

ACTAS DEL CONGRESO

V ENCUENTRO DE INGENIERÍA DE LA ENERGÍA DEL CAMPUS MARE NOSTRUM

Editores: Mariano Alarcón García (Editor) Manuel Seco Nicolás (Co-editor)

Quinta edición del Encuentro orientado a servir de espacio de reunión para tratar las distintas facetas de las aplicaciones de la Energía en los ámbitos académico y profesional, así como de instituciones y empresas en el que compartir trabajos, se muestren avances creando un espacio virtual de debate y reflexión en el que plantear soluciones a los importantes retos que la Sociedad tiene en el ámbito de la Energía, englobado en el ODS-7, *Energía asequible y no contaminante,* desde una vocación tecnológica pero a la vez con sensibilidad social.



ISBN: 978-84-09-29971-3 Dirección web de congreso: <u>V-EIECMN</u>

© Mariano Alarcón García

Universidad de Murcia Campus Mare Nostrum

Del 23 al 26 de noviembre de 2020





Influencia real de la inercia térmica de los elementos de un captador solar plano de baja temperatura

Manuel Seco-Nicolás^{1*}, Mariano Alarcón¹, Juan Pedro Luna-Abad²

¹Electromagnetism and Electronics Department. International Campus of Excellence in the European context (CEIR) Campus Mare Nostrum, University of Murcia, Spain. *manuel.seco@um.es, mariano@um.es.

²Thermal and Fluid Engineering Department. International Campus of Excellence in the European context (CEIR) Campus Mare Nostrum, Technical University of Cartagena, Spain. jp.lunaabad@upct.es

Abstract

The thermal inertia of the elements which compose flat plate solar thermal collectors (FPSTC) is mainly used to make previsions of temperature in order to obtain the collector performance and other related parameters. Consequently, the accurate determination of this parameter is of major interest to provide the collector performance indicators.

EN 12975-2:2006 standard, establishes the procedure to obtain the thermal capacity of a FPSTC from experimental or simulated data. This standard applies a coefficient for every layer of the assembly, decreasing the role of the glass cover to less than 4%. However, the obtained experimental inertia of the glass cover was around 10%.

The calculations were made using data obtained in thermo-solar experimental facility of the Solar Laboratory of the University of Murcia.

Two solar collectors of different typology belonging to this facility were provided with a set of 28 thermocouples each, divided into four measurement sections. This arrangement allows the continuous measurement of the collector temperature field, as well as of fluid temperatures and other data related with collector performances.

The thermal inertia of each component of one of the FPSTC has been represented in bars diagrams, during the daylight period, in steps of 10 minutes. In most cases only a slight difference of about 0.2 to 1.2 °C between forecast temperatures, considering new elements or not, were obtained, leading to the conclusion that for general purposes the EN-12975-2:2006 standard definition of collector mean temperature is sufficiently accurate, but it could be improved.

Keywords

Thermal inertia; flat plate solar thermal collector (FPSTC), EN-12975-2:2006.





1. Introducción y objetivos

Los captadores solares térmicos planos de baja temperatura (FPSTC, en inglés *Flat-Plate Solar Thermal Collectors*) son dispositivos de energía renovable que se están utilizando desde los años 60 para transformar directamente la energía solar en energía térmica y elevar así la temperatura del agua de procesos domésticos o industriales. La energía solar térmica juega un rol incuestionable en la transición energética, debido a la baja huella de carbono y el retorno de la inversión que los sistemas solares térmicos presentan en la generación de calor tanto para uso doméstico como para aplicaciones industriales. Sin embargo, a pesar de la madurez de su tecnología, su capacidad calorífica se está desaprovechando al no haberse llevado a cabo verdaderos esfuerzos en aumentar su rendimiento térmico, actualmente en torno al 60%.

En la mayoría de las aplicaciones domésticas, cuando se trata de edificios dentro de una ciudad, se dispone de unas dimensiones muy reducidas para poder intervenir en las dimensiones de los captadores. Es por tanto necesario estudiar más en detalle el trabajo que realiza cada uno de los componentes de los que está formado. Dicho estudio además cabe pensar que es mejor realizarlo en condiciones reales de operación, es decir, llevar a cabo las experimentaciones en un ambiente exterior siendo sometido el sistema a la intemperie.

No obstante, hay multitud de trabajos experimentales y de simulación sobre el comportamiento térmico de los FPSTC. Por ejemplo, el estudio de la convección laminar forzada, que se produce en numerosas aplicaciones industriales, incluyendo los captadores solares térmicos [1-3], nanofluidos [4], mini y micro canales [5], micro intercambiadores de calor, y una amplia variedad de otros intercambiadores de calor [6]. Además, existe una gran variedad de estudios experimentales y numéricos [7, 8]; y otros trabajos relevantes enfocados a la eficiencia de transformación de la energía solar en energía calorífica, que actualmente está comprendida entre el 50 y el 70% [9], ya que los FPTSC son enormemente dependientes de las volubles condiciones ambientales. Esto sugiere que hay aún bastantes posibilidades de mejora a este respecto.

Los fundamentos de los mecanismos relacionados con la transferencia de calor y mecánica de fluidos actuando simultáneamente han sido exhaustivamente estudiados por Pehtukov [10], Bejan [11], Çengel [12], entre otros.

Cuando se dimensionan instrumentos solares concurren muchos parámetros, como la longitud del tubo, su diámetro o su espesor. Estos parámetros influyen mucho en la forma del perfil de temperaturas del interior del fluido caloportador. Además, la longitud del tubo que está expuesto a la irradiancia solar determina la cantidad de energía capturada por el dispositivo: cuanto más largo sea el tubo, más energía absorberá, pero, sin embargo, la longitud no debería ser excesiva para evitar un desperdicio de material y espacio, ya que hay un límite en la absorción de calor por parte de un tubo en esas condiciones. Se necesita una tubería no demasiado larga ni demasiado corta.





Esta longitud óptima del tuvo ha sido intensamente estudiada por los autores, que la han llamado "longitud característica" [13].

Desde hace más de ocho años el grupo de Energía Solar de la Universidad de Murcia lleva realizando medidas experimentales de la temperatura superficial de diferentes componentes de FPTSC [14]. En la literatura científica, el comportamiento del flujo dentro de los tubos sometidos a condiciones térmicas asimétricas no ha sido ampliamente investigado. Este tipo de flujo es importante porque las condiciones externas asimétricas aparecen con frecuencia en los sistemas de tuberías reales; por ejemplo, el tubo central de un colector cilindro-parabólico solar, un tubo de aceite externo o un tubo de horno, etc., se calientan asimétricamente por una de sus superficies.

En consecuencia, los principales objetivos de este trabajo fueron: (1) obtención de medidas experimentales de temperaturas de cada componente de un FPSTC a lo largo de un día representativo, es decir, un día en el que se produce una variación suave de irradiancia directa, difusa y global; (2) a partir de estos resultados de temperatura, obtención del impacto de cada componente en la inercia térmica global; (3) comparación de los resultados con los proporcionados por la norma actual EN-12975-2: 2006 y por otros autores.

Para alcanzar estos objetivos, se han utilizado dimensiones reales, magnitudes y condiciones operativas del FPTSC del laboratorio de energía solar de la Universidad de Murcia [14].

La principal contribución de este artículo al conocimiento científico es un conjunto completo de resultados experimentales de inercia térmica, que es de suma importancia en el diseño de colectores solares térmicos de placa plana.

Nomenclatura								
ac	capacidad térmica	J⋅K ⁻¹		Superíndices				
Ci	capacidad térmica del componente i	kJ⋅m ⁻² ⋅K ⁻¹		*	variable reducida			
Сp	calor específico	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹		Subíndices				
E_L	Incidencia de onda larga (λ >3 μ m)	W∙m⁻²		1,2,3	numeración			
G	Constante de irradiancia extraterrestre	W∙m ⁻²		amb	ambiente			
1	inercia global	J∙m ⁻²		dir	directa			
к	modificador del ángulo de incidencia solar			dif	difusa			
mi	masa del componente i	kg		f	asociado a fluido			
p _i	coeficiente de ponderación de la inercia térmica del componente i			тр	np media ponderada			
t	tiempo	S		p prevista				
Т	temperatura	°C		qd quasi-dinámico				
и	velocidad	m·s⁻¹		Caracteres griegos				
v	volumen	m ³		α_{I} coeficiente de transmisión del calor				

V CONGRESO ENCUENTRO DE INGENIERÍA DE LA ENERGÍA DEL CAMPUS MARE NOSTRUM Murcia 23 al 26 de noviembre de 2020





y 4	coeficiente experimental de radiación		α2	coeficiente de dependencia de temperatura	
y 6	coeficiente experimental de viento		ε	emitancia	
			ρ	densidad	kg∙m ⁻³
			η	rendimiento	
			η_0	Factor de rendimiento de un captador solar	
			σ	constante de Stephan-Boltzman	W⋅m ⁻² ⋅K ⁻⁴
			θ	solar beams incidence angle	

2. Metodología y experimentación

Dada la naturaleza dinámica de la radiación solar sobre un FPSTC, durante las fases fuertemente transitorias que tienen lugar al principio y al final del día se producen desviaciones significativas de los modelos estacionarios. Aquí es más conveniente utilizar el modelo cuasi-dinámico descrito por la ecuación (1). En nuestra experimentación, el rendimiento cuasi-dinámico se mantiene en torno al 60% durante las 3 fases del día, un resultado muy similar al obtenido numéricamente por Rodriguez-Hidalgo et al. [9, 15, 16].

El rendimiento térmico cuasi-dinámico se obtiene de [17]:

$$\eta_{qd} = \eta_{0,qd} \frac{K_{dir}(\theta)G_{dir} + K_{dif}G_{dif}}{G} - \alpha_1 T^* - \alpha_2 T^{*2}G - \frac{a_c}{G} \frac{\partial(T_f)}{\partial t} - y_3 u T^* + y_4(E_L - \sigma T_{amb}^4) - y_6 u$$
(1)

En el rendimiento cuasi dinámico juega un papel fundamental el cuarto término de la ecuación (1), el cual tiene en cuenta los efectos inerciales de los elementos del sistema. En este sentido se ha calculado la inercia térmica global según la expresión (2) dada por la norma EN-12975-2:2006 para los elementos que ésta contempla: cubierta acristalada, absorbedor, líquido y aislamiento, pero sin aplicar el coeficiente de ponderación p_i indicado por la norma.

Inercia térmica EN-12975-2:2006:
$$I = C \cdot \Delta T = \sum_{i} p_{i} m_{i} c_{p,i} (T_{i+1} - T_{i})$$
 (2)

Capacidad térmica de cada elemento: $C_i = m_i c_{p,i} = v_i \rho_i c_{p,i}$ (3)

Donde la masa de cada elemento, m_i , está en kg y se ha obtenido del producto del volumen del elemento, v_i , en m³ y su densidad, ρ_i , en kg·m⁻³. Por lo tanto, el coeficiente de capacidad térmica de cada elemento, C_i que se da en kJ·m⁻²·K⁻¹ se obtiene de multiplicar su masa por su calor específico, $c_{p,i}$, en sus correspondientes unidades de kJ·kg⁻¹·K⁻¹.

Sin embargo, otros investigadores [15] añadieron a los elementos considerados por la norma, en sus experimentaciones, el efecto de la inercia térmica medida experimentalmente de la cámara de aire.

En esta investigación no sólo se ha tenido en cuenta los elementos contemplados en la norma y la cámara de aire, sino que además se ha tenido en cuenta el efecto de la





carcasa posterior. Los resultados pueden verse en la gráfica de la Fig. 1 y se pueden comparar con las medidas obtenidas en la bibliografía [15].

La instalación de FPSTC utilizada como banco de ensayos experimental consta de 2 captadores de modelos distintos instrumentalizados con 28 termopares tipo T, y otros sensores, y se describe con detalle por los autores en [14, 18, 19].

Para este estudio resultan necesarias las características de los captadores solares utilizados en esta instalación, detalladas en la Tabla 1. Con ellas se pueden valorar las capacitancias de los distintos componentes de un captador solar.

Parámetros					
	Captador solar 1	Captador solar 2			
Anchura captador	1.98 m	2.0 m			
Longitud captador	1.01m	1.0 m			
Espesor captador	1⋅10 ⁻¹ m	0.88∙10⁻¹ m			
Área de apertura	1.86 m²	1.89 m²			
Área de absorbedor	1.86 m²	1.91 m²			
Espesor cubierta transparente	3.2∙10 ⁻³ m	3.17∙10 ⁻³ m			
Espesor cámara aire	25•10⁻³_m	50•10 ⁻³ m			
Espesor de absorbedor	0.5·10 ⁻³ m (Al)	1.10 ⁻³ m (Cu)			
Diámetro exterior tubos	8·10 ⁻³ m	16⋅10 ⁻³ m			
	(11 tubos, Cu)	(8 tubos, Cu)			
Espesor tubos	0.4·10 ⁻³ m	0.5·10 ⁻³ m			
Espesor aislamiento	50·10 ⁻³ m	20·10 ⁻³ m			
	(Lana mineral 50kg/m²)	(Poliuretano expand.)			
Espesor carcasa externa	0.4·10 ⁻³ m (Aluzinc)	0.6·10 ⁻³ m (Acero galv.)			
α _{IR_cristal}	91.5%	89.0%			
ε _{IR_absorbedor}	5%	2.0%			
Factor de eficiencia, η_0	80.6%	84.4%			
Coeficiente transmisión calor, α_1	4.712	0.836			
Coef. dependencia temperatura α_2	0.0156				
Parámetro cristal para K _b , b ₀ [20]	0.1	0.1			
Flujo caloportador	agua pura	agua pura			

Tabla 1 - Parámetros principales de los captadores

A partir de éstas se estudia la reducción en la ganancia de calor útil debida a efectos de inercia térmica. La capacitancia o capacidad térmica de cada elemento, como se relaciona en la ecuación (3). En el caso concreto de la capacidad térmica del cristal hay que tener además en cuenta el factor de emitancia (ϵ = 1- α = 1- 0.915) del 8,5%, por el que se corrige su contribución a la inercia térmica global del captador multiplicándola por el coeficiente a₁=0.13 [21]¹

3. Resultados y discusión

La influencia de cada coeficiente de capacidad térmica sobre el coeficiente global, se muestra en la Tabla 2. Sobre ellos no se han aplicado los coeficientes de ponderación indicados en la norma [17] que previamente fueron obtenidos semiempíricamente, como se recoge en la bibliografía [21]. Estos resultados se comparan con los

¹ P. 270 Duffie Tabla 6.10.1. una cubierta y un ε =0.1 del mismo orden que ε =0.085

V CONGRESO ENCUENTRO DE INGENIERÍA DE LA ENERGÍA DEL CAMPUS MARE NOSTRUM Murcia 23 al 26 de noviembre de 2020





obtenidos por Rodriguez-Hidalgo [16] tanto experimentalmente como aplicando la norma EN-112975-2:2006 a su modelo de simulación.

	EN-12975:2006 [17]	Rodríguez-Hidalgo [16]	$C_i = m_i c_{p,i} = v_i \rho_i c_{p,i}$
Cubierta cristal	4,25%	3,10%	9,21%
Absorbedor	28,09%	17,60%	19,53%
Liquido interno	48,63%	29,90%	33,82%
Aislamiento	19,03%	28,00%	26,47%
Aire interior			0,29%
Carcasa posterior			10,67%

Tabla 2 - Comparativa de influencias del coeficiente de capacitancia de cada elemento sobre el coeficiente global

La principal conclusión es que en los tres casos, el efecto del absorbedor y el efecto del aislamiento sobre el sistema son similares aunque se utilicen materiales diferentes, mientras que la cubierta de cristal en el caso de Rodríguez-Hidalgo tiene una mayor importancia.

Lo que está más claro es que el parámetro más influyente en cualquiera de los estudios planteados es la inercia térmica del fluido y ésta, en instalaciones idénticas sometidas a condiciones reales de operación, sólo puede verse afectada por la densidad del fluido, por lo que ya se están preparando experimentaciones con aditivos que modifiquen esta variable del líquido caloportador en el Laboratorio Solar de la Universidad de Murcia.

Así mismo, se ha encontrado que el efecto en la inercia térmica total del FPSTC producida por la cubierta posterior del captador solar no es en absoluto despreciable ya que, experimentalmente, no se puede hacer la suposición de que el aislamiento sea ideal impidiendo por completo el paso del calor en esa dirección.

Este resultado puede visualizarse en las Figuras 1 y 2 obtenidas a partir de las diferencias de temperaturas medias a intervalos de 10 minutos según la ecuación (3). En ellas puede observarse que cuando más influencia tienen estos efectos es en las primeras horas de la mañana, hasta más o menos el medio día solar en un día considerado representativo. Se ha considerado representativo un día en que la irradiancia global, directa y difusa muestran una distribución suave, asimilable a un día claro, como fue el día 22 de junio de 2017. En la Fig.2 se representan estas irradiancias tomadas de AEMET para la zona concreta en que está situada la instalación experimental. La evolución de las temperaturas medidas en cada elemento (Fig.3a) a lo largo de las horas de luz solar del día representativo que se ha estudiado se muestra en la Fig. 3b.





Fig. 1 – Inercia térmica de cada componente comparado con la evolución de la temperatura de cada uno. Captador solar 1. Día representativo: 22 de junio de 2017.



Fig. 2 – Inercia térmica global medida (2), comparada con la inercia directa, difusa y global obtenida de AEMET. Captador solar 1. Día representativo: 22 de junio de 2017.







Fig. 3b – Evolución de temperaturas de cada componente de un FSPTC a lo largo del día representativo: 22 de junio de 2017.

Se observa experimentalmente en las Figs. 1 y 2 el efecto de la inercia térmica del cristal, absorbedor y fluido sobre el rendimiento del captador en la primera fase transitoria del día, hasta que se estabiliza la temperatura y la irradiancia. Además se aprecia que tanto el aislamiento como la cubierta posterior tienen un efecto perceptible sobre la inercia del conjunto, al contrario que la cámara de aire del interior del captador. El efecto de la cubierta posterior sobre la inercia global es del mismo orden de magnitud que el del aislamiento, por no ser éste un aislamiento ideal como el considerado en publicaciones especializadas, es por esto que también debe tenerse en cuenta, según los resultados de esta investigación, a la hora de realizar previsiones de comportamiento térmico.

Por lo tanto, dado que no todos los efectos de estos elementos están contemplados en la norma, se propone que al menos el cristal, aislamiento y cubierta posterior sí sean tenidos en cuenta en la misma.





La relación porcentual entre la inercia térmica de cada componente y el total de la inercia térmica global del captador se detalla, en intervalos de 10 minutos, en la Fig. 4. Se observa que, en las primeras horas del día, y en las últimas, cuando los efectos inerciales son más influyentes por tratarse de las fases transitorias del experimento, los elementos más influyentes son la cubierta de cristal, el líquido y el absorbedor. Conforme va avanzando el día, estos dos últimos van adquiriendo más importancia, restándose a la cubierta posterior, que deja de tener influencia apreciable en las horas centrales del día. Cabe destacar que en todo momento se mantiene constante la contribución a la inercia térmica del aislamiento posterior y del absorbedor.





Mediante las Figuras 1 a 4 puede observarse que la contribución de los efectos de inercia térmica del cristal, si bien no son demasiado altos en la fase estacionaria, sí son más influyentes en la fase transitoria, por lo que debe ser tenido en cuenta también cuando se realicen previsiones de temperaturas basándose en la inercia térmica del captador.

3.1 Conveniencia o no de aumentar el número de secciones de medición

Para obtener los resultados de este apartado, se han obtenido mediciones de temperaturas en cuatro secciones de medición del captador solar separadas 60 cm a lo largo de su longitud. Con ellas se ha obtenido una temperatura media representativa de cada elemento, con cuya variación a lo largo del tiempo se ha obtenido cada inercia térmica. Sin embargo, cabe pensar que cuatro secciones podrían no ser suficientes para determinar la temperatura media de cada elemento.





A la vista de los resultados expuestos en el apartado anterior, al tratarse de una evaluación de la capacidad térmica de cada elemento C_i (3) y la inercia térmica global I (2) de modo experimental en la que es necesario separar el efecto producido por el conjunto formado por la placa y los tubos del efecto producido por el fluido caloportador, la formulación se complica bastante, por lo que se suele llevar a cabo una simplificación [17, 21].

Sin embargo, si se aprovecha la gran cantidad de mediciones de temperatura experimentales que se han tomado en esta investigación se ha fraccionado el captador en las cuatro secciones de medida, en las que se puede distinguir entre temperatura del absorbedor [14] y del fluido. Con ellas se ha comprobado si (Fig. 5):

- $\partial T_{i}/\partial t = \partial T_{f,i}/\partial t$ es igual en cada sección *i* (T_{i} : temperatura de placa absorbedora en cada sección; $T_{f,i}$: temperatura del fluido en cada sección)
- $\partial T_i / \partial t$ es igual en las distintas secciones *i*
- $\partial T_{f,i}/\partial t$ es igual en las distintas secciones *i*





V CONGRESO ENCUENTRO DE INGENIERÍA DE LA ENERGÍA DEL CAMPUS MARE NOSTRUM Murcia 23 al 26 de noviembre de 2020



A la vista de estos resultados se concluye que tanto $\partial T_{mp,i}/\partial t \mod \partial T_{f,i}/\partial t$ varían igual en las 4 secciones de medición las cuales, por fenómenos de re-radiación alcanzan un máximo y después disminuyen. Además, si se compara la variación de temperaturas del absorbedor con la del fluido caloportador, $\partial T_{mp,i}/\partial t - \partial T_{f,i}/\partial t$, se observa que son iguales puesto que su diferencia se mantiene en torno a 0 en las 4 secciones. Además la variación de las diferencias de temperatura del absorbedor y del fluido en un instante de medición y el instante siguiente, $\partial T_{mp,i+\partial t}/\partial t - \partial T_{mp,i}/\partial t$ y $\partial T_{f,i+\partial t}/\partial t - \partial T_{f,i}/\partial t$ respectivamente, también se mantienen iguales a 0 a lo largo de todo el día, por lo que puede hacerse una buena aproximación si se considera que el incremento de temperaturas de ambos elementos es casi lineal.



Fig. 6 – Comparación de variación de temperatura de cada sección de medición. Captador solar 1

Si se compara la curva de la variación de temperaturas de cada sección del absorbedor se observa que es dos órdenes de magnitud por debajo de la precisión de los instrumentos de medida, por lo que prácticamente se superponen con un valor casi nulo (Fig. 6). Se puede concluir que no es necesario hacer una mayor discriminación entre secciones de medición en el captador solar.

3.2 Previsión de temperaturas utilizando el estudio propuesto de inercia térmica y el estudio estandarizado.

Como se ha dicho, una mejor aproximación de la influencia que tiene cada elemento en la inercia térmica global de un FPSTC permitiría llevar a cabo mejores previsiones de temperatura, ya que obtiene el dato $m \cdot C$ de la expresión (4) propuesta por Duffie et al. [21] para realizar previsiones de temperaturas del fluido de salida de un captador.

$$T_{p}^{+} = T_{f,e} + \frac{S}{U_{L}} \left[1 - e^{\left(-\frac{AU_{L}t}{(mC)_{e}} \right)} \right]$$
(4)

Conocidos todos los elementos de la ecuación (4) se ha realizado un estudio comparativo entre la previsión de temperaturas utilizando la inercia del modo indicado





en la norma europea [17], es decir, minorando el efecto del cristal y sin tener en cuenta la cubierta posterior; y la previsión de temperaturas utilizando la inercia propuesta, es decir, incluyendo los elementos anteriores. Ambas medidas se pueden observar en la Fig. 7, cuyos marcadores cuadrados para el día 22 de junio de 2017 representan los resultados obtenidos utilizando T_m (EN-12975:2006). En la misma gráfica se ha representado con marcadores triangulares la temperatura real medida en la placa absorbedora, T_{mp} [14]. Todos los puntos representados en esta gráfica se han obtenido promediando los 60 datos tomados en cada hora.



Fig. 7 – Comparación de previsiones de temperaturas de absorbedor a una hora vista.

A la vista de los resultados puede concluirse, que los resultados de previsión de temperaturas utilizando la inercia propuesta están por encima de resultados obtenidos a través de las indicaciones de la norma, por lo que si se incorporaran estas consideraciones a la norma se mejoraría la precisión de los resultados. Sin embargo, las diferencias entre las mediciones de temperaturas entre los dos métodos son muy pequeñas, de aproximadamente 1°C, por lo que no es necesaria una modificación sustancial de la norma.

4. Conclusiones

El estudio de la inercia térmica de un captador solar térmico de baja temperatura (FPSTC) que se ha llevado a cabo en este trabajo tiene la virtud de poner en valor algo que no se ha encontrado en la literatura científica, ni simulado ni experimentalmente, y permite proponer captadores con diferente morfología para buscar una inercia/capacitancia más adecuada. Es decir, si interesa que la temperatura en los tubos crezca más o menos rápidamente, se pueden variar parámetros como el espesor de placa o tubos, tipo de aislamiento o incluso sustancias con cambio de fase, etc.

En concreto se ha obtenido la distribución de medidas experimentales de temperatura de cada elemento de un FPSTC a lo largo de un día que se ha tomado como





representativo en términos de evolución suave de medidas de la irradiancia directa, difusa y global. Se ha visto que con 4 puntos de medida uniformemente repartidos a lo largo del captador, para cada elemento, es suficiente para extraer su temperatura media representativa.

Con estos datos se ha calculado la inercia térmica de cada uno de los elementos y, comparando con la literatura científica y con la norma EN-12975-2:2006, se ha visto experimentalmente que no se deberían aplicar correcciones tan grandes a los valores de la capacidad térmica de algunos de los elementos como el cristal, que queda regada su influencia en torno al 4%, cuando experimentalmente se obtiene una influencia del 10%. Además otro elemento que no se tiene en cuenta es la cubierta posterior, que tiene una influencia de en torno al 10% de la inercia térmica global debido a que el aislamiento no es ideal.

5. Referencias

- [1] K. Balaji, S. Iniyan, V. Muthusamyswami, Experimental investigation on heat transfer and pumping power of forced circulation flat plate solar collector using heat transfer enhancer in absorber tube, Applied Thermal Engineering, 112 (2017) 237-247.
- [2] K. Balaji, A.I. Khan, P.G. Kumar, S. Iniyan, R. Goic, Experimental analysis on free convection effect using two different thermal performance enhancers in absorber tube of a forced circulation flat plate solar water heater, Solar Energy, 185 (2019) 445-454.
- [3] W.M. El-Maghlany, A.A. Minea, Novel empirical correlation for ionanofluid PEC inside tube subjected to heat flux with application to solar energy, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 135 (2019) 1161-1170.
- [4] A.A.A. Arani, M. Kazemi, Analysis of fluid flow and heat transfer of nanofluid inside triangular enclosure equipped with rotational obstacle, Journal of Mechanical Science and Technology, 13.
- [5] M. Kalteh, A. Abbassi, M. Saffar-Avval, J. Harting, Eulerian-Eulerian two-phase numerical simulation of nanofluid laminar forced convection in a microchannel, International Journal of Heat and Fluid Flow, 32 (2011) 107-116.
- [6] A. Bejan, General criterion for rating heat-exchanger performance, International Journal of Heat and Mass Transfer, 21 (1978) 655-658.
- [7] G. Sandhu, K. Siddiqui, A. Garcia, Experimental study on the combined effects of inclination angle and insert devices on the performance of a flat-plate solar collector, International Journal of Heat and Mass Transfer, 71 (2014) 251-263.
- [8] G. Sandhu, K. Siddiqui, Investigation of the fluid temperature field inside a flat-plate solar collector, Heat and Mass Transfer, 50 (2014) 1499-1514.
- [9] M.C. Rodriguez-Hidalgo, P.A. Rodriguez-Aumente, A. Lecuona, G.L. Gutierrez-Urueta, R. Ventas, Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation, Applied Thermal Engineering, 31 (2011) 2394-2404.
- [10] B.S. Petukhov, A.F. Polyakov, Heat Transfer in Turbulent Mixed Convection, Hemisphere Publishing Corporation1988.
- [11] A. Bejan, Convection heat transfer, Second Edition ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
- [12] Y.A. Çengel, Heat and Mass Transfer, Third ed., México, 2007.
- [13] M. Seco-Nicolás, M. Alarcón García, F. Alhama, Thermal behavior of fluid within pipes based on discriminated dimensional analysis. An improved approach to universal curves, Applied Thermal Engineering, 131 (2018) 54-69.
- [14] M. Seco-Nicolás, M. Alarcón García, J.P. Luna-Abad, Experimental calculation of the mean temperature of flat plate thermal solar collectors, Results in Engineering, 5 (2020) 100095.





- [15] M.C. Rodriguez-Hidalgo, P.A. Rodriguez-Aumente, A. Lecuona, G.L. Gutierrez-Urueta, R. Ventas, Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions part II: Model application and design contributions, Applied Thermal Engineering, 31 (2011) 2385-2393.
- [16] M.C. Rodriguez-Hidalgo, P.A. Rodriguez-Aumente, A. Lecuona, J. Nogueira, Instantaneous performance of solar collectors for domestic hot water, heating and cooling applications, Energy and Buildings, 45 (2012) 152-160.
- [17] AENOR, Thermal solar systems and components. Solar collectors. Part 2: Test methods, Sistemas solares térmicos y componentes, AENOR, Madrid, 2006, pp. 131.
- [18] M. Seco-Nicolás, M. Alarcón García, J.P. Luna Abad, Study of convective coefficient absorber plate-air chamber in a low temperature solar thermal collector, in: EditUM (Ed.) IV Encuentro de la Ingeniería de la Energía del Campus Mare Nostrum, Murcia, Spain, 2018.
- [19] M. Seco-Nicolás, M. Alarcón García, J.P. Luna-Abad, Implantación de un sistema de termometría en captador solar térmico y representación gráfica 3D de temperaturas, in: E.D.d.I.U.d. Murcia (Ed.) III Encuentro de Ingeniería de la Energia del Campus Mare Nostrum, DIGITUM, Murcia, Spain, 2016, pp. 360-368.
- [20] T. Beikircher, M. Moeckl, P. Osgyan, G. Streib, Advanced solar flat plate collectors with full area absorber, front side film and rear side vacuum super insulation, Solar Energy Materials and Solar Cells, 141 (2015) 398-406.
- [21] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes 4^a ed., John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2013.





Comités del V Congreso Encuentro de Ingeniería de la Energía del Campus Mare Nostrum

Comité organizador

Mariano Alarcón García (Presidente) Manuel Seco Nicolás Francisco del Cerro Velázquez Juan Pedro Luna Abad Alfonso P. Ramallo González Fernando Lozano Rivas

Comité científico

Alfonso P. Ramallo González (UM) Antonia Baeza Caracena (UM) Antonio González Carpena (UM) Antonio Urbina Yeregui (UPCT) Antonio Viedma Robles (UPCT) Félix Cesáreo Gómez de León Hijes (UM) Fernando Illán Gómez (UPCT) Francisco del Cerro Velázquez (UM) Francisco Vera García (UPCT) Gloria Alarcón García (UM) Gloria Villora Cano (UM) Joaquín Zueco Jordán (UPCT) José A. Almendros Ibáñez (UCLM) José Miguel Martínez Paz (UM) José Ramón García Cascales (UPCT) Juan Pedro Luna Abad (UPCT) Juan Pedro Montávez Gómez (UM) Manuel Lucas Miralles (UMH) Manuel Seco Nicolás (UM) Mariano Alarcón García (ÚM) Miguel Ángel Zamora Izquierdo (UM) Pedro J. Vicente Quiles (UMH) Teresa Maria Navarro Caballero (UM) Teresa Vicente Vicente (UM)

ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

ACTAS DEL CONGRESO V ENCUENTRO DE INGENIERÍA DE LA ENERGÍA DEL CAMPUS MARE NOSTRUM

PROCEEDINGS OF THE V MEETING OF ENERGY ENGINEERING OF CAMPUS MARE NOSTRUM

Editor

Mariano Alarcón García

Co-editor

Manuel Seco Nicolás

Murcia 2021