

COMPARATIVA EXPERIMENTAL ENTRE DOS CAPTADORES SOLARES TÉRMICOS DE DIFERENTE TOPOLOGÍA

SECO-NICOLÁS, Manuel⁽¹⁾; ALARCÓN GARCÍA, Mariano⁽¹⁾; LUNA ABAD, Juan Pedro⁽²⁾

manuel.seco@um.es

⁽¹⁾Universidad de Murcia. Grupo de Investigación de Ingeniería Energética e Innovación Docente en Tecnología. Departamento de Electromagnetismo y Electrónica de la Facultad de Química.

⁽²⁾Universidad Politécnica de Cartagena. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos.

RESUMEN

Se describe el procedimiento de toma de medidas de temperatura sobre dos placas absorbedoras de dos captadores solares térmicos de baja temperatura de topología distinta. Se determina el rendimiento térmico en base al calentamiento del agua que circula a través de los tubos de fluido caloportador unidos a dicha placa absorbedora mediante dos métodos diferentes, uno consistente en un tubo de cobre abrazado por la placa absorbedora y el otro, unido el tubo a la placa mediante soldadura. Con los sensores de temperatura calibrados se han registrado temperaturas a intervalos de 10 minutos mediante una unidad de adquisición de datos y se ha obtenido el rendimiento térmico en cada intervalo para ser comparado posteriormente.

Palabras clave: Captador solar térmico plano, mapa de temperaturas, rendimiento captador solar térmico.

1. Introducción

El objetivo de esta comunicación es el de describir el proceso seguido para realizar la medición de las temperaturas a lo largo y ancho de un tubo unido a una placa absorbadora de dos captadores solares térmicos planos de baja temperatura de topologías distintas, para comparar el rendimiento térmico de cada uno de ellos a lo largo de un día claro y soleado en la ciudad de Murcia (España). Uno de los captadores solares es de tubo abrazado a placa absorbadora, modelo PJR, y mientras que el otro es de tubo soldado a placa absorbadora, modelo GALEM VS2.0 (Figura 1).

El modo de determinar el rendimiento térmico de un captador solar plano de baja temperatura está ampliamente tratado en la bibliografía, siendo un referente el trabajo de Duffie & Beckman [1]. Desde entonces la mayoría de trabajos que se han realizado sobre captadores solares térmicos han girado en torno a dos vertientes principales: una vertiente teórica centrada en obtener simulaciones precisas de su comportamiento térmico, y otra vertiente experimental, muchas veces orientada a constatar la veracidad de las simulaciones propuestas.

En este sentido, Rodríguez Hidalgo et al. [2] realizaron ensayos experimentales en 2011 dirigidos a verificar un modelo unidimensional de comportamiento térmico de un captador solar utilizando métodos analíticos. Pero ha habido multitud de otros trabajos experimentales tanto en condiciones de laboratorio [3] como en condiciones reales [4, 5].

Existen diversos tipos de captadores solares térmicos planos en el mercado, fijándonos en este trabajo en aquellos que constan de una superficie plana unida a una parrilla de tubos, la placa absorbadora. Uno de los tipos más frecuentes, propio de colectores de cierta antigüedad, es aquel en el que en la que la unión chapa plana se conformaba para abrazar al tubo por el que circula el fluido caloportador; ambos elementos, chapa y tubo podían ser de materiales cualesquiera. Otro tipo, mucho más frecuente en la actualidad, es aquel en el que la chapa está unida por soldadura a los tubos, lo que tiene ventajas de fabricación; en la actualidad es posible soldar incluso metales a priori difíciles para ser unidos, como cobre y aluminio. El objeto de este trabajo es precisamente estudiar el diferente comportamiento de ambos tipos de captadores, lo que en cierta forma es analizar la diferente efectividad de ambos tipos de uniones tubo-chapa.

En esta comunicación se aportan los datos de temperaturas y rendimientos térmicos obtenidos en un día soleado de agosto de 2016 para dos captadores solares de diferente construcción utilizados en la red doméstica para el mismo propósito de obtener agua caliente sanitaria (ACS).

Para llevar a cabo las mediciones se han utilizado termopares tipo T construidos en el laboratorio y calibrados manteniendo la “cadena de medida” tal como se describe en el trabajo de Seco-Nicolás et al [6].

Nomenclatura:		<i>Subíndices</i>	
ρ	Densidad	s	Salida del sistema
c	Calor específico	e	Entrada al sistema
Q	Calor	f	Relacionado con el fluido
T	Temperatura		
η	Rendimiento		
R	Radio del tubo		
k	Conductividad térmica		
\dot{m}	Caudal		

2. Materiales y métodos

2.1. Sistemas estudiados

Se ha dispuesto de dos captadores solares térmicos planos fabricados con dos topologías diferentes. El Captador 1, formado por una superficie absorbadora de 8 tubos de cobre de $\varnothing 16$ mm a los que se ha abrazado mecánicamente una lámina de cobre de 2000x1200x2 mm; el Captador 2, consta de 11 tubos

de cobre de Ø8 mm soldados a una lámina de aluminio de 2000x1200x2 mm. La sección transversal de ambos sistemas se presenta en la Figura 1.

Como puede observarse, ambas configuraciones son muy distintas; la del Captador 1 es una configuración típica de colectores de cierta antigüedad [1], como ya se ha dicho, en la que la unión chapa plana-tubo, ambos de Cu, no es continua, ya que el contacto entre superficies metálicas deja huecos, donde la transmisión de calor puntual se reduce considerablemente; pese a esto, al abrazar casi semicircularmente la placa al tubo el número de puntos de contacto placa-tubo es elevado.

El Captador 2 es típico de los diseños más modernos, en los que la mejora de las técnicas de soldadura ha permitido realizar mediante ultrasonidos uniones entre materiales diferentes [7], en este caso Cu y Al, difíciles de soldar mediante procedimientos convencionales. Las uniones se realizan sin aportación de material, y el resultado es una hilera de puntos de unión más o menos cercanos, que producen el contacto térmico placa absorbidora-tubo. Esta técnica es más interesante para la fabricación en serie de captadores solares.

Se ha dispuesto de dos captadores solares térmicos planos fabricados con dos topologías diferentes. El Captador 1, formado por una superficie absorbidora de 8 tubos de cobre de Ø16 mm a los que se ha abrazado mecánicamente una lámina de cobre de 2000x1200x2 mm; el Captador 2, consta de 11 tubos de cobre de Ø8 mm soldados a una lámina de aluminio de 2000x1200x2 mm. La sección transversal de ambos sistemas se presenta en la Figura 1.

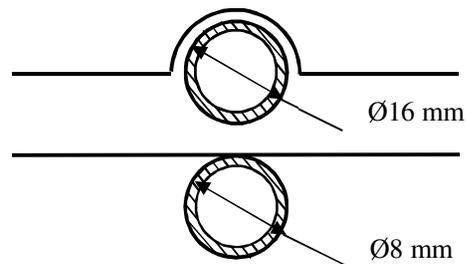


Figura 1 - Sección transversal de un conjunto tubo-placa del Captador 1, placa absorbidora abrazada a tubo [arriba]. Sección transversal de Captador 2, placa soldada a tubo de cobre [abajo].

Como puede observarse, ambas configuraciones son muy distintas; la del Captador 1 es una configuración típica de colectores de cierta antigüedad [1], como ya se ha dicho, en la que la unión chapa plana-tubo, ambos de Cu, no es continua, ya que el contacto entre superficies metálicas deja huecos, donde la transmisión de calor puntual se reduce considerablemente; pese a esto, al abrazar casi semicircularmente la placa al tubo el número de puntos de contacto placa-tubo es elevado.

El Captador 2 es típico de los diseños más modernos, en los que la mejora de las técnicas de soldadura ha permitido realizar mediante ultrasonidos uniones entre materiales diferentes [7], en este caso Cu y Al, difíciles de soldar mediante procedimientos convencionales. Las uniones se realizan sin aportación de material, y el resultado es una hilera de puntos de unión más o menos cercanos, que producen el contacto térmico placa absorbidora-tubo. Esta técnica es más interesante para la fabricación en serie de captadores solares.

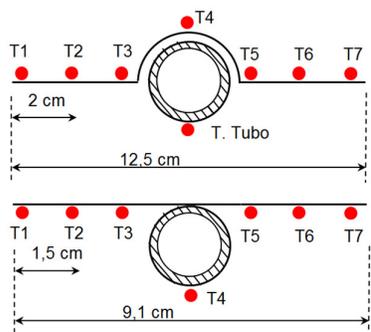


Figura 2 - Disposición termopares en cada sección del Captador 1 (arriba) y Captador 2 (abajo)

El circuito cerrado hidráulico cuenta con un caudalímetro para cada captador solar térmico plano, una bomba de recirculación, sondas de temperatura, válvulas de operación, y un circuito secundario dotado de depósito de almacenamiento y radiador a modo de serpentín de refrigeración. La instalación experimental cumple sustancialmente con la norma UNE-EN 12975-2 [8].

La instrumentalización consiste en la instalación, en cada captador solar, de cuarenta termopares tipo T situados en la superficie absorbidora y dos termopares tipo K situados en contacto con el fluido a la entrada y salida del tubo de alimentación de fluido caloportador. Los termopares tipo K han sido dispuestos a contracorriente tal como indica la norma UNE-EN 12975-2,

mientras que los termopares tipo T se han agrupado en cuatro secciones transversales a lo largo del tubo, de modo que quedasen dispuestos en una línea de siete termopares en cada sección según la Figura 2. Cada uno de los mencionados termopares se ha calibrado siguiendo las indicaciones del procedimiento TH-003 para la calibración por comparación de termopares [9].

Los datos se han recogido en 40 intervalos de 10 minutos a lo largo del día 17 de agosto de 2016 aprovechando la variación de la irradiancia solar para realizar el muestreo de toma de temperaturas a distintas irradiancias. Dichas irradiancias se han medido utilizando un piranómetro sobre plano horizontal, por lo que se ha corregido posteriormente la medida de la irradiancia considerando el ángulo de inclinación de los captadores solares [1]. Para realizar la medición y comparar datos homogéneos se ha mantenido un caudal constante idéntico en ambos captadores $\dot{m} = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Los datos se tomaron mediante una unidad de adquisición de datos, y se han corregido conforme a las curvas de calibración obtenidas por el mencionado procedimiento.

2.2. Fundamentos físicos

Como es sabido, la ecuación que define la transmisión del calor entre la placa sometida a un calor constante unida a un tubo y el flujo en régimen laminar que circula a través del mismo, es

$$\dot{Q} = \dot{m} c_f (T_s - T_e) \quad (1)$$

En la Tabla 1 se muestran las propiedades térmicas del fluido, que varían en función de la temperatura que éste puede alcanzar en el interior: entre 0°C y 100°C; en la Tabla 2 se lee el rango de valores experimentales de trabajo de los dos captadores solares térmicos.

Tabla 1: Propiedades térmicas del fluido

Variable	Valor a 0°C	Valor máximo a 100°C	Unidad
ρ_f	958,05	999,82	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
c_f	$4,186 \cdot 10^3$	$4,186 \cdot 10^3$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
μ	$1,781 \cdot 10^{-3}$	$0,282 \cdot 10^{-3}$	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

Tabla 2: Rango de valores de trabajo de los Captadores 1 y 2; el subíndice i hace referencia a cada tubo del correspondiente captador solar.

	Captador 1	Captador 2	
\dot{m}_{total}	$1,57 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
\dot{m}_i	$1,96 \cdot 10^{-6}$	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
R_i	$8 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	m
v_i	0,010	0,026	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\text{Re} = \rho_{\text{med},f} v_i 2 R_i / \mu_{\text{media}}$	158	206	

Conocidas las propiedades térmicas del fluido para cada temperatura y conocidas las temperaturas de entrada y salida del mismo, se podrá obtener el rendimiento que se define con la conocida relación [1]

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_C} \quad (1)$$

3. Resultados

3.1 Campo de temperaturas en el captador solar: aletas y tubo

En primer lugar se ha recogido la medición experimental del campo transversal de temperaturas de ambos sistemas, a fin de poder compararlos para comprobar los efectos de las diferentes topologías constructivas. Los gráficos comparativos resultantes se muestran en la Figura 3, correspondientes a una sección de la placa absorbadora transversal a los tubos y flujo de agua. Se aprecia como la temperatura en el tubo, punto central, es en ambos casos inferior a la temperatura en el resto de la placa absorbadora cuyas temperaturas representan los puntos a derecha e izquierda del central. Este perfil de temperaturas es idéntico al recogido en la literatura [1], e indica que la placa absorbadora trabaja como unas aletas que vehiculan el calor absorbido hacia el tubo por el que circula el agua, que, al absorber calor, refrigera esta parte de la placa absorbadora, provocando la depresión típica de la temperatura en las aletas.

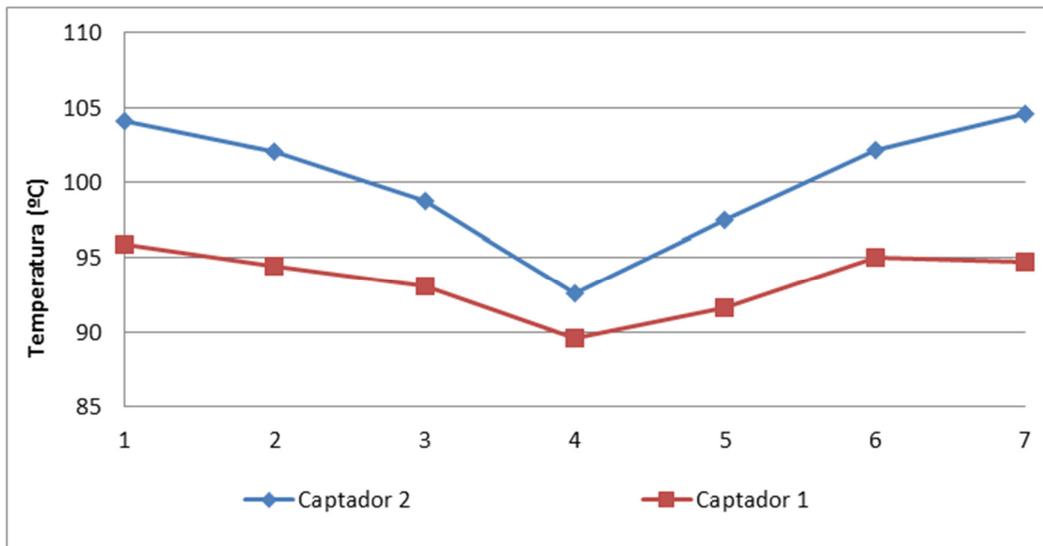


Figura 3 - Comparación de temperaturas en sección 1 de salida de agua caliente de ambos sistemas.

Día: 17-agosto-2016; Hora: 14:07; $\dot{m} = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Irradiancia = $1157 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

En esta Figura 2 se observa que, cuando ambas superficies de placa son irradiadas con la misma intensidad, en este caso a 1157 W/m^2 , los sensores de temperatura muestran que hay una diferencia de alrededor de 10°C entre la configuración de los sistemas 1 y 2. Por lo tanto, una primera observación es que las características constructivas del Captador 2 le permiten alcanzar mayores temperaturas, y dado que el flujo másico es el mismo en ambos colectores, recoger mejor el calor que la configuración del Captador 1.

Si se compara el salto de temperaturas de cada uno de los seis puntos de medición en la superficie captadora, numerados del 1 al 6 con el punto de medición T.Tubo, situado bajo el tubo (ver Figura 2), se obtendrá la diferencia de temperaturas relativa sobre la que influye la tipología constructiva de

ambos captadores solares planos cuando por el mencionado tubo circula el mismo fluido caloportador con un caudal idéntico $\dot{m} = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

En la tabla 3 se muestran las diferencias de temperatura y los saltos relativos de temperaturas comparadas con la medida de temperatura del tubo en cada sistema.

Tabla 3: Saltos relativos de temperatura en sistemas 1 y 2.

Tabla 4: Día: 17-agosto-2016; Hora: 14:07; $\dot{m} = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Irradiancia = 1157 W·m-2

Puntos de medida	T (°C) Captador 1	T (°C) Captador 2	T _i -T ₄ (°C)	
			Sist. 1	Sist. 2
T1	95,86	104,08	6,23	11,46
T2	94,43	101,41	4,80	8,79
T3	93,05	98,74	3,42	6,12
T4	89,63	92,62	0	0
T5	91,63	97,50	2,00	4,88
T6	95,05	101,04	5,42	8,42
T7	94,75	104,58	5,12	11,96

Se observa un mayor salto de temperaturas entre la temperatura medida en la placa absorbadora y la parte inferior del tubo en el Captador 2 frente al Captador 1. En primera aproximación puede considerarse que la temperatura medida en la pared inferior del tubo, que es la más alejada de la chapa, y más refrigerada por el fluido caloportador en cada sección, coincide con la temperatura del fluido circulante por el interior del tubo. En realidad el fluido caloportador actúa realmente como un fluido refrigerante de la placa absorbadora, como un sumidero de calor, y una mayor diferencia de temperaturas chapa-tubo indica una mejor transmisión de calor entre ambos elementos.

Por tanto, a la vista de la Tabla 2 que indica que la temperatura máxima absorbida por el fluido caloportador en el Captador 1 ha sido de 6,23°C y en el Captador 2 ha sido de 11,96°C, no hay duda de que el método de construcción del Captador 2 produce una mejor transmisión de temperatura de la placa al fluido, frente a la unión abrazada del Captador 1. Esto puede ser debido a la alta resistencia térmica que se produce en la inevitable capa de aire que se forma en la unión por conformado mecánico de la placa y el tubo del Captador 1, frente a la baja resistencia térmica que produce la unión limpia que forma el cordón de soldadura en el Captador 2.

Por otra parte, también se aprecia como las temperaturas de las secciones a la misma altura del Captador 2 son superiores a las del Captador 1, lo que, dado que las temperaturas de entrada y los caudales son idénticos en ambos sistemas, como se explica en el subapartado siguiente, el Captador 2 adquiere más calor y consigue mejor rendimiento que el Captador 1.

3.2 Comparativa de rendimientos de los captadores solares

Con objeto de realizar un estudio más completo se ha llevado a cabo un balance energético global de ambos sistemas constructivos para determinar de forma definitiva cuál de las dos configuraciones produce unos rendimientos térmicos mayores.

Las ecuaciones 1 y 2 establecen que el salto térmico en el captador solar en su conjunto, $T_s - T_e$, a igualdad de otros parámetros, es el que nos da el calor útil absorbido por el captador. En la Figura 4 se ha representado el aumento gradual de las temperaturas de salida, T_s , del fluido de ambos sistemas,

que sigue la misma tendencia que la de la energía aportada a los mismos, aunque con cierto retraso en el cambio de estas tendencias debido a los efectos de la inercia térmica.

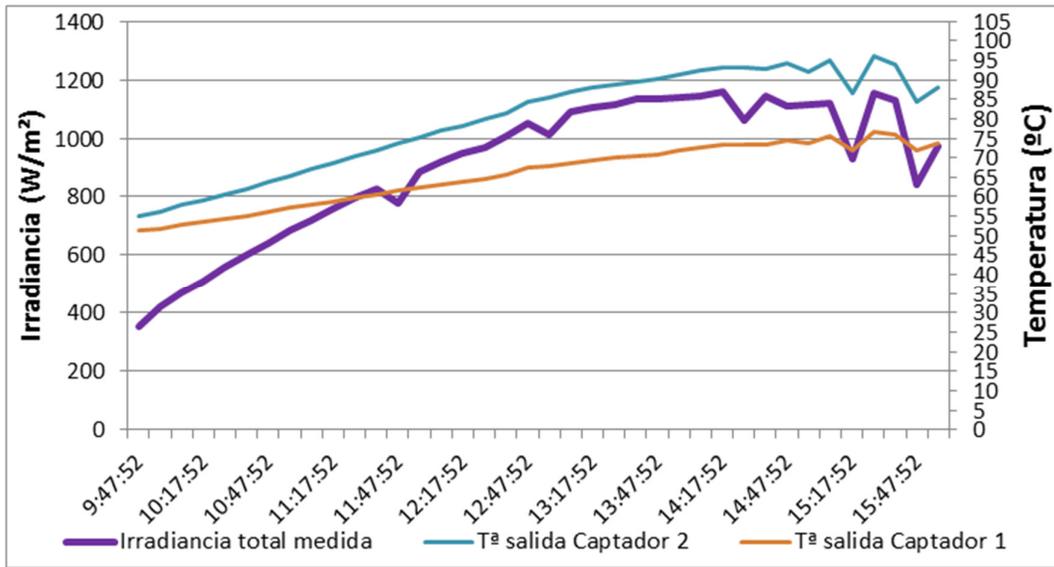


Figura 4 - Temperaturas de salida de las instalaciones. Comparación con irradiancia aportada

Se observa también que la temperatura de salida del Captador 2 es mayor que el del Captador 1 cuando ambos son irradiados con la misma intensidad, lo que está de acuerdo con las observaciones descritas en el subapartado anterior. También se observa que por las características constructivas del Captador 2 la temperatura de salida de este reacciona mucho más rápido que la del Captador 1 ante los cambios en la irradiancia.

Por otra parte, el calor máximo absorbido por la placa se obtiene de la medida de superficie de captación, es decir, de la placa; y de la irradiancia G_i , cuyo valor se ha modificado para cada intervalo de medición.

Obtenidas las mediciones corregidas de la temperatura de entrada y salida del fluido, T_e y T_s , respectivamente, en ambas sondas de medida, se puede determinar la densidad del agua circulante de los estudios de Pérez et al., 2010 [10] y el calor específico de Wilson et al., 2003[11]. Introduciendo todos los datos en la ecuación 1, se determina el calor obtenido por el fluido en cada instante de medición.

La introducción de los valores medidos experimentalmente en la ecuación 1, e introduciendo ésta en la ecuación 2 resulta

$$\eta = \left(\frac{\rho_f m C_{e,f} (T_s - T_e)}{A G} \right)_{i, \text{Sist.1 y Sist.2}} \quad \text{con } i = 1, \dots, 40 \quad (2)$$

Los valores de rendimiento de la ecuación 3, evaluados en 40 intervalos cada 10 minutos para ambas instalaciones se muestran comparados en la Figura 5.

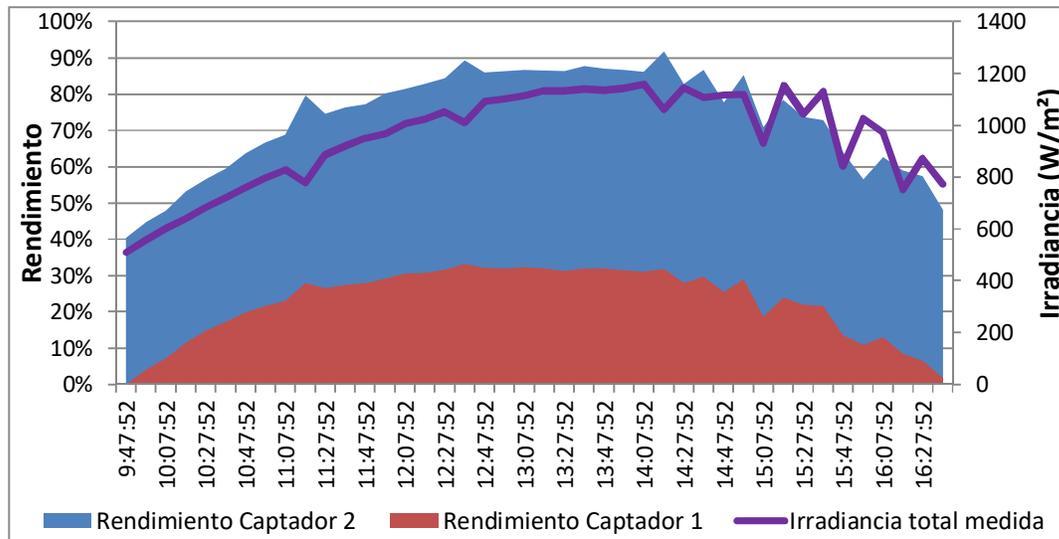


Figura 5 - Rendimientos de las instalaciones del Captador 1 y del Captador 2. Comparación con irradiancia aportada. Día: 17-agosto-2016; $\dot{m} = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Como ya podía presuponerse a la vista de los resultados de los datos de la sección de salida de la Tabla 3, se observa que, para un mismo perfil creciente de irradiancia, el rendimiento térmico proporcionado por el Captador 2 es muy superior al del Captador 1, lo que da la idea de que un captador solar térmico formado por un tubo soldado a una placa produce un resultado mucho más satisfactorio a efectos de rendimiento térmico que el sistema de placa abrazada a un tubo.

Estos resultados confirman las afirmaciones del subapartado anterior, en los que se afirmaba la superioridad de la unión soldada a la unión por conformado mecánico de placa y tubo, con la consiguiente introducción de una alta resistencia térmica en dicha unión.

Otro dato que llama la atención es que, en las mediciones de las 10:37, 11:37 y 13:27 h hay una pequeña disminución de la irradiancia que produce un aumento del rendimiento de ambos sistemas, a pesar de que se está disminuyendo la energía aportada.

La explicación de este aumento del rendimiento puede deberse a que, al ser un circuito cerrado, se genera una inercia térmica del sistema que mantiene a una cierta temperatura el fluido recirculante incluso con disminuciones puntuales de la energía aportada (ver Figura 4). Es decir, que la diferencia de temperaturas del numerador de la ecuación 3 se mantiene constante, mientras que el denominador baja, produciendo un aumento puntual ficticio del rendimiento de ambos sistemas.

Es por esto que se ha visto conveniente realizar un gran número de medidas y de cálculo de rendimientos instantáneos para poder ofrecer una comparación fiable.

4. Conclusiones

Se han llevado a cabo ensayos experimentales sobre dos tipos de captadores solares térmicos planos en una instalación que cumple la norma UNE-EN 12975-2. Las placas absorbedoras son en ambos casos del tipo parrilla; uno de estos captadores está formado por una placa abrazada a los tubos del fluido caloportador, mientras que en el otro la placa está soldada a los tubos. Con objeto de comparar las prestaciones de ambos captadores por ambos circula igual caudal.

Se ha obtenido el campo de temperaturas del captador, expresado en el perfil de temperaturas en una sección análoga de ambos captadores; el perfil presenta una depresión térmica típica en el tubo respecto a las aletas de la placa absorbidora, acorde a los resultados de la bibliografía. Esta depresión

es mucho más acusada en el captador de placa soldada, lo que indica una menor resistencia térmica aleta-tubo y, por tanto, una configuración más adecuada.

Igualmente se ha determinado el rendimiento térmico de ambos captadores a lo largo de un día con resultado análogo. En el caso del captador de placa abrazada a los tubos se obtienen rendimientos térmicos máximos en torno al 35%, mientras que en el de placa soldada se logran rendimientos máximos en torno al 85%.

Por lo tanto se puede concluir la topología constructiva de una placa y tubo directamente soldados es mucho más ventajosa a efectos de calor absorbido y rendimiento térmico, que la tecnología de unión por conformado mecánico.

5. Referencias

- [1] DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. (1980). Solar Engineering of Thermal Processes. University of Wisconsin-Madison, New Jersey.
- [2] RODRIGUEZ-HIDALGO, M.C., RODRIGUEZ-AUMETE, P.A., LECUONA, A. et al.(2011). "Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions.Parts I y II".
- [3] GURVEER, S., KAMRAN, S.(2014)."Investigation of the fluid temperature field inside a flat-plate solar collector". Heat Mass Transfer. 50:1499-1514.
- [4] AYOMPE LM, DUFFY A, Mc KEEVER M, CONLON M, MCCORMACK SJ. Comparative field performance study of flat plate and heat pipe evacuated tube collectors (ETCs) for domestic water heating systems in a temperate climate. Energy. 2011 May;36(5):3370-8. PubMed PMID: WOS:000291411400112.
- [5] HERRERO MARTÍN, R., PÉREZ-GARCÍA, J., GARCÍA, A., GARCÍA-SOTO, F.J., LÓPEZ-GALIANA, E. (2014) Simulation of an enhanced flat-plate solar liquid collector with wire-coil insert devices. Solar Energy.
- [6] SECO-NICOLÁS, M., ALARCÓN GARCÍA, M., LUNA ABAD, J.P. (2016) Proceso de fabricación y calibración de termopares tipo T. Representación gráfica de Temperaturas. III Encuentro de la Ingeniería de la Energía Campus Mare Nostrum. Murcia.
- [7] BERMEJO ROMERO, A., GONZÁLEZ LEAL, J:M., REQUENA GARCÍA, C. y JIMÉNEZ AGUINAGA, C., Investigación en Procesos de Unión para Elementos Captadores Solares. Congreso Científico Internacional de Ingeniería, Tetuán, 2010. ISBN-13: 978-84-693-0155-5.
- [8] AENOR. (2006) Thermal solar systems and components. Solar collectors. Part 2: Test methods. UNE EN 12975-2. Madrid
- [9] Centro español de metrología (2008). Procedimiento TH-003 para la calibración por comparación de termopares. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Madrid
- [10] PÉREZ ONES, O., DÍAZ RODRÍGUEZ, J., ZUMALACÁRREGUI, L.,GOZÁ LEÓN, O. (2010) Evaluation of physical properties of ethanolwater mixtures (II). Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquía. Issue 52, pp.62-74. Antioquía.
- [11] WILSON, J.D., BUFFA, A. J., LOU, B. (2003) Física. 5ª Ed. Pearson. Prentice Hall. México.