

# Jornadas de Automática

## Modelo de parámetros concentrados para captadores solares planos con reflectores

Roca, L.<sup>a,\*</sup>, Serrano, J.M.<sup>a</sup>, Gil, J.D.<sup>b</sup>, Zaragoza, G.<sup>a</sup>, Beschi, M.<sup>c</sup>, Visioli, A.<sup>c</sup>

<sup>a</sup> CIEMAT-Plataforma Solar de Almería-CIESOL, Ctra. de Senés km 4.5, 04200 Tabernas, España

<sup>b</sup> CIESOL, Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, 04120, Almería, España

<sup>c</sup> Università degli Studi di Brescia, Via Branze, 38- 25123 Brescia

**To cite this article:** Roca, L., Serrano, J.M., Gil, J.D., Zaragoza, G., Beschi, M., Visioli, A., 2024. Lumped parameter model for flat-plate solar collectors with reflectors.

Jornadas de Automática, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10930>

### Resumen

El uso de captadores solares planos está muy extendido principalmente para aplicaciones de calefacción y refrigeración de edificios y agua caliente sanitaria. Una de las líneas de investigación para mejorar el rendimiento térmico y reducción de espacio ocupado es el uso de reflectores que permiten incrementar la radiación solar incidente sobre la cubierta de los captadores. Aunque el modelado de este tipo de sistemas está ampliamente estudiado, es importante disponer de modelos sencillos pero fiables que permitan el diseño y evaluación de lazos de control. En este artículo se presenta una modificación de un modelo de parámetros concentrados para estimar la temperatura de salida del fluido cuando se dispone de espejos reflectores con seguimiento solar. Calibrando un valor medio de los parámetros de pérdidas ópticas en torno al mediodía solar, los resultados obtenidos muestran que el error cuadrático medio es menor de  $0.78\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ .

**Palabras clave:** Aplicaciones de control de procesos, Modelado de procesos e identificación, Validación de modelo, Sistemas con retardo, Modelado e integración de sistemas de energías renovables

### Lumped parameter model for flat-plate solar collectors with reflectors

#### Abstract

The use of flat-plate solar collectors is widespread, mainly for solar heating and cooling and domestic hot water applications. One of the lines of research to improve the thermal performance and reduce the space occupied is the use of reflectors that increase the solar radiation incident on the collector plate. Although the modelling of this type of system has been widely studied, it is important to have simple but reliable models that allow the design and evaluation of control loops. This paper presents a modification of a lumped parameter model to estimate the fluid outlet temperature when solar tracking reflectors are available. By calibrating a mean value of the optical losses parameters around solar noon, the results<sup>1</sup> obtained show that the root mean square error is less than  $0.78\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ .

**Keywords:** Process control applications, Process modeling and identification, Model Validation, Delay systems, renewable energy system modeling and integration

## 1. Introducción

Los captadores solares planos (FPC, de sus siglas en inglés *Flat-Plate solar Collectors*) se pueden considerar como un tipo de intercambiador de calor que transforma la energía solar

incidente en calor (Duffie and Beckman, 2013). Normalmente están formados por una superficie negra diseñada para absorber la radiación solar y transferirla a un fluido que circula por el interior de uno o varios tubos. Esta superficie está cubierta de una estructura transparente que reduce las pérdidas

<sup>1</sup>Based on experiments carried out at the Plataforma Solar de Almería

\*Autor para correspondencia: lidia.roca@psa.es

por convección y radiación. Su diseño está enfocado principalmente para aplicaciones de baja temperatura (hasta 100 °C aproximadamente) y no requieren de seguimiento del Sol, ya que aprovechan la radiación solar global (directa más difusa). Los FPC se utilizan en diversas aplicaciones como el calentamiento de agua para climatización de edificios, agua caliente sanitaria y calor de procesos industriales.

Con el fin de mejorar el rendimiento global de los captadores, existen distintas líneas de investigación que se pueden encontrar en la literatura (Pandey and Chaurasiya, 2017) como uso de materiales poliméricos, uso de mini y micro canales como tubos absorbedores, uso de nanofluidos o materiales de cambio de fase como fluido de transferencia de calor, recubrimientos selectivos innovadores para la placa absorbidora, diseños para reducción de pérdidas térmicas e inserción de dispositivos para mejora de transferencia de calor. En este último punto, uno de los mecanismos que se investiga es el de incrementar la potencia solar incidente en los FPC mediante el uso de espejos reflectores a un lado o a ambos lados de los captadores. Aunque su uso a escala industrial no está muy extendido, es una opción atractiva para reducir la superficie requerida dada una carga térmica establecida. Por ejemplo, en el estudio llevado a cabo en (Perers and Karlsson, 1993) las simulaciones realizadas muestran que empleando reflectores fijos, se obtiene un incremento anual de 99 kWh/m<sup>2</sup> para el caso de un captador plano dado y bajo unas condiciones de operación establecidas.

El desarrollo de modelos de FPC ha sido de gran interés por la comunidad científica con diversos objetivos como mejorar el diseño para incrementar la eficiencia, analizar el uso de distintos fluidos de transferencia de calor (Sakhaei and Valipour, 2019) o desarrollar y ajustar estrategias de control. En (Tagliafico et al., 2014) se puede consultar una revisión detallada de los modelos desarrollados para FPC. Entre los distintos modelos descritos en la literatura se pueden destacar aquellos que tienen aplicación en el ámbito del diseño de controladores. Los modelos dinámicos de parámetros concentrados basados en balance de energía donde la capacidad térmica de los componentes del FPC se asume que están concentrados en un único punto (Close, 1967) han sido de gran utilidad en diversas aplicaciones de la automática como por ejemplo destilación multi-efecto Roca et al. (2009), destilación por membranas (Gil et al., 2018) o climatización en edificios (Pataro et al., 2022). También se ha considerado en la literatura la distribución de temperatura del fluido a lo largo del tubo absorbedor para este tipo de aplicaciones (Orbach et al., 1981), a costa de aumentar la complejidad del modelo.

Los modelos basados en inteligencia artificial tienen también su aplicación para optimización en tiempo real en estrategias de control dado el bajo coste computacional que conllevan. En (Alawi et al., 2024) por ejemplo, se analiza el uso de distintas técnicas de *machine learning* para predecir la eficiencia térmica de un FPC con nanofluido como fluido de transferencia de calor. Centrando la atención en el caso de modelos de redes neuronales, existen numerosos artículos que abordan esta temática como por ejemplo (Diez et al., 2019) en el que se modela también la eficiencia térmica de un FPC.

El modelado de FPC con espejos reflectores también ha sido analizado en la literatura desde los años 60 hasta ahora (Tabor, 1966; Larson, 1980; Bollentin and Wilk, 1995; Nikolic and Lukic, 2015), pero no hay constancia de emplear este

tipo de modelos para aplicaciones de control. Con el objetivo de diseñar y evaluar estrategias de control en campo de captadores planos con espejos reflectores, en este artículo se presenta un modelo de parámetros concentrados validado con datos reales procedentes de una planta piloto ubicada en las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería.

En este trabajo se emplea un modelo de parámetros concentrados para FPC añadiendo un término en el balance de energía que representa la energía incidente procedente de los espejos reflectores. El objetivo de este desarrollo es emplearlo en diseño y ajuste de controladores, por lo que se incluyen también los retardos asociados. En la Sección 2 se describe las características principales de la planta de FPC piloto que se emplea para el diseño y calibración del modelo. La Sección 3 está dedicada a la descripción del modelo, mientras que en la Sección 4 se muestra la validación de este junto con simulaciones que permiten analizar distintos casos de estudio. Por último, en la Sección 5 se resumen algunas recomendaciones para la calibración adecuada de este tipo de modelos.

## 2. Campo solar Aquasol-II

El campo solar Aquasol-II (ver Figura 1(a)) está ubicado en las instalaciones de la Plataforma Solar de Almería (latitud: 37.097005 norte, longitud 2.364750 oeste). Está formado por 60 módulos de captadores estáticos (modelo Wagner LBM 10HTF) con un área total de apertura de 606 m<sup>2</sup> y conectado con un sistema de almacenamiento térmico de 40 m<sup>3</sup> a través de un intercambiador de calor. Este campo solar está formado por un pequeño lazo (lazo 1) con 4 módulos de captadores conectados en paralelo y 4 lazos más grandes (lazos 2-5) con 14 módulos de captadores (cada lazo está formado por dos filas conectadas en serie y cada fila está formada por 7 módulos de captadores en paralelo). Todos los FPC están orientados al sur y tienen una inclinación de 35 ° respecto al plano horizontal. Cada módulo de captadores está compuesto por 5 captadores por los que circula agua como fluido de transferencia de calor a través de un tubo absorbedor en forma de zigzag (ver Figura 1(b)). Como complemento, el campo solar dispone de espejos planos móviles instalados al sur de cada fila de captadores con seguimiento automático del Sol y que reflejan la radiación solar directa sobre los captadores solares, aumentando así la radiación solar incidente en cada uno. La flexibilidad del campo solar permite la operación independiente de cada lazo, por medio de sus propias válvulas y sistema de bombeo. Cada lazo está conectado a un intercambiador de calor individual que ofrece la flexibilidad de acoplar distintas cargas en función de las necesidades durante ensayos experimentales.

En la campaña experimental llevada a cabo para realizar el trabajo que se presenta, todos los lazos de espejos han estado en seguimiento solar, salvo el lazo 5 en el que los espejos estaban abatidos y no reflejaban la radiación solar incidente sobre los captadores.



(a) Foto aérea.

(b) Detalle de tubo absorbedor en el interior de un captador solar

Figura 1: Campo solar Aquasol-II en las instalaciones de PSA-CIEMAT

### 3. Modelado

Tabla 1: Nomenclatura.

Nombre	Definición
$A_c$	Área superficial de un captador (2.02 m <sup>2</sup> )
$A_e$	Área superficial de espejo reflector que afecta a un captador (1.73 m <sup>2</sup> )
$C_p$	Capacidad calorífica del agua (J/(kg · K))
$d$	Retardo (s)
$\dot{m}_t$	Flujo másico que circula por el tubo absorbedor de un captador (kg/s)
$h_1$	Coefficiente de pérdidas térmicas globales (3.523 W/(m <sup>2</sup> · K))
$h_2$	Coefficiente de pérdidas térmicas globales (0.015 W/(m <sup>2</sup> · K <sup>2</sup> ))
$I_g$	Radiación solar global en plano inclinado 35 ° (W/m <sup>2</sup> )
$I_n$	Radiación solar directa normal (W/m <sup>2</sup> )
$I_r$	Radiación solar reflejada (W/m <sup>2</sup> )
$P_{loss}$	Pérdidas térmicas (W)
$P_I$	Potencia radiante sobre el captador (W)
$t$	Tiempo (s)
$T_a$	Temperatura ambiente (°C)
$T_{in}$	Temperatura de entrada del agua (°C)
$T_m$	Temperatura media del agua (°C)
$T_{out}$	Temperatura de salida del agua (°C)
$V$	Volumen de agua en un captador (0.0022 m <sup>3</sup> )
$\beta_1$	Factor de pérdidas ópticas medio (transmisividad y absorptividad del captador, y ángulo de incidencia)
$\beta_2$	Factor de pérdidas ópticas medio (reflectividad del espejo y ángulo de incidencia)
$\rho$	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )
$\theta$	Ángulo de incidencia en el reflector

#### 3.1. Modelo dinámico para un captador

Mediante un balance de energía se puede describir la respuesta de la temperatura de salida del fluido en función de las entradas (radiación solar global en plano inclinado y directa normal,  $I_g$  y  $I_n$ , temperatura de entrada,  $T_{in}$ , flujo másico que circula por el tubo absorbedor,  $\dot{m}_t$ , y temperatura ambiente,  $T_a$ . Todos los parámetros y variables incluidas en las ecuaciones (1)-(3) se encuentran definidos en la Tabla 1.

$$V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \frac{dT_{out}}{dt} = P_I - P_{loss} + \dot{m}_t \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

$$P_I = \beta_1 \cdot (I_g \cdot A_c + \beta_2 \cdot I_r \cdot A_e), \quad (2)$$

$$P_{loss} = h_1 \cdot A_c \cdot (T_m - T_a) + h_2 \cdot A_c \cdot (T_m - T_a)^2, \quad (3)$$

donde  $T_m$  es la temperatura media del fluido en el interior del tubo absorbedor:

$$T_m = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}, \quad (4)$$

o  $I_r$  es la radiación solar reflejada por el espejo:

$$I_r = I_n \cdot \cos\theta. \quad (5)$$

En el factor de pérdidas con el ambiente,  $P_{loss}$ , se asume un coeficiente de pérdidas globales ( $h_1$ ) y una dependencia de estas pérdidas con la temperatura ( $h_2$ ). Es importante destacar también que en la Ecuación (2) se asume que si el espejo se encuentra en seguimiento solar, el área del captador que está aprovechando la radiación solar reflejada tiene un valor medio constante.

#### 3.2. Calibración de parámetros

A partir de las ecuaciones anteriormente descritas, se pueden identificar los siguientes tipos de parámetros: los relacionados con las propiedades físicas del fluido ( $\rho$ ,  $C_p$ ) que se pueden obtener en función de las condiciones de temperatura<sup>2</sup> y presión del fluido, geométricos y de transferencia de calor ( $V$ ,  $A_c$ ,  $A_e$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ) que vienen definidos por las características técnicas del módulo comercial que se esté empleando y

<sup>2</sup>En este caso se aproximan con la temperatura del fluido a la entrada

los factores de pérdidas ópticas ( $\beta_1$  y  $\beta_2$ ). En este último caso, aunque los valores nominales pueden calcularse a partir de las características técnicas del módulo comercial (ya que está relacionado con la absorción y transmitancia del captador, y con la reflectancia del espejo), su valor no es constante por dos motivos principales; dependen del ángulo de incidencia y de la suciedad que haya depositada en la cobertura del captador y en el espejo.

En este caso, para la calibración de  $\beta_1$  y  $\beta_2$  se han empleado algoritmos genéticos que calculan un valor medio para cada uno de los parámetros y para un día de operación. El intervalo de búsqueda se ha restringido a [0.5, 1]. Como función de ajuste se ha seleccionado el error cuadrático medio (MSE, de sus siglas en inglés *Mean Squared Error*) considerando un intervalo de datos de  $\pm 2$  horas respecto al mediodía solar.

### 3.3. Modelo dinámico de una fila de captadores

En la Sección 3.1 se definen las ecuaciones que gobiernan el balance de energía en un único captador, es decir, en un único tubo absorbedor. En el caso del campo Aquasol-II, los lazos 2-5 están formados por dos filas de captadores y cada fila por 7 módulos Wagner LBM 10HTF (con 5 captadores cada uno), es decir, 35 captadores por fila. Idealmente, dado que todos los captadores son iguales, se asume que el caudal se distribuye por igual y la temperatura de salida de un único captador es equivalente a la temperatura de salida de una fila. Y así es con una salvedad, los retardos en la temperatura de entrada y salida son distintos en función de la posición de cada captador. Se trata de un conjunto de sistemas no lineales en serie con retardos que, al sumarlos, dan lugar a un retardo aparente que varía en función del caudal que circula por los tubos. Una solución para simplificar el modelo, es añadir los retardos de entrada y salida calculados de forma experimental. Estos retardos están descritos en (Ampuño et al., 2019) y son los que se emplean en este documento. En el caso de la radiación solar directa, el retardo se supone que es el mismo que para la radiación solar global. Por tanto, la temperatura de salida de una fila de captadores es tal y como se describe a continuación:

$$V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \frac{dT_{out}(t)}{dt} = Q_I(t) - Q_{loss}(t) + \dot{m}_t(t - d_q) \cdot C_p \cdot (T_{in}(t - d_{Tin}) - T_{out}(t)) \quad (6)$$

$$P_I(t) = \beta_1 \cdot (I_g(t - d_I) \cdot A_c + \beta_2 \cdot I_r(t - d_I) \cdot A_e), \quad (7)$$

$$P_{loss}(t) = h_1 \cdot A_c \cdot (T_m(t) - T_a(t)) + h_2 \cdot A_c \cdot (T_m(t) - T_a(t))^2, \quad (8)$$

$$T_m(t) = \frac{T_{in}(t - d_{Tin}) + T_{out}(t)}{2}. \quad (9)$$

Es importante tener en cuenta que  $\dot{m}_t$  es el flujo másico que circula por un captador y, dado que la medida de flujo másico se encuentra a la salida de la fila, es necesario dividir el valor medido entre el número de captadores en paralelo.

## 4. Resultados

En esta sección se muestran resultados de validación del modelo de una fila de captadores empleando datos reales de

la planta piloto Aquasol-II. Además, se analiza la variación de los parámetros de ajuste a lo largo de los días de operación y cómo afecta la suciedad y el uso de espejos reflectores a la potencia térmica obtenida.

### 4.1. Variabilidad de parámetros de calibración

Tal y como se ha descrito en la Sección 3, los parámetros  $\beta_1$  y  $\beta_2$  pueden ir cambiando a lo largo de los días por la suciedad que se va acumulando en la superficie de captadores y espejos.

En la Figura 2 se puede observar los valores de  $\beta_1$  y  $\beta_2$  calibrados a partir de los datos obtenidos en las filas de los lazos 2 y 5 en distintos días de operación de junio 2024. Además, se indica los días en los que se ha lavado el campo o días en los que ha llovido. Como era de esperar, los valores tienden a disminuir con el tiempo por la suciedad y aumentan tras el lavado y la lluvia. Esta figura nos da información del rango de variación aproximado que se puede considerar:  $\beta_1 \in [0.8, 0.99]$  y  $\beta_2 \in [0.5, 0.85]$ .

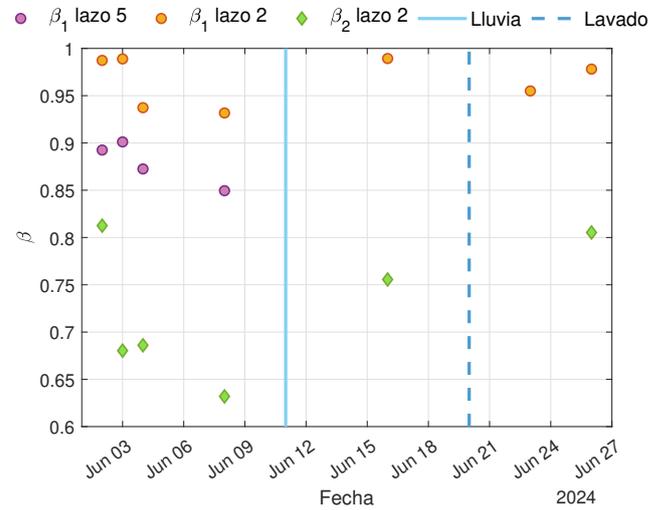


Figura 2: Variación de  $\beta_1$  y  $\beta_2$  a lo largo de los días

Si comparamos los valores de  $\beta_1$  para los lazos 2 y 5, podemos observar que los valores obtenidos en el lazo 2 son ligeramente mayores. Además, el día 23 de junio, en el que los espejos reflectores del lazo 2 se encontraban abatidos (en posición de seguridad por velocidad de viento alta), el valor de  $\beta_1$  es menor de lo esperado. Estos dos hechos dan a entender que al calibrar  $\beta_1$  y  $\beta_2$  de manera simultánea en el lazo 2, se está sobrestimando  $\beta_1$ . Analizando el modelo, la fuente de error pueden ser dos; 1) una subestimación del valor de área reflejada,  $A_e$ , que da lugar a unos valores de  $\beta_1$  cercanos al límite superior de búsqueda, 2) un error en el valor del ángulo de inclinación de los reflectores que da lugar a una subestimación de la radiación solar reflejada.

### 4.2. Validación con datos experimentales

En la Figura 3 se muestran los datos experimentales obtenidos el día 22 de enero 2024 para el caso de dos filas distintas de captadores. La simulación consiste en dos modelos en paralelo para simular las condiciones de cada fila de forma independiente ya que los caudales y los retardos asociados pueden

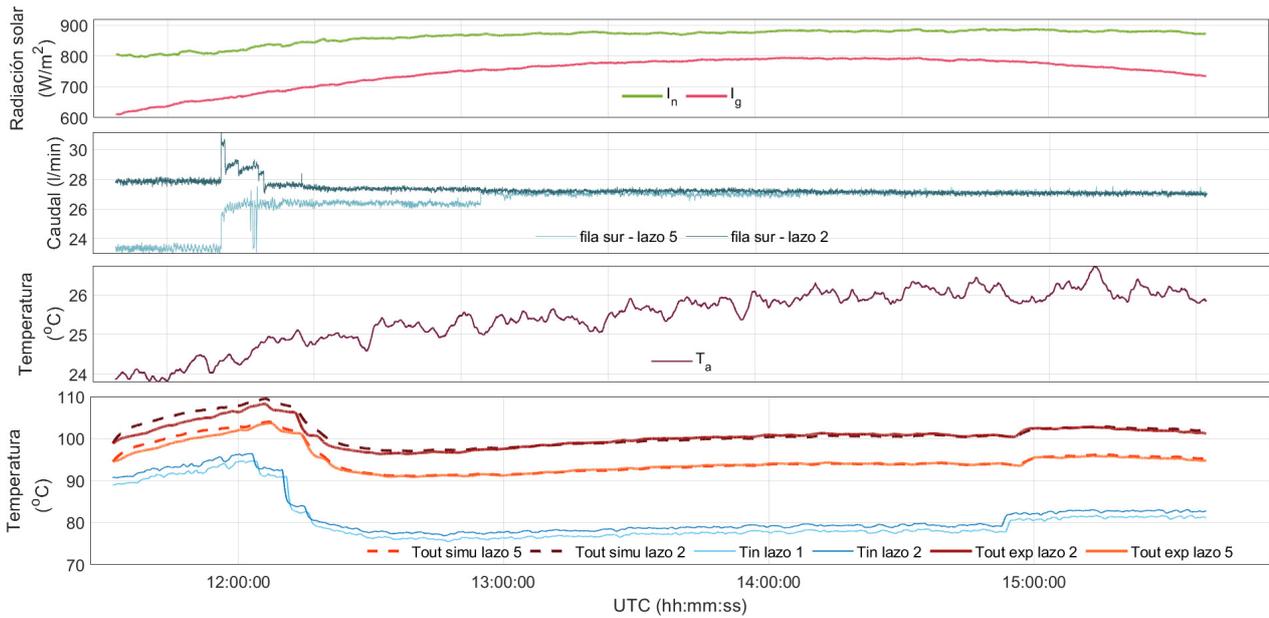


Figura 3: Resultados con datos del día 2 de junio de 2024, donde  $I_g$  es radiación global en plano inclinado ( $35^\circ$ ),  $I_n$  radiación solar directa normal,  $T_a$  temperatura ambiente,  $T_{out,simu,lazo5}$  temperatura estimada del agua a la salida de la fila sur del lazo 5,  $T_{out,simu,lazo2}$  temperatura estimada del agua a la salida de la fila sur del lazo 2,  $T_{in,lazo5}$  temperatura medida del agua a la entrada del lazo 5,  $T_{in,lazo2}$  temperatura medida del agua a la entrada del lazo 2,  $T_{out,exp,lazo2}$  temperatura medida a la salida de la fila sur del lazo 2 y  $T_{out,exp,lazo5}$  temperatura medida a la salida de la fila sur del lazo 5

ser distintos. Durante este ensayo, los espejos de la fila 2 estaban enfocados ( $\beta_2 > 0$ ), mientras que los de la fila 5 estaban abatidos y no reflejaban la radiación solar directa ( $\beta_2 = 0$ ). En la Figura 3 se observan las variables de entrada al modelo (radiación solar global y normal directa,  $I_g$ ,  $I_n$ ), caudal total que circula por la fila, temperatura ambiente y de entrada, y las salidas (temperaturas estimadas de salida) junto a los valores experimentales. Tal y como se observa, los valores simulados siguen bastante bien los experimentales tanto para la fila sin espejos reflectores ( $MSE=0.29\text{ }^\circ\text{C}^2$ ) como para la que tiene los espejos reflectores en seguimiento ( $MSE=0.78\text{ }^\circ\text{C}^2$ ). Las mayores discrepancias se observan al principio y al final del día, siendo los máximos errores obtenidos  $2.6\text{ }^\circ\text{C}$  y  $1.6\text{ }^\circ\text{C}$  para el lazo 2 y lazo 5, respectivamente. Estos errores en los extremos del día están por encima del error de los instrumentos de medida (Pt100 clase A) y pueden ser debidos a que los valores de  $\beta$  estimados (ver Tabla 2) son un valor medio obtenido en torno al mediodía solar (sin considerar el efecto del ángulo de incidencia).

Tabla 2: Calibración de parámetros para el día 2 de junio de 2024.

	$\beta_1$	$\beta_2$
Fila 2	0.9873	0.8125
Fila 5	0.8925	0

### 4.3. Comparación entre filas de captadores

A partir del rango obtenido para los valores de los parámetros  $\beta_1$  y  $\beta_2$  (ver Sección 4.1), se puede calcular el valor de la potencia térmica obtenida (dadas unas condiciones de operación) cuando los captadores y espejos están sucios o limpios. En la Figura 4 se ha representado la potencia térmica de una fila de captadores para cuatro casos; con espejos reflectores limpios ( $\beta_1 = 0.98$ ,  $\beta_2=0.81$ ), sin espejos reflectores y capta-

dores limpios ( $\beta_1 = 0.9$ ), con espejos reflectores sucios ( $\beta_1 = 0.93$ ,  $\beta_2=0.63$ ) y sin espejos reflectores y captadores sucios ( $\beta_1 = 0.85$ ). En la simulación realizada se han considerado los siguientes valores en las variables de entrada: 2 de junio, 14:00 UTC,  $I_g=800\text{ W/m}^2$ ,  $I_n=900\text{ W/m}^2$ ,  $T_{in}=70\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_a=20\text{ }^\circ\text{C}$  y  $m_t=0.0143\text{ kg/s}$ .

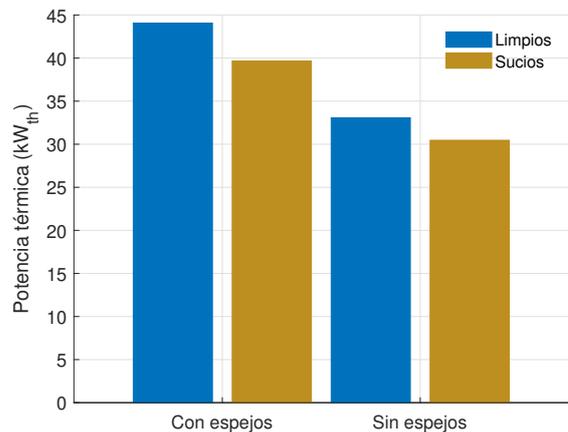


Figura 4: Comparación de potencia térmica obtenida con una fila de captadores en condiciones estacionarias

De las barras representadas en la Figura 4 se puede concluir que, bajo las condiciones de operación anteriormente citadas, el uso de los espejos reflectores supone obtener un 33 % más de potencia térmica con solo una fila. Incluso si los espejos se mantienen sucios se puede alcanzar un 20 % más de potencia térmica que empleando solo los FPC. Por otra parte, si no se dispone de espejos reflectores y no se hace un adecuado mantenimiento, la potencia térmica puede caer un 8 %.

## 5. Conclusiones

En este artículo se ha descrito cómo se puede obtener un modelo sencillo de parámetros concentrados para uno o un conjunto de captadores FPC con espejos reflectores. Disponiendo de las especificaciones técnicas del módulo captador, solo es necesario calibrar los parámetros de pérdidas ópticas relacionados con el FPC y con el espejo reflector.

Aunque en este trabajo se ha realizado la calibración simultánea de los parámetros  $\beta_1$  y  $\beta_2$  para los captadores con reflectores en seguimiento, se ha observado que los valores obtenidos pueden desviarse ligeramente de la realidad debido a diversos factores que requieren análisis en trabajos futuros: dependencia de las pérdidas ópticas con el ángulo de incidencia y posibles errores en los ángulos de inclinación y área reflejada. Además, para comprobar la bondad de los valores calibrados se sugiere emplear un único día de operación (con espejos y captadores limpios) y buena radiación solar sin perturbaciones en torno al mediodía solar, manteniendo una fila con los espejos abatidos (para calibrar  $\beta_1$ ) y otra fila con espejos en seguimiento (para calibrar de forma simultánea  $\beta_1$  y  $\beta_2$ ). Este test permite por una parte garantizar que el ajuste de los parámetros es bueno (si los valores de  $\beta_1$  son cercanos en ambos casos) y, por otra parte, permite obtener los valores máximos que se deben incluir en el procedimiento de calibración en días posteriores y restringir así el rango de búsqueda.

Si el modelo de parámetros concentrados se emplea para el diseño de controladores donde los errores de modelado pueden ser causa de respuestas no deseadas u oscilatorias, se recomienda realizar una calibración automática al final de cada día de operación para actualizar los valores. Además, es importante caracterizar de manera adecuada los retardos en función de los caudales aplicados. Dado el origen de estos retardos, se recomienda obtener curvas de ajuste a partir de datos experimentales.

## Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PID2021-126452OA-I00, financiado por MCI-N/AEI/10.13039/501100011033/ y “FEDER Una manera de hacer Europa”. Agradecemos a la Plataforma Solar de Almería el acceso a sus instalaciones, el apoyo de su personal científico y técnico, y el apoyo financiero del proyecto SFERA-III (GA 823802).

## Referencias

Alawi, O. A., Kamar, H. M., Salih, S. Q., Abba, S. I., Ahmed, W., Homod, R. Z., Jamei, M., Shafik, S. S., Yaseen, Z. M., 2024. Development of optimized machine learning models for predicting flat plate solar collectors

- thermal efficiency associated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 133, 108158.  
DOI: 10.1016/j.engappai.2024.108158
- Ampuño, G., Roca, L., Gil, J. D., Berenguel, M., Normey-Rico, J. E., 2019. Apparent delay analysis for a flat-plate solar field model designed for control purposes. *Solar Energy* 177, 241–254.  
DOI: 10.1016/j.solener.2018.11.014
- Bollentin, J. W., Wilk, R. D., 1995. Modeling the solar irradiation on flat plate collectors augmented with planar reflectors. *Solar Energy* 55 (5), 343–354.  
DOI: 10.1016/0038-092X(95)00058-Y
- Close, D., 1967. A design approach for solar processes. *Solar Energy* 11 (2), 112–122.  
DOI: 10.1016/0038-092X(67)90051-5
- Diez, F., Navas-Gracia, L., Martínez-Rodríguez, A., Correa-Guimaraes, A., Chico-Santamarta, L., 2019. Modelling of a flat-plate solar collector using artificial neural networks for different working fluid (water) flow rates. *Solar Energy* 188, 1320–1331.  
DOI: 10.1016/j.solener.2019.07.022
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. *Solar engineering of thermal processes*. Wiley New York.
- Gil, J. D., Roca, L., Zaragoza, G., Berenguel, M., 2018. A feedback control system with reference governor for a solar membrane distillation pilot facility. *Renewable Energy* 120, 536–549.  
DOI: 10.1016/j.renene.2017.12.107
- Larson, D., 1980. Concentration ratios for flat-plate solar collectors with adjustable flat mirrors. *Journal of Energy* 4 (4), 170–175.  
DOI: doi.org/10.2514/3.62470
- Nikolic, N., Lukic, N., 2015. Theoretical and experimental investigation of the thermal performance of a double exposure flat-plate solar collector. *Solar Energy* 119, 100–113.  
DOI: 10.1016/j.solener.2015.06.038
- Orbach, A., Rorres, C., Fischl, R., 1981. Optimal control of a solar collector loop using a distributed-lumped model. *Automatica* 17 (3), 535–539.  
DOI: 10.1016/0005-1098(81)90010-8
- Pandey, K. M., Chaurasiya, R., 2017. A review on analysis and development of solar flat plate collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 641–650.  
DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.078
- Pataro, I. M., Gil, J. D., da Costa, M. V. A., Guzmán, J. L., Berenguel, M., 2022. A nonlinear control approach for hybrid solar thermal plants based on operational conditions. *Renewable Energy* 183, 114–129.  
DOI: 10.1016/j.renene.2021.10.057
- Perers, B., Karlsson, B., 1993. External reflectors for large solar collector arrays, simulation model and experimental results. *Solar Energy* 51 (5), 327–337.  
DOI: 10.1016/0038-092X(93)90145-E
- Roca, L., Guzman, J. L., Normey-Rico, J. E., Berenguel, M., Yebra, L., 2009. Robust constrained predictive feedback linearization controller in a solar desalination plant collector field. *Control Engineering Practice* 17 (9), 1076–1088.  
DOI: 10.1016/j.conengprac.2009.04.008
- Sakhaei, S. A., Valipour, M. S., 2019. Performance enhancement analysis of the flat plate collectors: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102, 186–204.  
DOI: 10.1016/j.rser.2018.11.014
- Tabor, H., 1966. Mirror boosters for solar collectors. *Solar Energy* 10 (3), 111–118.  
DOI: 10.1016/0038-092X(66)90025-9
- Tagliafico, L. A., Scarpa, F., De Rosa, M., 2014. Dynamic thermal models and CFD analysis for flat-plate thermal solar collectors—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30, 526–537.  
DOI: doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.023