panel	9,80	596,79

Ángulo 40 transversal	Sin panel	11,77	716,76
	Detrás del panel	9,80	596,79
Ángulo 50 transversal	Sin panel	10,91	664,39
	Detrás del panel	9,12	555,38

Tabla 16. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical, variando el ángulo longitudinal. Mayo de 2025

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin paneles	14,24	867,18
	Detrás paneles	11,17	680,22
Ángulo 20 longitudinal	Sin paneles	13,88	845,26
	Detrás paneles	9,69	590,10
Ángulo 30 longitudinal	Sin paneles	12,82	780,71
	Detrás paneles	10,05	612,02
Ángulo 40 longitudinal	Sin paneles	11,81	719,20
	Detrás paneles	8,93	543,81
Ángulo 50 longitudinal	Sin paneles	10,64	647,95
	Detrás paneles	8,10	493,27

Tabla 17. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en vertical, variando el ángulo transversal. Mayo de 2025

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin paneles	13,99	851,96
	Detrás paneles	10,53	641,25
Ángulo 20 transversal	Sin paneles	13,10	797,76
	Detrás paneles	10,07	613,24
Ángulo 30 transversal	Sin paneles	12,6	767,31
	Detrás paneles	10,27	625,42
Ángulo 40 transversal	Sin paneles	11,95	727,72
	Detrás paneles	8,71	530,42
Ángulo 50 transversal	Sin paneles	10,46	636,99
	Detrás paneles	7,81	475,61

Tabla 18. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal, variando el ángulo longitudinal. Mayo de 2025

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin paneles	14,11	859,26
	Detrás paneles	10,30	627,24
Ángulo 20 longitudinal	Sin paneles	13,76	837,95
	Detrás paneles	10,81	658,30
Ángulo 30 longitudinal	Sin paneles	12,89	784,97
	Detrás paneles	9,49	577,92
Ángulo 40 longitudinal	Sin paneles	11,73	714,33
	Detrás paneles	9,33	568,17
Ángulo 50 longitudinal	Sin paneles	10,69	650,99
	Detrás paneles	7,74	471,35

Tabla 19. Radiación captada por el piranómetro para la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal, variando el ángulo transversal. Mayo de 2025

		Intensidad (mA)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )
Ángulo 0	Sin paneles	13,94	848,91
	Detrás paneles	12,21	743,56
Ángulo 20 transversal	Sin paneles	13,48	820,90
	Detrás paneles	11,37	692,40
Ángulo 30 transversal	Sin paneles	12,61	767,92
	Detrás paneles	10,16	618,72
Ángulo 40 transversal	Sin paneles	11,56	703,97
	Detrás paneles	9,19	559,65
Ángulo 50 transversal	Sin paneles	10,30	627,24
	Detrás paneles	7,31	445,16

De manera contraria a la primera tanda, y similar a la segunda, en esta tercera también se han medido a diferentes horas los valores de radiación captados por el piranómetro sin la presencia de ningún obstáculo.

Siguiendo con el formato del trabajo, se elaboraron gráficas de la absorción solar, de pérdidas respecto a la medida sin panel (o sin paneles) y otra en la que se muestra el error relativo con respecto a las medidas teóricas.

Para las gráficas de absorción solar, se toma como valor de referencia (100%) la radiación que le incide al piranómetro perpendicularmente sin ningún obstáculo; es decir, sin panel o paneles:

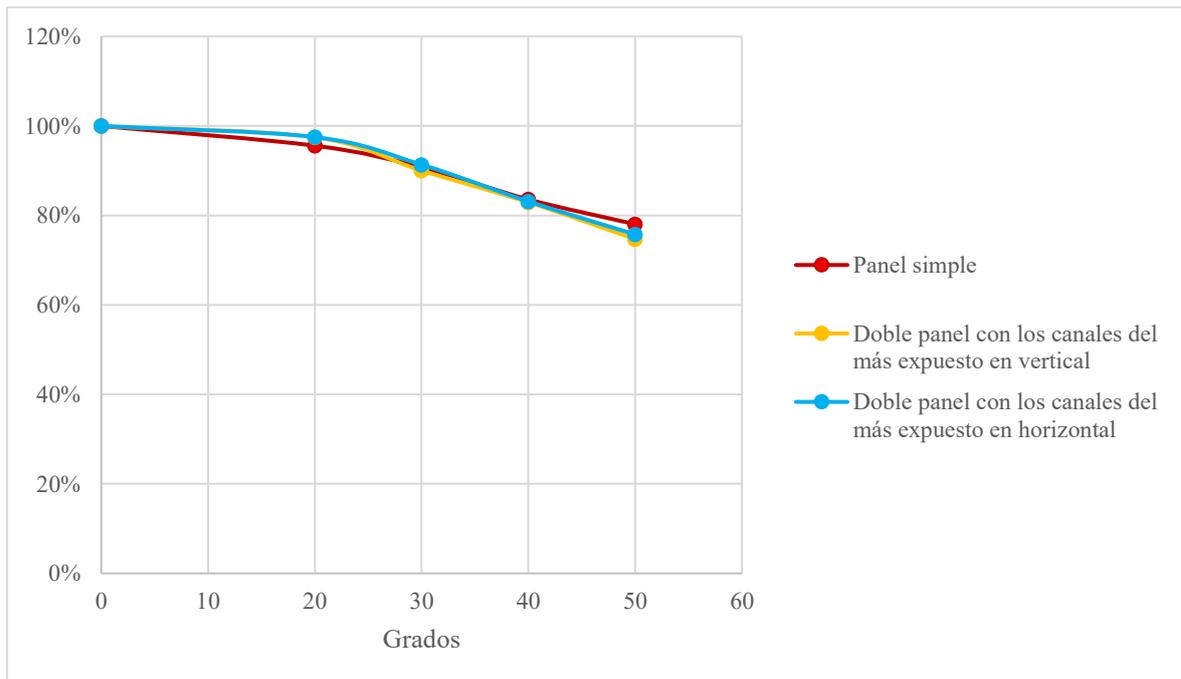


Figura 44. Absorción solar sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales. Mayo de 2025

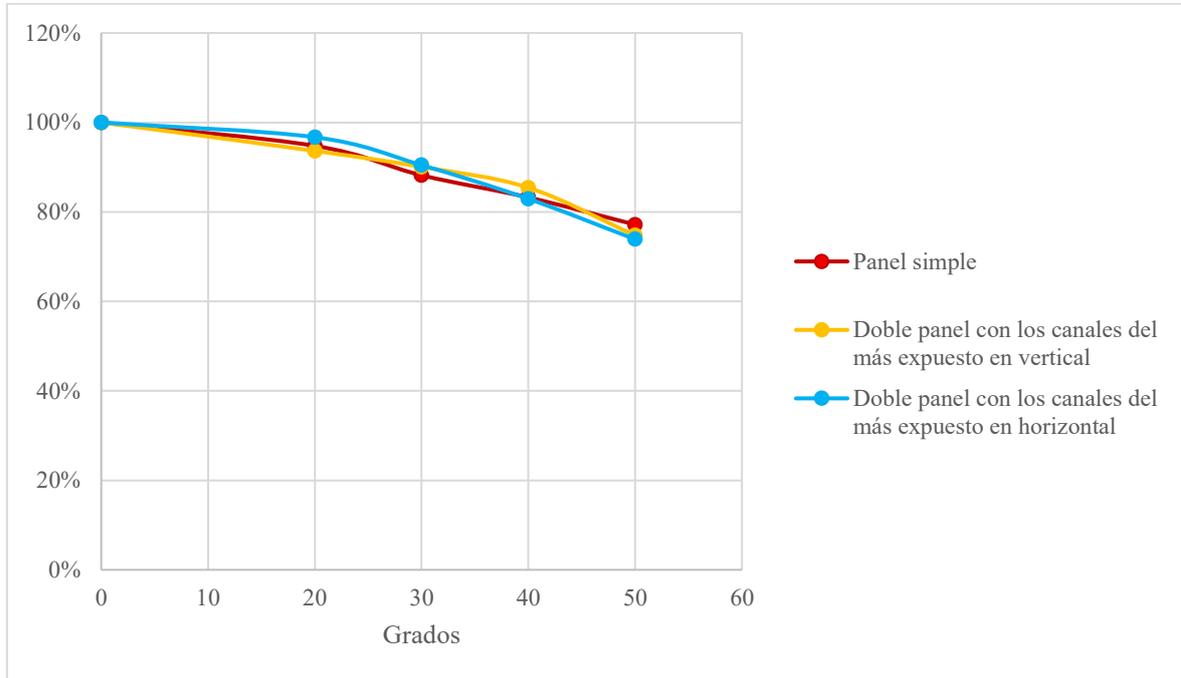


Figura 45. Absorción solar sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales. Mayo de 2025

Contrariamente a los casos analizados en la Sección 4.1 y la Sección 4.2, observando las Figuras 44 y 45 se deduce la relevancia de estas medidas. Al estar los valores normalizados y no haber presencia de ningún obstáculo delante del piranómetro, las tres curvas han de tener la misma forma y valores; y la tienen.

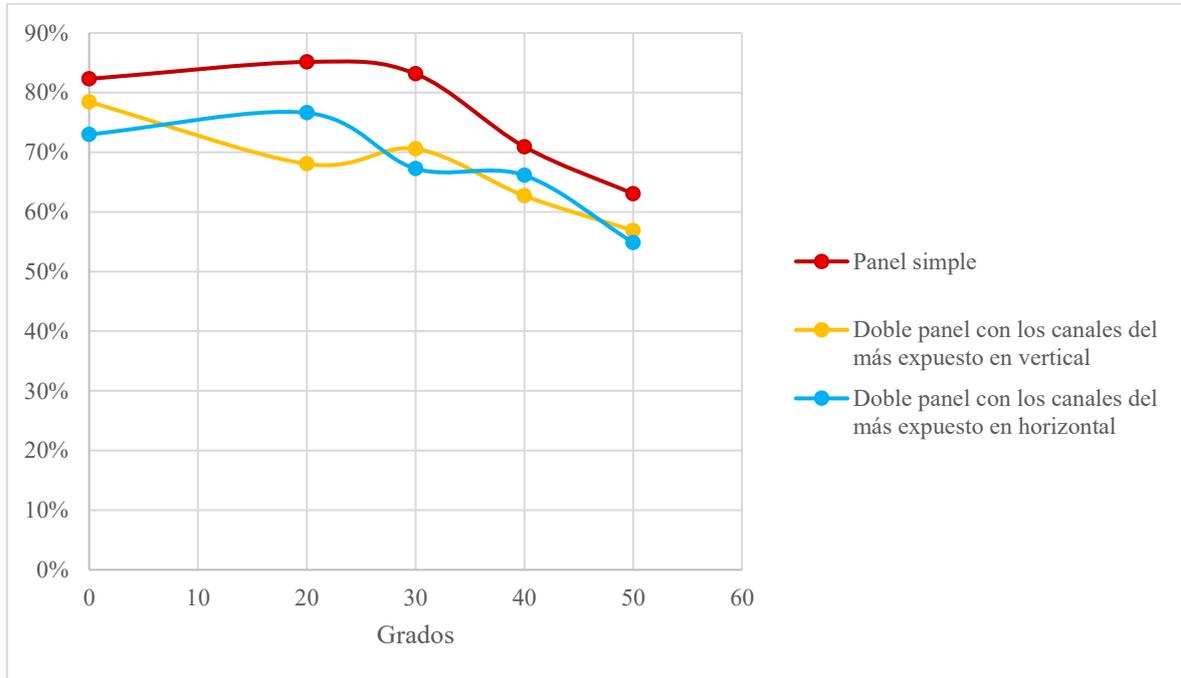


Figura 46. Absorción solar con el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales. Mayo de 2025

Salvo las medidas asociadas a los ángulos  $20^\circ$  y  $40^\circ$  en la Figura 46, que manifiesta la absorción solar detrás del panel (paneles) variando los ángulos longitudinales, el resto cumple con la teoría. La configuración con panel simple destaca sobre las de panel doble, y en cuanto a estas, en su mayoría, la configuración con los canales del más expuesto en posición vertical absorbe mayor cantidad de radiación solar que si los tuviera en horizontal, pues tiene sus canales alineados con los rayos solares.

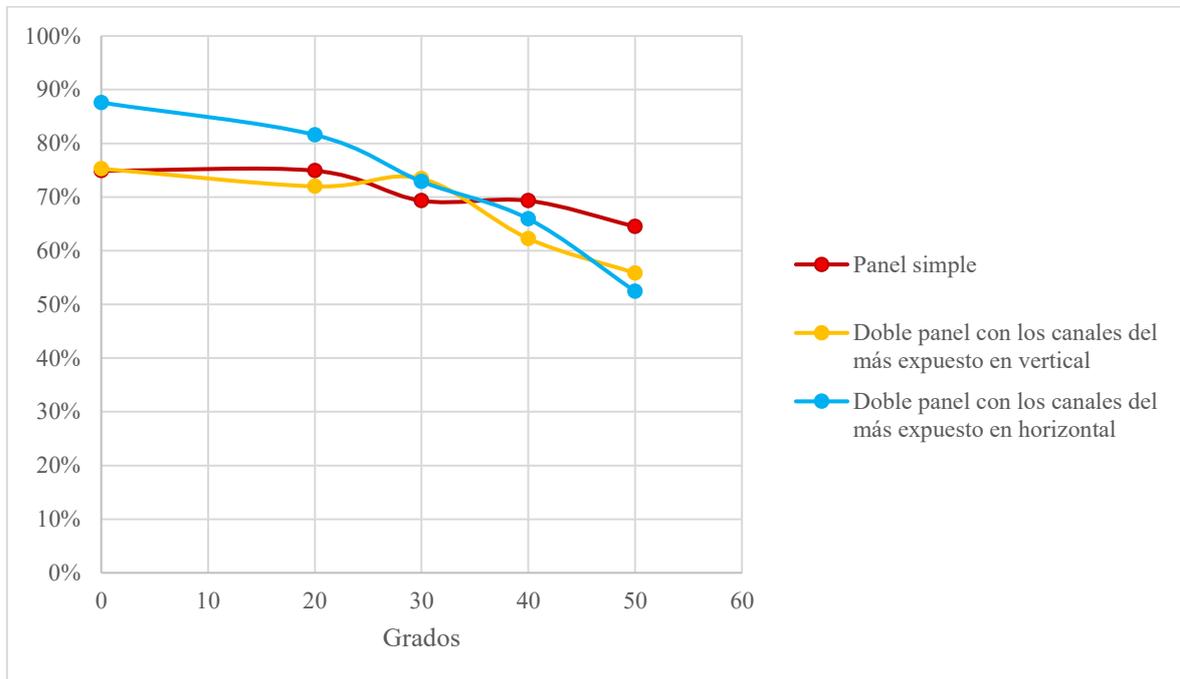


Figura 47. Absorción solar con el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales. Mayo de 2025

A primera vista se deduce la falta de coherencia en los resultados obtenidos. Para el ángulo 30° transversal, la configuración más simple es la que menor cantidad de radiación absorbe. Además, la caída que presenta a lo largo del incremento de ángulo se estima en menos de un 10%; realmente poco, ilógico. Por otro lado, la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en posición horizontal empieza siendo la que más radiación absorbe y acaba siendo la que menos, cayendo de un 88% hasta un 52%; demasiado, ilógico.

En definitiva, de todas las medidas que se han analizado, las correspondientes con la Figura 47 son las peores, pues no tienen sentido alguno.

Las pérdidas ilustradas en las Figuras 48 y 49 se obtuvieron con la ecuación E. 1:

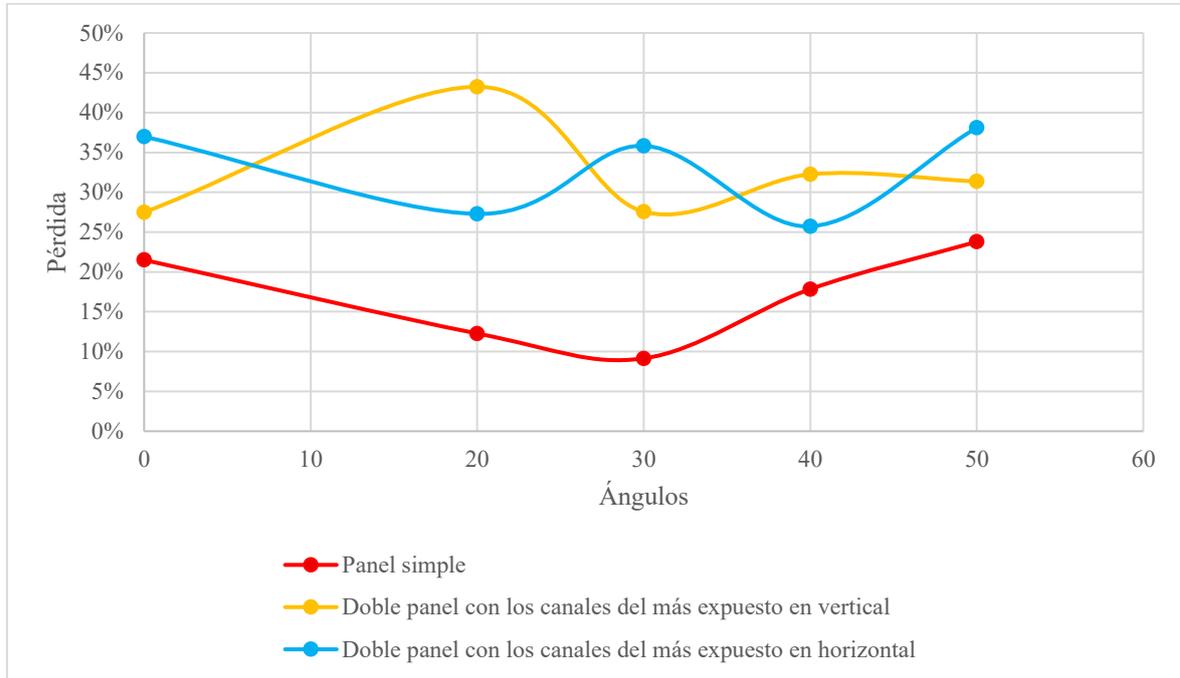


Figura 48. Pérdida respecto a las medidas sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos longitudinales.  
Mayo de 2025

Al igual que en la Figura 46, salvando los datos asociados a los ángulos 20° y 40°, el resto guardan una buena concordancia. Como ya se ha mencionado varias veces con anterioridad, para ángulos longitudinales, la configuración de doble panel con los canales del más expuesto en horizontal debe ser la que más sufre, pues sus canales más externos no están alineados con la radiación incidente, aumenta así sus pérdidas por reflexión interna.

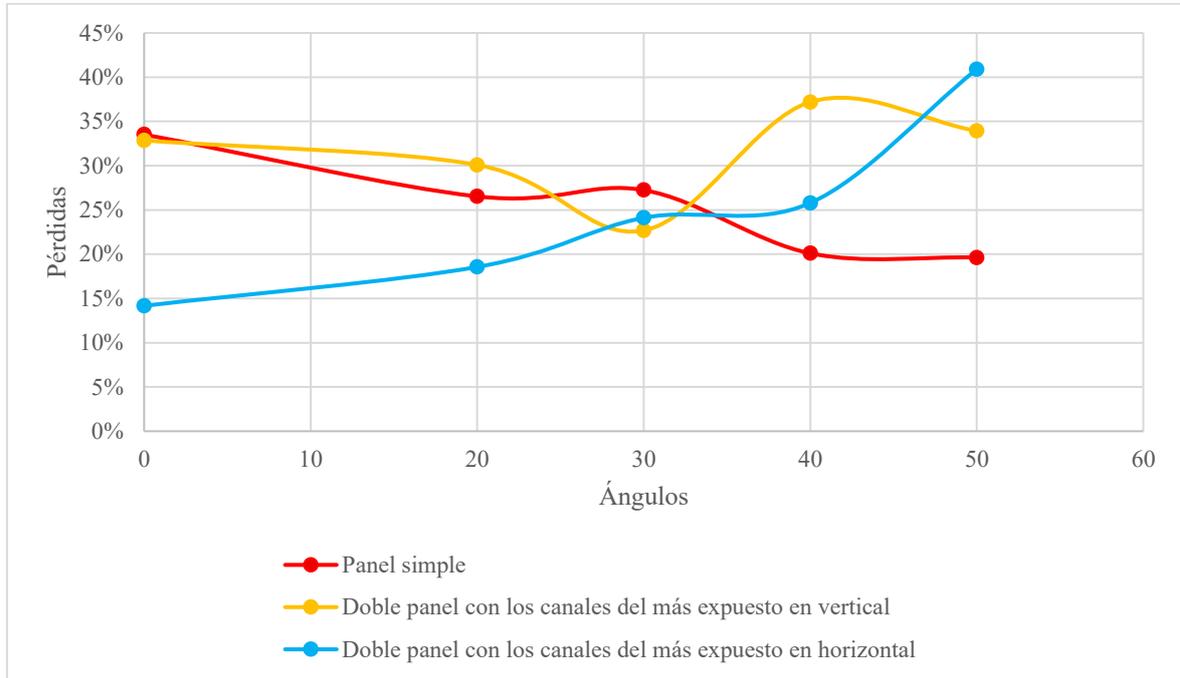


Figura 49. Pérdida respecto a las medidas sin el efecto del panel (paneles) variando ángulos transversales.  
Mayo de 2025

Las pérdidas respecto a las medidas sin panel (paneles) variando los ángulos transversales que refleja la Figura 49 tienen una estrecha relación con la Figura 47, pero, como ya se ha desarrollado en la explicación de esta última mencionada, son demasiado incongruentes.

El error relativo se calculó mediante la ecuación E. 2, y queda representado:

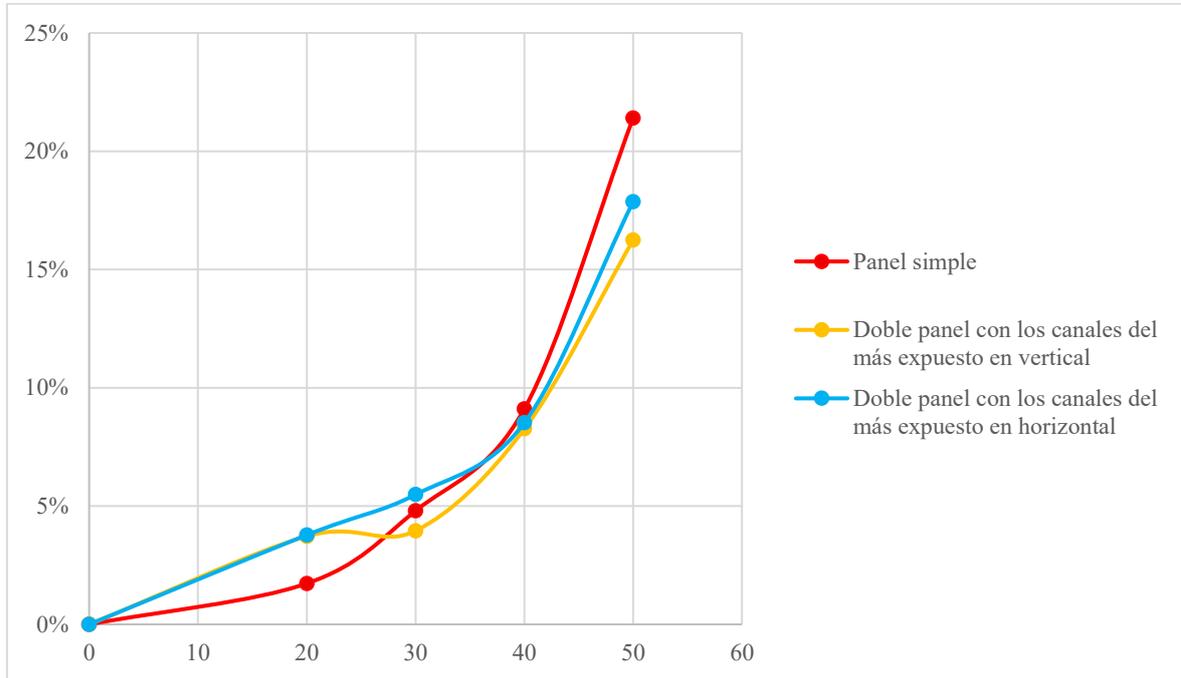


Figura 50. Error relativo variando ángulos longitudinales. Mayo de 2025

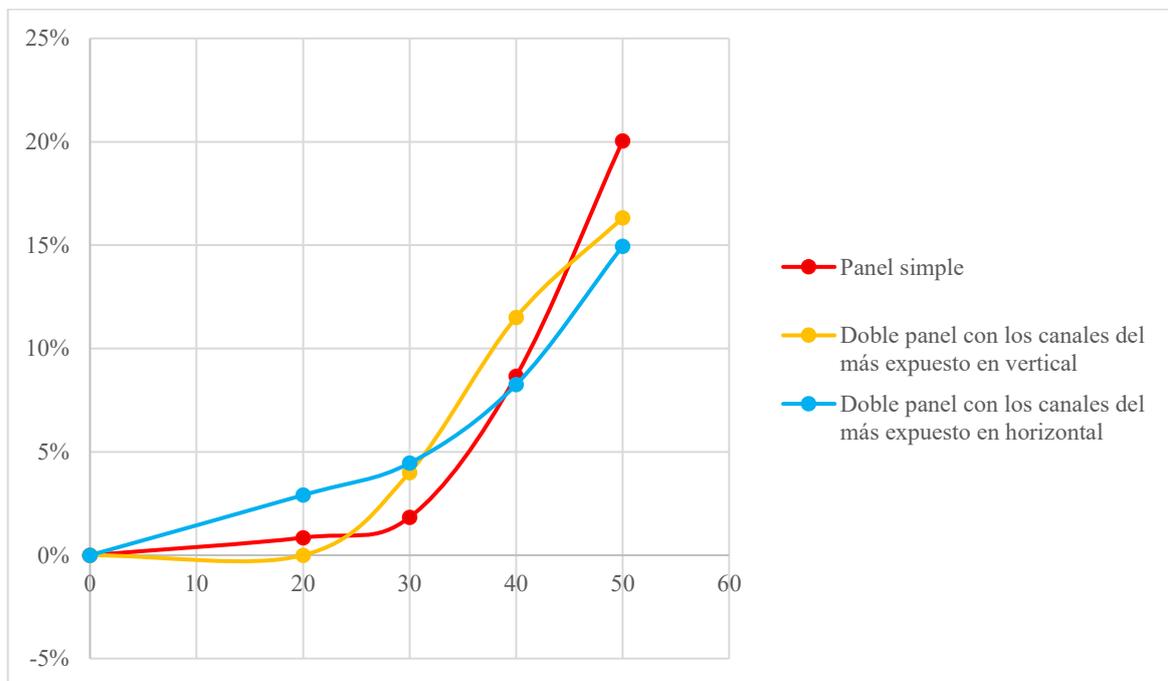


Figura 51. Error relativo variando ángulos transversales. Mayo de 2025

Tal como se indicó al final de la Sección 4.2, las gráficas que ilustran el error relativo tienen una relación directa con las que proporcionan los valores de absorción solar sin panel (paneles). Salvando algunos datos como los asociados a los ángulos  $30^\circ$  y  $50^\circ$  longitudinales y  $20^\circ$  y  $50^\circ$  transversales, se aprecia cómo las tres curvas tienen una forma realmente parecida, manteniendo la concordancia al explicar la Figura 44 y Figura 45.

## **Capítulo 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

### **5.1 CONCLUSIONES**

Los ensayos realizados se distribuyeron a lo largo de tres tandas distintas: junio de 2024, febrero de 2025 y mayo de 2025. Cada una de ellas aportó información realmente clave sobre el comportamiento del policarbonato alveolar como cubierta de un colector solar en función de la variación del ángulo de incidencia de la radiación solar. Sin embargo, la fiabilidad y relevancia de los resultados varió sensiblemente, principalmente por las condiciones meteorológicas y las mejoras progresivas en torno al protocolo experimental.

En la primera tanda, las condiciones meteorológicas no fueron del todo óptimas debido a la presencia de nubes, derivando en la inconsistencia de algunas medidas. A su vez, se asumió que la radiación incidente era constante para todos los ángulos, evitando la repetición de las medidas iniciales de cada repetición. A pesar de estos fenómenos, se identificó que la configuración de panel simple era la que mejor operaba al variar los ángulos longitudinales, seguida de la de doble panel con los canales del más expuesto en vertical y acabando con su homólogo, pero con los canales del más expuesto en horizontal. Los resultados que reflejan la variación de los ángulos transversales presentaron mayores dificultades en cuanto a su análisis, debido a su incongruencia en los ángulos 20° y 40° en la gráfica de absorción sola, sumados a la medida reservada a 30° en la gráfica de pérdidas. Las gráficas asociadas con el error relativo no pudieron ser analizadas.

La segunda tanda se presentó con una mejora sustancial respecto a la anterior, pues se introdujo un procedimiento mucho más riguroso a la hora de tomar las medidas. Este hecho permitió la obtención de datos un tanto más ajustados, aunque también manifestó diversos problemas. Se confirmó, en cierta medida, la idea teórica de que la radiación incidente captada por el piranómetro es mayor si los canales del panel más expuesto se orientan en su misma dirección. Se reafirmó el análisis llevado a cabo en la primera tanda cuando se varían

los ángulos longitudinales y se propuso el mismo orden de efectividad teniendo en cuenta los ángulos transversales, cambiando de orden las configuraciones de doble panel. No obstante, ciertas irregularidades en las curvas de absorción solar variando los ángulos transversales fueron identificadas, como en los ángulos 30° y 40°, al igual que en las curvas de pérdidas; en este caso en los ángulos 0° y 30° longitudinales y 30° y 50° transversales. El error relativo seguía mostrando una dispersión poco intuitiva, apuntando a la existencia de errores en la medición o posibles interferencias externas al sistema.

La tercera tanda fue la más fiable y consistente de todas; con condiciones climáticas óptimas y mejorando el procedimiento de medida respecto a las dos anteriores, asegurando una adecuada normalización de las curvas de absorción incidente sin la presencia de ningún obstáculo entre el piranómetro y la radiación solar. Se observaron resultados coherentes en su totalidad con los principios teóricos explicados, aunque los asociados a la variación de ángulos transversales presentaron mayores dificultades. El comportamiento general de las curvas de error relativo se mantuvo dentro de los márgenes teóricos esperados, validando así la metodología y los resultados obtenidos.

De esta forma, se concluye asegurando que, para ángulos transversales, la configuración más eficiente es la que contiene un panel único, seguido de la de doble panel con los canales del más expuesto en posición horizontal y finalizando con la de doble panel con los canales del más expuesto en posición vertical. En cuanto a los ángulos longitudinales, la configuración de panel simple repite como la óptima, esta vez seguida de la de doble panel con los canales del más expuesto en posición vertical y finalizando con su homólogo con los canales del más expuesto en posición horizontal.

## **5.2 TRABAJOS FUTUROS**

Este trabajo ha logrado desarrollar un sistema experimental para evaluar la eficiencia de cubiertas de policarbonato alveolar aplicadas a colectores solares térmicos. No sólo se ha implementado un procedimiento de medición sencillo y de bajo coste, sino que también se ha obtenido información sobre el comportamiento de este material polimérico en función de la disposición de sus canales y de la variación del ángulo con el que le incide la radiación solar.

En general, se ha podido comprobar que el policarbonato, pese a tener una transmitancia menor a la del vidrio, emerge como una alternativa técnicamente viable para cubiertas de captadores solares térmicos, destacando por su bajo peso y facilidad a la hora de instalarlo.

Una clara propuesta para futuros proyectos es la automatización del sistema de medida, por ejemplo, mediante la incorporación de sensores digitales que permitan registrar de una manera continua los valores de radiación incidente, eliminando así los posibles errores humanos en cuanto a la lectura manual o tiempos de espera. Además, se propone ampliar el análisis a otros materiales que puedan mejorar la eficiencia sin renunciar a las ventajas mecánicas y económicas del policarbonato.

Una última recomendación consistiría en ampliar este método experimental evaluando el calentamiento de un fluido caloportador que circule por los canales del panel, permitiendo valorar la eficiencia térmica de todo el sistema de una manera más global.

En definitiva, este proyecto experimental y de investigación no sólo ha cumplido con creces sus objetivos iniciales, sino que ha establecido las bases para un análisis mucho más profundo del diseño e implementación de captadores solares térmicos de bajo coste en situaciones donde la accesibilidad y sostenibilidad sean prioritarias.

## Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] U.S. Department of Energy. (2003). The History of Solar. [The History of Solar](#)
- [2] Loumakis, G. (2018). Development and testing of a low cost solar thermal collector. Glasgow Caledonian University. [Development and testing of a low cost solar thermal.pdf](#)
- [3] ASIT. (2023). Informe Mercado Solar Térmica. *Solar Thermal World*. [ASIT-Informe-Mercado-Solar-Termica-2022-10-febrero-2023.pdf](#)
- [4] Termosifón. (2023, 6 de marzo). *Wikipedia, La enciclopedia libre*. Fecha de consulta: 12:18, abril 23, 2025 desde [Termosifón - Wikipedia, la enciclopedia libre](#)
- [5] Struckmann, F. (2008). Analysis of a Flat-plate Solar Collector. Lund University. [Fabio.pdf](#)
- [6] Duffie, J.A., Beckman, W.A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes: Fourth Edition. *John Wiley and Sons*. [John A. Duffie, William A. Beckman\(auth.\)-Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth Edition \(2013\).pdf](#)
- [7] El-Nashar, A.M. (2020). Evacuated Tube Collectors, *Renewable Energy Systems and Desalination* (Vol. II). DESWARE. [Evacuated Tube Collectors](#)
- [8] Loumakis, G. (2020). Sustainable solar energy. *Lecture notes in Energy* (Vol. 77, pp 139-167). [978-3-030-43578-3 \(1\).pdf](#)
- [9] Heliodyne. (2011). Solar flat plate vs evacuated tube collectors. Disponible en <http://www.heliodyne.com>
- [10] Aelenei, L. (2015). Overview of Building Integrated Solar Thermal Systems State of the Art, Models and Applications. *COST Action TUI205-Building Integrated Solar Thermal Systems*. [Book \(1\).pdf](#)
- [11] Bellos, E., Tzivanidis, C. (2018). A review of concentrating solar thermal collectors with and without nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 763-786. [Reviewmanuscript.pdf](#)
- [12] Perelló, D., Fasulo, A. (2001). Comparación de las transmitancias de policarbonatos y vidrio. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5(8), 143-148. [Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf](#)

- [13] Farooq, W.A., Tawfik, W., Alahmed, Z.A., Ahmad, K., Singh, J.P. (2014). Role of Purging Gases in the Analysis of Polycarbonate With Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Journal of Russian Laser Research*, 35(3). [ROLEOFPURGINGGASES \(1\).pdf](#)
- [14] Geng, Y., Han, X., Wang, J., Liu, H., Zhang, H., Wang, J., Shi, L. (2024). Numerical investigation of optical characterization of polycarbonate panels. *International Journal of Thermal Sciences*. [2024-Geng-Numerical investigation of optical characterization of polycarbonate panels \(1\).pdf](#)
- [15] Fernández, A., Dieste, J.A. (2013). Low and medium temperature solar thermal collector based in innovative materials and improved heat exchange performance. *Energy Conversion and Management*, 75, 118-129. [Low and medium temperature solar thermal collector based.pdf](#)
- [16] Senseca Italy S.r.l. (2023). DSH\_LPS02\_EN datasheet – PYRASense LPS02 spectrally flat class B pyranometer. [Light, Meteorology, Weather Station PYRASense02 - Class B Pyranometer - Senseca](#)
- [17] Senseca Italy S.r.l. (2023). PYRASense LPS02 series pyranometers – Operating manual [Light, Meteorology, Weather Station PYRASense02 - Class B Pyranometer - Senseca](#)