

## **MECHANISMS OF IMPROVED EFFICIENCY IN SOLAR THERMAL COLLECTORS THROUGH ARTIFICIAL ROUGHNESS TECHNIQUES**

Martínez García, Eva; Solano, Juan Pedro; García, Alberto  
Universidad Politécnica de Cartagena

The improvement of thermal efficiency in solar thermal collectors can be reached by the use of materials able to reduce heat losses by conduction, convection and radiation into the environment. Another methodology consists of diminishing the thermal resistance between the environment and the heat transfer fluid. This can be achieved through the increase of convective heat transfer in the tube side using artificial roughness techniques.

In this work, the potential of using twisted tapes in the parallel tubes of a solar thermal collector is explored in order to promote the enhancement of thermal efficiency, considering the increased demand of pumping power. A standard solar collector installation in a building is analysed and contrasted with an equivalent one with enhanced collectors. A discussion of the advantages about installed surface reduction is made as well as pumping power demanded by the system, economics and lower carbon dioxide emissions.

**Keywords:** solar thermal collectors; heat transfer enhancement; insert devices

## **MECANISMOS DE MEJORA DE LA EFICIENCIA EN COLECTORES SOLARES TÉRMICOS MEDIANTE TÉCNICAS DE RUGOSIDAD ARTIFICIAL**

La mejora de la eficiencia en colectores solares térmicos se puede conseguir mediante el empleo de materiales que reduzcan las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación hacia el entorno. Otra metodología es disminuir la resistencia térmica global mediante el aumento de la transferencia de calor convectiva en el lado tubo empleando técnicas de rugosidad artificial.

En este trabajo se explora el potencial de las muelles en espiral en los tubos de un colector solar de configuración en parrilla para promover mecanismos de mejora de la eficiencia térmica, considerando el aumento asociado de la potencia de bombeo. Se dimensiona, en primer lugar, una instalación con captadores solares estándar y posteriormente una con captadores solares mejorados. Se hace un análisis crítico sobre las ventajas de reducción de superficie instalada y disminución de potencia requerida por el sistema, así como el ahorro económico correspondiente y la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Palabras clave:** colectores solares térmicos; transferencia de calor mejorada; elementos insertados

Correspondencia: Eva Martínez García - [Evamartinezg82@gmail.com](mailto:Evamartinezg82@gmail.com)

## 1. Introducción

Los captadores solares térmicos se usan en edificación para preparar agua caliente sanitaria (ACS). En los sistemas convencionales se instalan una serie de captadores en las cubiertas de los edificios. El panel absorbedor de los captadores recoge una fracción de la radiación solar incidente y la transmite en forma de energía térmica a una serie de conductos en contacto directo con el panel. En el interior de los tubos existe un flujo continuo de fluido que absorbe la energía térmica disponible por convección y la lleva a un sistema de intercambio de calor (tanque de almacenamiento o intercambiador de placas), en donde se produce ACS para satisfacer los consumos demandados.

Para aumentar la eficiencia térmica de los captadores solares, las soluciones técnicas de mejora han venido tradicionalmente relacionadas con el uso de nuevos materiales de recubrimiento para el panel absorbedor para maximizar la radiación absorbida (Ienei et al., 2010; Dudita, Isac y Duta, 2012), o las mejoras en el vidrio para aumentar su transmitancia y reducir las pérdidas por radiación (Abbas et al., 2011; Ehrmann y Reineke-Koch, 2012). También se buscan materiales y soluciones constructivas que incrementen el aislamiento térmico en las partes lateral y trasera (Reim et al., 2005) o minimicen la resistencia térmica de contacto entre los conductos y el panel absorbedor, mediante nuevas configuraciones de conductos (Deng et al., 2013). Recientemente se viene investigando en el uso de nanofluidos para mejorar las propiedades térmicas de los fluidos caloportadores tradicionales (Lomascolo et al., 2015). En muchos casos, el incremento en el coste unitario por captador que supone el uso de las mejoras descritas anteriormente es un factor que dificulta su implementación a nivel comercial.

Comparativamente, los estudios centrados en aumentar los coeficientes de convección internos en los conductos de los captadores son escasos (Kumar y Prasad, 2000; Jaisankar, Radhakrishnan y Sheeba, 2009; Hobbi y Siddiqui, 2009). Sin embargo, el uso de elementos insertados para mejorar la transmisión de calor, de eficacia contrastada en intercambiadores de calor industriales, se presenta como una alternativa de bajo coste para incrementar la eficiencia de los captadores solares planos. En éstos, el flujo en los tubos solidarios al panel absorbedor es laminar para los gastos máxicos y fluidos de trabajo usados en las condiciones nominales de funcionamiento. Los autores han demostrado que la inserción de elementos del tipo muelles en espiral de geometría adecuada es capaz de promover una transición a régimen turbulento que incrementa sustancialmente los coeficientes convectivos de transmisión de calor y la eficiencia global (García, Herrero-Martín y Pérez-García, 2013; Herrero-Martín et al., 2011). Sin embargo, se deberá evaluar el incremento en la pérdida de carga que provocan estos elementos, para analizar si su uso compensa el aumento en la potencia útil extraída por los captadores.

Este trabajo presenta los resultados de un estudio de viabilidad del uso de captadores mejorados mediante muelles en espiral en una instalación de producción de ACS para un edificio de viviendas situada en Cartagena (Murcia). Los muelles se introducen manualmente en los tubos, en disposición coaxial, aprovechando la reducción del diámetro que experimentan al realizar una elongación mecánica. Cuando el muelle está introducido en el tubo, se anula la elongación de los mismos, recuperando su diámetro original y quedando fijados por contacto físico con la pared interior de los tubos. Este proceso de montaje antecede a la soldadura de los tubos con los distribuidores hidráulicos de entrada y salida a los colectores.

Se ha evaluado la superficie de captación necesaria para conseguir un mismo porcentaje de contribución solar con captadores estándar y mejorados, según los requerimientos del Documento Técnico HE-4 del Código Técnico de la Edificación (CTE). La menor área de captación requerida con el uso de captadores mejorados requerirá un menor número de

unidades. Se evalúa el impacto de este efecto sobre las pérdidas de carga en el circuito primario de la instalación y la correspondiente variación de potencia de bombeo requerida y en la reducción de CO<sub>2</sub>.

## 2. Metodología de cálculo

### 2.1 Cálculo de la contribución solar

La estimación de ACS necesaria en la edificación se calcula según las indicaciones del Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura (PET), que establece que la demanda de agua caliente viene dada por el volumen de consumo diario y las temperaturas de preparación y de red. Una vez hallado el consumo de ACS, la demanda mensual de energía  $D_{ACS}$  (J/mes) se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$D_{ACS} = n\rho VC_p(T_c - T_r) \quad (1)$$

donde:  $n$ , número total de personas;  $\rho$ , densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>);  $V$ , consumo mensual de ACS (m<sup>3</sup>/mes)  $C_p$  calor específico del agua (J/kg°C);  $T_c$ , temperatura agua de consumo (°C);  $T_r$ , temperatura agua de red (°C).

El cálculo de la energía media incidente en los captadores para un día-mes, se calcula como:

$$H'_{beta} = k_1 \times k_2 \times H_{beta} \quad (2)$$

donde:  $H'_{beta}$ , es la energía media incidente en los captadores;  $k_1$  es el coeficiente de corrección de claridad del cielo;  $k_2$ , es el coeficiente de corrección de no perpendicularidad de los rayos solares;  $H_b$ , es la radiación global recibida por el colector para un periodo considerado.

Para hallar la radiación media incidente en la superficie de los captadores, se recogen los datos de radiación global en la latitud en estudio, aplicando las correcciones de inclinación de colector, claridad del cielo y reflexión del terreno. De este modo, la radiación media diaria-mensual en el plano del captador se calcula como sigue:

$$I = H'_{beta}/h \quad (3)$$

donde:  $I$ , es la Irradiancia media diaria por unidad de superficie de captador,  $h$ , número de horas útiles diarias.

La energía mensual disponible por unidad de superficie de captador se halla como:

$$E_{disp} = \eta \times k_3 \times H'_{beta} \times N \quad (4)$$

donde:  $E_{disp}$ , energía media mensual disponible,  $N$ , número de días del mes en cálculo,  $k_3$  es el coeficiente de pérdidas en acumuladores y  $\eta$ , es el rendimiento de los captadores solares que según la norma UNE-EN 12975-2 se correlaciona con la expresión del tipo :

$$\eta = \eta_{0A} - \alpha_{1A} \cdot T_m^* \quad (5)$$

donde:  $\eta_{0A}$ , coeficiente de ganancias,  $\alpha_{1A}$ , coeficiente de pérdidas,  $T_a$ , la temperatura media ambiente,  $T^*$ , es la temperatura reducida  $T^* = (T_c - T_a)/I$ ;  $\eta$  es el rendimiento del captador solar.

Normalmente, las curvas de rendimiento para un captador estándar vienen dadas por el fabricante. En este estudio las curvas del captador mejorado se han obtenido en trabajos

previos de los autores (García, Herrero-Martín y Pérez-García, 2013), mediante la realización de ensayos según UNE-EN-12975-2.

Finalmente, el porcentaje de contribución solar, CS (kJ/m<sup>2</sup>·mes) de la instalación se calcula como el cociente:

$$\%CS = \frac{E_{disp} \times S_{captación}}{D_{acs}} * 100 \quad (6)$$

Según el Documento Básico HE-4, "Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria", la contribución solar mínima anual debe ser del 60% además de no poder superar una contribución de 110% en ningún caso y tampoco poder superar el 100% de la contribución durante más de tres meses seguidos.

## 2.2 Cálculo de pérdidas de presión en la instalación

El cálculo de las pérdidas de presión en los conductos de la instalación se realiza aplicando la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = \frac{\lambda L v^2}{D 2g} \quad (7)$$

Para los conductos del circuito primario se tiene flujo turbulento, y se calcula el factor de fricción de Darcy mediante la correlación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left( \frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (8)$$

Para las pérdidas de carga en el intercambiador, se ha considerado un intercambiador comercial de potencia de intercambio similar al del caso en estudio:

$$h_f = 2,85 \cdot 10^{-4} Q^2, \quad (9)$$

Las pérdidas en los captadores se evalúan como la suma de las pérdidas en los conductos de distribución y los tubos del panel absorbedor. En éstos se tiene un flujo que es predominantemente laminar y para los tubos lisos del captador estándar la pérdida de carga se calcula mediante la solución analítica:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (10)$$

Para los tubos con muelles insertados de los captadores mejorados, se utiliza la correlación experimental obtenida por Huertas (2013):

$$\lambda = 95,08 \left( \frac{P}{D} \right)^{0.409} Re^{-0.718} \left( \frac{P}{D} \right) \left( \frac{e}{D} \right)^{0.423} \quad (11)$$

En los conductos de distribución de ambos tipos de captadores se han considerando pérdidas de presión de 150 mm.ca.

## 3. Dimensionamiento de una instalación solar térmica para un edificio de 18 viviendas

Con el objetivo de evaluar las mejoras termoeconómicas asociadas a la instalación de colectores solares mejorados, en este apartado se acomete el dimensionamiento de una instalación solar térmica para el suministro de ACS a un edificio de 18 viviendas. Para llevar a cabo esta evaluación, se acomete el dimensionamiento con colectores solares estándar (CE) compuestos por tubos lisos, y colectores solares mejorados (CM), compuestos por tubos

con muelles insertados. Las características técnicas de ambos tipos de colector se resumen en la Tabla 1.

$$\eta_{0A} - \alpha_{1A}$$

**Tabla 1: Especificaciones técnicas captadores empleados en el cálculo**

	Captador estándar (CE)	Captador mejorado (CM)
Coeficiente de ganancias, $\eta_{0A}$	0,77	0,78
Coeficiente de pérdidas, $\alpha_{1A}$ (W/m <sup>2</sup> K)	5,76	4,78

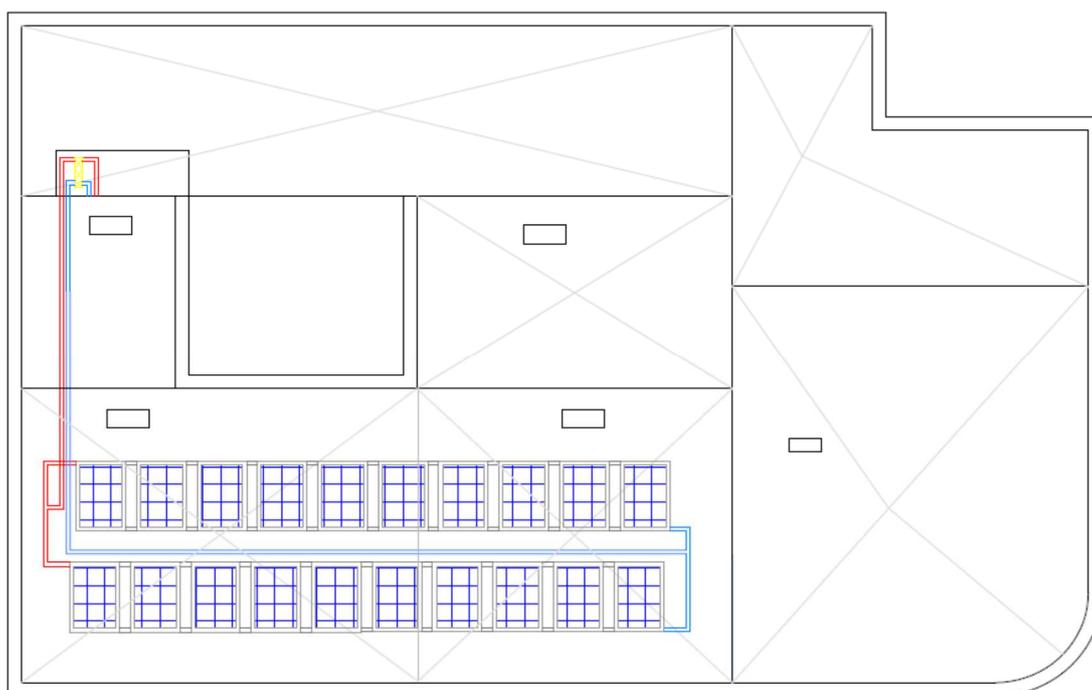
Considerando en los dos tipos de captadores: 9 tubos por cada captador, diámetro interior de los tubos de 7 mm, área unitaria del captador solar igual a 2 m<sup>2</sup> y un gasto másico nominal de 144 l/h.

En ambo casos se pretende obtener el número de captadores necesarios para conseguir una contribución solar anual del 60%, con las limitaciones impuestas por el HE-4 del CTE. Es de esperar que el uso de captadores de mayor eficiencia disminuya la superficie solar necesaria.

La edificación en estudio es un edificio de 18 viviendas con tres habitaciones cada una. A efectos del cálculo del caudal de ACS necesario se consideran 4 habitantes por vivienda, siguiendo las indicaciones HE-4 del CTE. La Figura 1 presenta el esquema en planta de la instalación solar en la cubierta del edificio.

Se trata de dos filas de captadores en paralelo con intercambiador exterior de primario. En las viviendas se sitúa el apoyo descentralizado con calentador de gas natural y tanque de acumulación. A efectos de cálculo se ha considerado un volumen de acumulación de 1800 litros.

**Figura 1: Instalación solar en cubierta del edificio**



En la Tabla 1 se presenta el resumen de datos térmicos para la localidad en estudio.

**Tabla 1: Resumen datos térmicos**

	Ene	Feb	Mar	Abr	My	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
T <sub>a</sub> (°C)	11,6	12,3	13,7	15,5	18,6	21,8	25,1	25,5	23	19,2	14,8	12,1	17,8
T <sub>red</sub> (°C)	8,8	8,3	8,8	10,2	12,2	14,2	15,7	16,2	15,7	14,2	12,2	10,3	12,2
Radiación (MJ/m <sup>2</sup> día)	16,4	18,7	21,4	20,9	21	21,3	22,4	21,8	21,3	19,1	14,8	15,1	19,5

Se detalla el cálculo para el mes de mayo a modo de ejemplo, habiéndose procedido de modo similar para el resto de meses. Según HE-4 del CTE, se considera un consumo de ACS a 60 °C de 28 litros/vivienda/persona, obteniendo un valor demanda total diaria de agua para el edificio:

$$V = 18 \times 4 \times 28 = 2016 \text{ litro/día}$$

La demanda mensual de energía para ACS se calcula según la ecuación (1):

$$D_{ACS} = 2016 \times (60 - 12,2) \times 4,18 \times 31 = 11964,5 \text{ kJ}$$

Si se repite el cálculo correspondiente a todos los meses del año, se obtienen los valores presentados en la Tabla 2:

**Tabla 2: Resumen demanda de ACS**

	Ene	Feb	Mar	Abr	My	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic	Total (anual)
Días/mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
T <sub>red</sub> (°C)	8,8	8,3	8,8	10,2	12,2	14,2	15,7	16,2	15,7	14,2	12,2	10,3	12,23
D <sub>ACS</sub> (MJ/mes) *10 <sup>4</sup>	1,33	1,21	1,33	1,25	1,24	1,15	1,15	1,14	1,11	1,19	1,20	1,29	14,68

Para los coeficientes k<sub>1</sub> y k<sub>2</sub> se emplearán los valores recogidos en Delgado (2002).

- Coeficiente corrección claridad del cielo k<sub>1</sub> 0,95

- Coeficiente no perpendicularidad rayos solares  $k_2$  0,94

El cálculo de la energía mensual recogida en los captadores ese mes, se calcula según la ecuación (2):

$$H'_{beta} = 0,95 \times 0,94 \times 21000 = 18753,0 \text{ kJ}$$

De modo que la radiación media recogida por los captadores se calcula según la ecuación (3):

$$I = \frac{18753,0}{9,5 \times \frac{1000}{3600}} = 614,04 \frac{W}{m^2}$$

Cálculo de la Contribución solar:

En la Tabla 3 figuran los parámetros: radiación media, horas de sol útiles diarias, temperatura ambiente y temperatura reducida, comunes a los captadores solares estándar y mejorados y necesarios para el cálculo de la contribución solar anual.

**Tabla 3: Parámetros de cálculo comunes para captadores solares estándar y mejorados**

	Ene	Feb	Mar	Abr	My	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
I (W/m <sup>2</sup> )	569,4	574,0	660,4	611,1	614,0	622,8	654,9	637,4	657,4	589,5	513,8	559,2
t (h)	8	9	9	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9	9	8	7,5
T <sub>amb</sub> (°C)	11,6	12,3	13,7	15,5	18,6	21,8	25,1	25,5	23,	19,2	14,8	12,1
T*	0,071	0,070	0,058	0,060	0,052	0,049	0,041	0,042	0,044	0,056	0,073	0,072

Cálculo de la Contribución solar. Captadores estándar:

El rendimiento de los captadores se evalúa con la ecuación (4):

$$\eta = 0,77 - 5,76 \times \left[ \frac{\left(\frac{60+45}{2}\right) - 18,6}{614,04} \right] = 0,45 .$$

El valor de la energía mensual disponible  $E_{disp}$  por unidad de superficie del captador se calcula utilizando los datos de rendimiento obtenidos y aplicando el coeficiente de pérdidas por acumulación ( $k_3$ ), según la ecuación (5):

$$E_{disp} = 0,45 \times 0,85 \times 18753,0 \times 31 = 223351,3 \text{ kJ}$$

Finalmente, la contribución solar aportada por la superficie de captadores correspondiente al mes de mayo, se calcula con la ecuación (6):

$$\%CS = \frac{E_{disp} \times Sup_{captación}}{E_{acs}} \times 100 = \frac{223351,3 \times 40}{11964,5 \times 1000} \times 100 = 74,67\%$$

El valor anterior se ha obtenido utilizando una superficie de captación de 40 m<sup>2</sup>. Se ha escogido este valor pues es el que consigue una contribución solar anual del 60%, sin superar el 100% durante más de 3 meses y siendo inferior en todo caso al 110%. Se obtiene una contribución solar del 62,8 % que con el área de captación utilizada y las dimensiones de los captadores, implica el uso de 20 unidades estándar, tal como muestran los valores de la Tabla 4.

**Tabla 4: %Contribución solar para captadores estándar y superficie de captación de 40 m<sup>2</sup>**

	$\eta$	$E_{disp} \left( \frac{kJ}{m^2 mes} \right)$	%CS
Enero	0,35	137493,3	41,1
Febrero	0,36	144942,1	47,5
Marzo	0,43	217351,4	65,0
Abril	0,42	200487,0	63,6
Mayo	0,45	223351,3	71,5
Junio	0,48	235761,2	81,4
Julio	0,52	278846,9	96,3
Agosto	0,52	269829,9	94,3
Septiembre	0,51	248109,0	88,6
Octubre	0,44	199831,3	66,8
Noviembre	0,34	117091,6	38,7
Diciembre	0,35	125747,1	38,7
Total (anual)		2398842,1	62,8

Cálculo de la Contribución solar. Captadores mejorados:

Una vez calculado el caso con captadores solares estándar, se procede a repetir el método con captadores mejorados.

Con el uso de los captadores mejorados (CM), los resultados de demanda de energía para ACS no varían. Los cambios significativos se aprecian en un incremento en el rendimiento de los captadores, lo que implica un aumento de energía disponible por unidad de superficie. Esto permite una reducción sustancial en la superficie de captación para obtener la misma contribución solar que con el uso de captadores estándar (CE).

**Tabla 5: %Contribución solar para captadores mejorados y superficie de captación de 32 m<sup>2</sup>**

	$\eta$	$E_{disp} \left( \frac{kJ}{m^2 mes} \right)$	%CS
Enero	0,45	176830,2	42,3
Febrero	0,46	184328,4	48,3
Marzo	0,51	260250,3	62,2
Abril	0,50	242129,5	61,5

Mayo	0,53	263212,2	67,4
Junio	0,55	271214,7	74,9
Julio	0,59	312341,7	86,3
Agosto	0,59	302771,5	84,6
Septiembre	0,57	280818,5	80,2
Octubre	0,52	236821,8	63,3
Noviembre	0,45	152109,0	40,2
Diciembre	0,45	162154,1	39,6
<b>Total(anual)</b>		<b>2844981,9</b>	<b>62,6</b>

En la Tabla 6, se comparan los resultados del método con ambos captadores. Se observa para un mismo porcentaje de contribución solar, una disminución de superficie de captación necesaria en el caso de los captadores mejorados. Con éstos se necesita una superficie de captación de 32 m<sup>2</sup>, lo que supone una reducción del 20% respecto al caso de utilizar captadores estándar. Puesto que ambos tipos de captadores tienen una misma área de apertura, el número de captadores se ve reducido en un porcentaje similar (se necesitan 20 unidades de captadores estándar y 16 de captadores mejorados).

**Tabla 6: Resumen características captadores empleados**

Tipo Captadores	ESTÁNDAR (CE)	MEJORADO (CM)
Nº Captadores	20	16
Caudal total en circuito primario (l/h)	2880	2304
Superficie de captación(m <sup>2</sup> )	40	32
Contribución Solar anual (%CS)	62,8 %	62,6 %

El resultado de la disminución del número de captadores implica un menor caudal circulante en el circuito primario, lo que repercutirá en unas menores pérdidas energéticas y menor potencia consumida por el sistema de bombeo.

#### Pérdida de carga

Para el cálculo de la pérdida de carga en los conductos del circuito primario se utiliza un caudal nominal de 144 l/h por captador. Esto supone un caudal total de 2880 l/h para los veinte captadores estándar y de 2304 l/h para los captadores mejorados. Se considera una pérdida de carga en accesorios de la instalación, de un 30% de la pérdida en los conductos. Las pérdidas en el intercambiador de placas se han calculado para el caudal en estudio en cada caso. Para evaluar la pérdida de carga en los captadores se considerará una distribución de captadores en dos filas con el mismo número de unidades en paralelo (Figura 1).

En las Tablas 7 y 8, se presentan los resultados del cálculo para colectores estándar y mejorados, respectivamente:

**Tabla 7: Pérdidas de carga circuito primario CE (20 CAPTADORES)**

Tramo	L (m)	D (mm)	Q (l/h)	V (m/s)	$\lambda$	Pérdidas de Carga (mm.c.a/m)	Pérdidas de Carga (mm.c.a)
-------	-------	--------	---------	---------	-----------	------------------------------	----------------------------

A-B	15	25	2880	1,6	0,0290	157,1	2356,7
B-FILA1	5	25	1440	0,8	0,0351	47,46	237,3
PÉRDIDA DE PRESIÓN EN TUBOS(IMPULSIÓN)[1]						2594,0	mm.c.a.
30% DE PÉRDIDAS POR ACCESORIOS[2]						778,2	mm.c.a
PÉRDIDA DEPRESIÓN EN CAPTADORES [3]						200	mm.c.a
PÉRDIDA DE PRESIÓN INTERCAMBIADOR [4]						3197,0	mm.c.a
PÉRDIDA DE PRESIÓN TOTAL 2*[1]+2*[2]+[3]+[4]						10141,5	mm.c.a

**Tabla 8: Pérdidas de carga circuito primario CM (16 CAPTADORES)**

Tramo	L (m)	D (mm)	Q (l/h)	V (m/s)	$\lambda$	Pérdidas de Carga (mm.c.a/m)	Pérdidas de Carga (mm.c.a)
A-B	15	25	2304	1,3	0,0308	106,6	1599,7
B-FILA1	5	25	1152	0,6	0,0374	32,42	162,1
PÉRDIDA DE PRESIÓN EN TUBOS(IMPULSIÓN)[1]						1761,8	mm.c.a.
30% DE PÉRDIDAS POR ACCESORIOS[2]						528,5	mm.c.a
PÉRDIDA DEPRESIÓN EN CAPTADORES [3]						230,0	mm.c.a
PÉRDIDA DE PRESIÓN INTERCAMBIADOR [4]						2046,0	mm.c.a
PÉRDIDA DE PRESIÓN TOTAL 2*[1]+2*[2]+[3]+[4]						6856,8	mm.c.a

El resultado del cálculo muestra una disminución de un 32% en la pérdida de carga del circuito primario cuando se usan captadores mejorados. El impacto en la reducción de la potencia de bombeo es 53%, como muestran los resultados del cálculo en la Tabla 9.

**Tabla 9. Potencia de bombeo demandada en circuito primario con CE y CM**

	Q (l/h)	$h_f$ total (mm.c.a)	$\eta_b$	$\dot{W}_b$ (W)
Colector Estándar	2880	10141,5	0,2	378,05

Colector Mejorado	2304	6886,8	0,2	201,79
-------------------	------	--------	-----	--------

#### 4. Análisis energético y económico

El empleo de captadores solares térmicos mejorados arroja los dos beneficios fundamentales de las tecnologías intensificadas en ingeniería de procesos (Reay, Ramshaw y Harvey, 2013): la reducción en costes de capital (*Capital Expenditure, CAPEX*) y la reducción en costes de operación (*Operational Expenditure, OPEX*).

##### 4.1 Ahorro en costes de capital

La reducción CAPEX proviene de la disminución del número total de captadores de la instalación, así como de la infraestructura asociada: soportes estructurales, líneas de distribución del fluido caloportador, aislamiento, etc. En cualquier caso, es necesario considerar un aumento del precio unitario de los colectores mejorados, derivado de la instalación de muelles insertados en sus tubos.

Para el cálculo del coste de los muelles, evaluamos la longitud de alambre necesario, teniendo en cuenta que la longitud de una hélice es  $L_p = \sqrt{p^2 + (\pi d)^2}$ . Para un muelle con  $p/d=1$  y un tubo de longitud  $L_{tubo} = 2$  m, resulta  $L_{muelle} = \sqrt{\pi + d} \times L_{tubo} = 3,55$  m.

Con un diámetro de alambre  $e = 0,07 \times dy$  usando cobre como material, con  $\rho=8960$  kg/m<sup>3</sup>, el peso total de cada muelle es  $m_{muelle} = \rho(\pi e^2/4) \times L_{muelle} = 0,006$  kg

La masa total de los muelles, tomando 9 tubos por colector, es  $m=0,006 \times 9=0,054$  kg. Considerando un precio del cobre de 8 €/kg, el precio total de la materia prima en un colector es  $C_{cobre} = 8 \times 0,054 = 0,432$  €.

Para evaluar el coste de fabricación de los muelles a partir de una bobina de cobre, y su instalación en los colectores durante la operación de fabricación, multiplicaremos –de forma conservadora- el coste de la materia prima por 50. Consideramos también en este coeficiente el margen comercial de la operación. Esto aumentaría el precio de un colector mejorado (CM) frente a un colector estándar (CE) en la cantidad:

$$\Delta C = C_{CM} - C_{CE} = 50 \times 0,432 = 21,6 \text{ €}$$

Con una reducción del número de colectores de 20 a 16, el ahorro en la instalación de colectores es, asumiendo  $C_{CE}=600$  €,

$$\Delta C_{colectores} = 20 \times C_{CE} - 16 \times C_{CM} = 2054,44 \text{ €}$$

Asumiendo un ahorro adicional en equipos auxiliares de un 10% del coste de los colectores, el ahorro en los costes de capital inicial es

$$\Delta C_{CAPEX} = 1,1 \times \Delta C_{colectores} = 2259,84 \text{ €}$$

##### 4.2. Ahorro en costes de operación

Los costes de operación de la instalación están constituidos por el coste del combustible de la caldera de apoyo, y los costes de electricidad por bombeo. Asumiendo que los colectores mejorados proporcionan el mismo aporte solar que los colectores simples, la única disminución en costes de operación proviene de la reducción en potencia de bombeo de la instalación. Esta reducción se puede evaluar como

$$\Delta E = (\dot{W}_{b,CM} - \dot{W}_{b,CE}) \times \Delta t = (378,05 - 201,78) \times \frac{8,9h}{\text{día}} \times 365 \text{ días} = 611,2 \text{ kWh/año}$$

Con un coste del término de energía de la electricidad CE=13 €/kWh y considerando el impuesto especial IE=5,1127%, y el IVA=21%, el ahorro en aprovisionamiento eléctrico anual por potencia de bombeo resulta:

$$\Delta C_{OPEX} = 611,2 \text{ kWh} \times 0,13 \times 1,051127 \times 1,21 = 101,06 \text{ €/año}$$

El valor actual del ahorro, sumando los costes de capital y de operación para una vida útil de la instalación de 20 años, sería

$$\Delta C_{20} = 2259,84 + 101,06 \times 20 = 4281 \text{ €}$$

El ahorro total en emisiones de CO<sub>2</sub>, asumiendo un coeficiente de paso para el suministro de electricidad en baja tensión de 0,332 kg CO<sub>2</sub>/kWh es

$$\Delta CO_2 = 611,2 \times 20 \times 0,332 = 4058,4 \text{ kg CO}_2$$

## 5 Conclusiones

Se ha calculado el porcentaje de contribución solar en una instalación de ACS para un edificio de 18 viviendas situada en Cartagena (Murcia), usando captadores estándar y captadores mejorados con la inserción de muelles en espiral. Para un mismo porcentaje de contribución solar se observa una reducción del 20% en la superficie de captación necesaria, lo que equivale a una reducción similar en el número de captadores.

Un menor número de captadores supone una reducción del caudal circulante en el circuito primario de la instalación. Se observa una reducción del 32% en las pérdidas de carga cuando se usan captadores solares mejorados. La potencia de bombeo necesaria se reduce en un 53%. Se ha estimado una reducción en costes de inversión de 2259,84 €, y un ahorro acumulado a 20 años, considerando también la reducción en costes de operación, de 4281 €. Las emisiones evitadas en este periodo son de 4058,4 kg CO<sub>2</sub>.

El uso de muelles en espiral para mejorar la eficiencia térmica en colectores solares planos se presenta como una alternativa viable, debido a los beneficios comentados enumerados anteriormente, su bajo coste y facilidad de implementación en la línea de fabricación.

## Referencias

Abbas, M-M., & Shehab, Ab-M A., & Al-Samuraec, A-K., & Hassanb N-A., (2011). Effect deposition time on the optical characteristics of chemically deposited nanostructure PbS. *Energy Procedia*, 6, 241–250.

Delgado Marín, J.P.(2002) *La energía solar térmica en la Región de Murcia*. España. ARGEM

Deng ,Y., & Zhao, Y., & Wang, W., & Quan, Z., & Wang, L., & Yu, D., (2013). Experimental investigation of performance for the novel flat plate solar collector with micro-channel heat pipe array (MHPA-FPC). *Applied Thermal Engineering*, 54, 440–9.

Documento básico DB HE-4 (2013) *Ahorro de Energía. Código Técnico de la Edificación*.

- Dudita, M., & Isac, L., & Duta, A., (2012). Influence of solvents on properties of solar selective coatings obtained by spray pyrolysis. *Bulletin of Materials Science*, 35, 997–1002
- Ehrmann, N., & Reineke-Koch, N.R., (2012). Selectively coated high efficiency glazing for solar-thermal flat-plate collectors. *Thin Solid Films*, 520, 4214–4218.
- García, A., & Herrero Martín, R., & Pérez-García, J., (2013) Experimental study of heat transfer enhancement in a flat-plate solar water collector with wire-coil inserts, *Applied Thermal Engineering*, 61, , 461-468.
- Herrero Martín, R., & Pérez-García, J., & García, A., & García-Soto, F.J., & López-Galiana, E., (2011) Simulation of an enhanced flat-plate solar liquid collector with wire-coil insert devices, *Solar Energy*, 85, 455-469.
- Hobbi, A., & Siddiqui, K., (2009) Experimental study on the effect of heat transfer enhancement devices in flat-plate solar collectors. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 4650–4658.
- Huertas, A., (2013) Estudio experimental del comportamiento hidráulico de elementos insertados en tubos de captadores solares planos, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Cartagena.
- Ienei, E., & Isac, L., & Cazan, C., & Duta, A., (2010). Characterization of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NiOx solar absorber obtained by spray pyrolysis. *Solid State Science*, 12, 1894–7.
- Jaisankar, S., & Radhakrishnan, T.K., & Sheeba, K.N., (2009) Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of forced circulation solar water heater system fitted with helical twisted tapes. *Solar Energy*, 83, 1943-1952.
- Kumar, A., & Prasad, B.N., (2000) Investigation of twisted tape inserted solar water heaters—heat transfer, friction factor and thermal performance results. *Renewable Energy*, 19, 379-398.
- Lomascolo, M., & Colangelo, G., & Milanese, M., & De Risi, A., (2015). Review of heat transfer in nanofluids: conductive, convective and radiative experimental results. *Renewable & Sustainable Energy Review*, 43, 1182–98.
- Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura PET-REV (2009). Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía (IDAE).
- Reay, D. & Ramshaw, C. & Harvey, A. (2013). Process Intensification. Engineering for Efficiency, Sustainability and Flexibility (2<sup>a</sup> Ed). Butterworth-Heinemann, UK.
- Reim, M., & Korner, W., & Manara, J., & Korder, S., & Arduini-Schuster, M., & Ebert H-P, Fricke, J., (2005). Silica aerogel granulate material for thermal insulation and day lighting. *Solar Energy*, 79, 131–139.
- Una Norma Española (2006) *Sistemas solares térmicos y componentes. Captadores solares, Parte 2: Métodos de ensayo*, UNE-EN-12975-2.