

# Calefacción Solar de gran superficie \*

Kees van der Geer

Abril 21, 2011

*Calentar con un colector solar no cuesta nada y no contamina nada. En este artículo propongo un sistema de calefacción solar (SCS) que consiste en un gran colector solar, apropiado para calentar una casa, y un almacén de calor capaz de superar una semana de tiempo nublado. Ambos se construyen con materiales sencillos.*

## 1 Generalidades

Cuando compramos aceite para la estufa compramos calor por aproximadamente 5 céntimos el kWh. En una estufa eléctrica el precio sube hasta algo así como 20 cts/kWh, debido a las complicadas transformaciones que sufre la energía desde la central eléctrica hasta la casa: *combustible*  $\rightarrow$  *calor*  $\rightarrow$  *electricidad*  $\rightarrow$  *calor*. Con el sistema de calefacción solar que propongo (SCS) no hay que preocuparse de esas cosas. Espero que se convierta en una revolución en calefacción por lo menos en el región mediterránea, porque el diseño está pensado para la costa oeste de España<sup>1</sup> donde la radiación total en un año es de 1770 HSP (Hora Solar Pico). Un HSP equivale a 1 kW/m<sup>2</sup>.

El SCS está formado por un colector solar y un almacén de calor. El agua, por tener gran calor específico, sirve para transportar y almacenar el calor. Fluye por circuitos cerrados entre el colector y el almacén y entre éste y los radiadores en la casa. Por razones de higiene, el agua *utilizada* en la casa (para beber, lavar...) debe llegar de una fuente aparte y la caliente debe pasar por el almacén de calor a través de un intercambiador de calor. Este puede ser un tubo largo que pasa por el almacén.

El almacén debe estar muy bien aislado para que no

\*Traducido por Juan Abrisketa Gaitan dal versión Inglés

<sup>1</sup>Los datos utilizados se refieren a Castellón de la Plana situado entre Tarragona y Valencia (Costa del Azahar)

pierda mucho calor durante un largo periodo de tiempo nublado. Las condiciones de aislamiento del colector no son tan exigentes porque puede cerrarse cuando se va el sol, con lo que se corta la pérdida de calor<sup>2</sup>.

Los puntos de partida para el diseño son: el calor necesario (el consumo), la intensidad de la radiación solar, el intervalo de tiempo sin sol a superar y  $\Delta T$ , siendo la diferencia entre la temperatura utilizada en el sistema y la temperatura ambiente. Teniendo en cuenta los dos primeros se calcula la superficie del colector. Teniendo en cuenta el consumo de energía, la longitud del intervalo y  $\Delta T$  se calculan el tamaño del almacén y el espesor de la capa de aislamiento. En lo que se refiere a la elección de  $\Delta T$ , tanto la capacidad de calor del almacén como la facilidad de calentar la casa son proporcionales a  $\Delta T$ , pero también lo son las pérdidas de calor. Por seguridad, hemos escogido el siguiente valor:  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ .

## 2 El colector

Una instalación normal de calefacción central tiene habitualmente una potencia de unos 20 kW. La Costa del Azahar es menos fría, por lo que supongo que será suficiente la mitad de esa potencia y solo durante parte del día. Por tanto, el punto de partida es el siguiente: 10 kW durante 10 horas al día, o 100 kWh/día = 360 MJ/día.<sup>3</sup>

La radiación solar media en Castellón, en enero, sobre un panel inclinado 60° es 15,4 MJ/m<sup>2</sup>/día (= 4,17 kWh/m<sup>2</sup> día). Por consiguiente, incluso en el caso ideal en que no hubiera pérdida de calor necesitaríamos un

<sup>2</sup>Una desventaja de un colector que también haga de almacén de calor es la dificultad de obtener un buen aislamiento para la parte transparente.

<sup>3</sup> 1 kWh = 3.6 MJ.

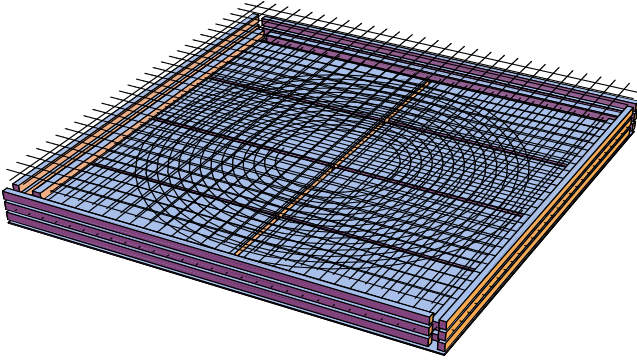


Figure 1: Colector de dimensiones  $2 \times 2$  m. La espiral es un tubo de PVC negro usado normalmente para riegos, de 250 m de largo y 16 mm de diámetro, que absorbe la radiación solar. El agua corre por él transportando el calor. No se han representado ni la entrada ni la salida. Sobre el tubo hay dos finas láminas de plástico armadas con una malla, con lo que se crean capas de aire estacionario. Debajo y a los lados del tubo hay una espesa capa de espuma de poliestireno. Durante el invierno, se necesitarán unas doce unidades como ésta para calentar una casa.

gran colector de  $24 \text{ m}^2$ .

En la sección 2.2 veremos que el rendimiento de un colector solar disminuye proporcionalmente al aumento de  $\Delta T$ , pero, por otra parte, nos interesa un valor alto de  $\Delta T$  para calentar la casa. *Optaremos por una superficie muy amplia, de  $48 \text{ m}^2$*  para paliar las exigencias del rendimiento: con este gran colector un rendimiento del 50% es suficiente..

## 2.1 Aislamiento térmico del colector

Una diferencia de temperatura entre las dos caras de una capa de cualquier material genera una corriente de calor a través del material. La intensidad de esta corriente térmica es proporcional a la conductividad térmica del material, según la fórmula  $U = \lambda/d$ , donde  $\lambda$  es el coeficiente de conductividad y  $d$  el espesor de la capa. Esta es la ley de Fourier, similar a la de Ohm para la corriente eléctrica. Naturalmente, el flujo de calor es también proporcional a la diferencia de temperatura y a la superficie A. Por tanto, el flujo de calor, es decir, la pérdida de calor

será

$$Q = \frac{A \Delta T}{R_t} \quad (1)$$

$$R_t = \frac{1}{U} = \frac{d}{\lambda} \quad (2)$$

Esta fórmula muestra claramente que para incrementar la resistencia térmica  $R_t$  hay que aumentar  $d$  y escoger un material con valor de  $\lambda$  pequeño. Hemos escogido poliestireno expandido para este fin.<sup>4</sup>

La cara superior del colector debe ser transparente. Aislaremos esta parte con dos capas de 10 cm de aire estacionario. Para construir estos compartimentos, utilizamos láminas de plástico y algo que sirva de refuerzo, como red metálica de gallinero. Las dos capas puestas en serie de esta forma tienen una conductancia térmica de  $U = 3,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$ .<sup>5</sup>

La cara inferior se puede aislar mucho más fácilmente, por lo que conseguiremos una pérdida de calor mucho menor: supongamos que es del orden de  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$ , con lo que la pérdida total será de  $4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$ , que corresponde a una pérdida de  $200 \text{ W}/\text{m}^2$  para  $\Delta T = 50^\circ \text{C}$ . De las ecuaciones 1 y 2 se deduce que *el espesor necesario de la capa de poliestireno es de 8 cm* ( $\lambda = 0.04$ ,  $\lambda/0.5 = 0.08$ ).

## 2.2 Temperatura y rendimiento

Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea  $\Delta T$  menor es el rendimiento. En el caso extremo en el que no sacáramos nada de calor del colector el rendimiento sería cero, y si la radiación fuera de  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ , al cabo de algún tiempo  $\Delta T$  llegaría  $200^\circ \text{C}$ .<sup>6</sup> Como nosotros hemos elegido  $\Delta T = 50^\circ \text{C}$  la pérdida es  $200 \text{ W}/\text{m}^2$ , por lo tanto, con una radiación de  $1000 \text{ W}$ , el rendimiento es del 80%.

<sup>4</sup>Poliestireno expandido:  $\lambda = 0.033 \dots 0.042$  precio 5.60 euro/ $\text{m}^2$  a un espesor de 4 cm. fuente: <http://huis-entuin.infonu.nl/wonen/17820-isolatiewaarde-k-waarde-u-waarde-lambda-waarde.html>

<sup>5</sup>fuente: [www.ekbouwadvies.nl/bouwbesluit](http://www.ekbouwadvies.nl/bouwbesluit)

<sup>6</sup>Quizás los valores de insolación sean un poco optimistas, lo cual es otra razón para hacer un experimento antes de construir un colector enorme. De todos modos hace falta un sistema de protección contra una temperatura demasiado alta porque el poliestireno se funde a  $120^\circ \text{C}$ . Este protección puede servir al mismo tiempo para aumentar el rendimiento cortando el flujo de agua cuando la temperatura del colector es mas bajo que la del almacén

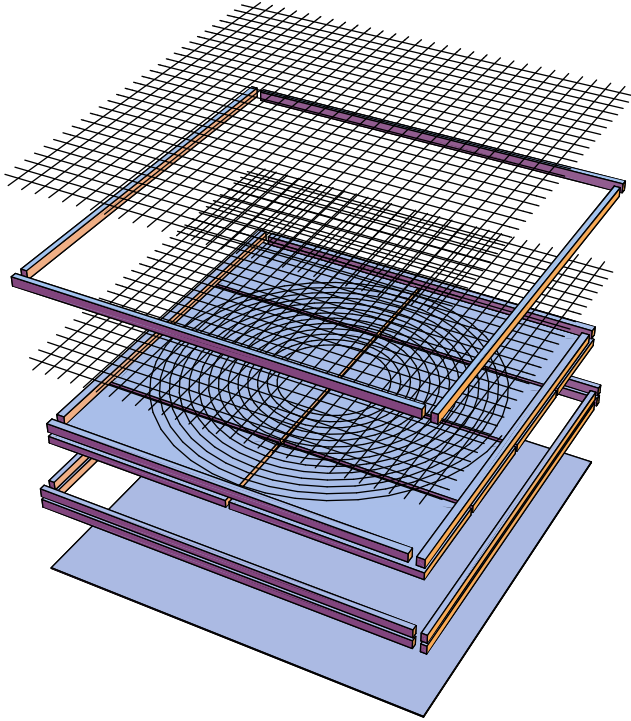


Figure 2: *Elementos que componen el colector de prueba de 2 x 2 m, de abajo arriba: cobertura inferior, listones de madera laterales, capas inferior y laterales de aislante que contienen el tubo en espiral, láminas de plástico armadas con red de gallinero, más listones de madera laterales, lámina superior de plástico con red de gallinero.*

Nótese que indirectamente el rendimiento se regula siempre por medio del flujo de agua. En invierno el sol da algo más de  $4 \text{ kW/m}^2/\text{día}$  distribuidos en unas 6 horas. Nuestro colector de prueba, con  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ , pierde durante esas 6 horas  $1,2 \text{ kWh/m}^2$ , queda casi  $2,8 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ , es decir podemos sacar en total  $11,2 \text{ kWh/día}$  de nuestro colector de prueba de  $4 \text{ m}^2$  de superficie. Esto es suficiente para aumentar la temperatura de 200 litros de agua  $50^\circ\text{C}$ .

### 2.3 El agua transporta el calor

Al construir en negro el fondo del compartimento que contiene la espiral, hacemos que esta capa absorba casi todo el calor. Sin embargo, si calentamos el aire de ese compartimento y el calor tiene que ir de ese aire estacionario al tubo que contiene el agua, entonces necesitamos un gradiente de temperatura mucho mayor para transportar los

$1000 \text{ W/m}^2$  al tubo. En este caso el transporte de calor será de solamente  $11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , por lo que para que sea de  $1000 \text{ W/m}^2$  el gradiente de temperatura  $\Delta T$  tendrá que ser aproximadamente  $100^\circ\text{C}$ . Esto sería desastroso para el rendimiento. Es totalmente necesario que la luz solar incida directamente sobre el tubo. Una solución es enrollar un tubo de PVC de 16 mm de diámetro, de los que se usan normalmente para riego, en una especie de espiral distorsionada para formar un rectángulo con las esquinas redondeadas y con el menor espacio posible entre las vueltas. Esta espiral se coloca sobre la capa de material aislante de forma que la radiación solar la alcance después de atravesar la capa de aire estacionario construida con las láminas de plástico transparente. Para un colector de  $2 \times 2 \text{ m}$ , que sea manejable a la vez que eficaz, se necesitan unos 250 m de tubo. Para transportar al exterior por medio del agua ( $C = 4,2 \text{ kJ/l/gr}$ ) los 4 kW que caen sobre el colector es suficiente una corriente de 1,1 litros/minuto, con  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ . Afortunadamente el transporte de calor de la pared del tubo a la corriente de agua es mucho mejor ( $U = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). El área interna del tubo es  $6,3 \text{ m}^2$ , de forma que el gradiente  $\Delta T$  entre el tubo y el agua es solo de  $13^\circ\text{C}$  con un nivel de radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Sin embargo este efecto aumenta la pérdida de calor desde 20% hacia 25%. Quizás pueda compensarse esta pérdida de calor extra metiendo mas colectores en serie utilizando la pequeña caída de presión por colector. Para una corriente de 1,1 litros/minuto en 250 m de tubo de 16 mm de diámetro, la caída de presión es inferior a 0,5 Bar. Esto tiene sentido en el caso de un conjunto de muchos colectores conectados en serie con una corriente más caudalosa, siempre y cuando la presión proporcionada sea suficiente. De esta forma, los colectores de la parte fría trabajarán con un  $\Delta T$  más bajo y un rendimiento mayor.

## 3 El Almacén de calor

### 3.1 La Forma

El almacén de calor debe ser capaz de almacenar el calor durante mucho tiempo. La cantidad de calor almacenada es proporcional al volumen de agua  $V$ . La pérdida de calor es proporcional a la superficie exterior  $A$ . Por tanto, la

relación Superficie/Volumen debe ser lo más pequeña posible. Veamos algunas formas geométricas comunes:

### 3.1.1 Esfera de radio $r$

$$\left(\frac{A}{V}\right)_{bol} = \frac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3}{r} \quad (3)$$

### 3.1.2 Cubo de lado $a$

$$\left(\frac{A}{V}\right)_{kub} = \frac{6a^2}{a^3} = \frac{6}{a} \quad (4)$$

Si el radio de la esfera es la mitad del lado del cubo,  $r = a/2$ , la relación  $A/V$  es la misma para la esfera y el cubo. Ciertamente la esfera ocupa menos espacio, pero como el espacio sobrante es curvo es difícil de utilizar.

### 3.1.3 Cilindro de radio $r$ y altura $h$

$$\left(\frac{A}{V}\right)_{cil} = \frac{2\pi r^2 + 2\pi r h}{\pi r^2 h} = \frac{2}{h} + \frac{2}{r} \quad (5)$$

Si  $h = r$  el cociente es  $4/r$  y si  $h = 2r$  el cociente se reduce hasta  $3/r$ , es decir, igual que en el caso de la esfera.

**Escogemos el cilindro** por su simplicidad de construcción: las caras horizontales no necesitan soporte y las paredes laterales pueden reforzarse con alambre de acero contra la presión hidrostática lateral<sup>7,8</sup>.

La curva  $A/V$  de la figura 3 (calculada con la fórmula 5), nos ayuda a calcular las dimensiones del cilindro para un volumen determinado. En el eje horizontal tenemos el diámetro. La curva roja nos da la altura correspondiente a un volumen de  $17\text{ m}^3$ , volumen calculado en la sección 3.2, y la curva azul nos indica la relación  $A/V$ . Por ejemplo: para  $d = 2,7$  vemos que también  $h = 2,7$  y en este punto  $A/V$  tiene el valor mínimo. Más adelante, en la sección 3.3 veremos que es conveniente disminuir la altura para reducir la presión lateral. La figura 3 muestra que, afortunadamente, esta disminución de  $h$  no afecta mucho a la relación  $A/V$ .

<sup>7</sup>N.B. Para todas las formas se cumple que cuanto más grande mejor: el volumen aumenta y la relación  $A/V$  disminuye al aumentar el tamaño.

<sup>8</sup>Una solución alternativa podría ser una pirámide truncada de arena húmeda, atractiva porque puede autosostenerse.

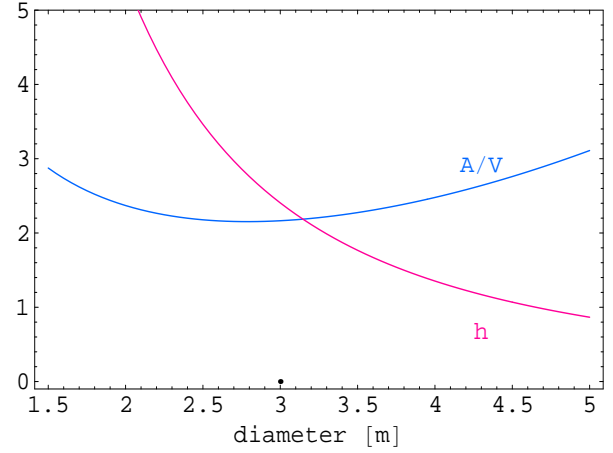


Figure 3: *Equilibrio entre diámetro y altura para un depósito cilíndrico de  $17\text{ m}^3$ . En el eje horizontal está el diámetro; la línea roja da la altura correspondiente y la línea azul la area relativa  $A/V$ . El valor mínimo de  $A/V$  se da para  $h = d = 2,7\text{ m}$ . Es evidente que se puede escoger un diámetro mucho más grande y menor altura para disminuir la presión hidrostática lateral sin que por ello aumente mucho la relación  $A/V$ .*

## 3.2 Calculo del volumen necesario

Calculamos el volumen del almacén de calor para poder superar una semana sin sol. El punto de partida en la sección 2 era un consumo de calor de  $360\text{ MJ}$  por día, lo que significa que en una semana el almacén debe aportar  $2.520\text{ MJ}$ . El calor específico del agua es  $Ch = 4,2\text{ MJ}/(\text{m}^3\text{K})$ , luego con un  $\Delta T = 50^\circ\text{C} - 13^\circ\text{C}$  (ver nota a pie de página)<sup>9</sup> necesitamos un volumen  $V = W_0/(C_h\Delta T) = 16,2\text{ m}^3$  de agua. En este cálculo no tenemos en cuenta ninguna pérdida, pero tampoco que durante esa semana de mal tiempo el sol puede aparecer de vez en cuando. Es razonable pensar que los dos efectos se compensen.

## 3.3 Presión lateral

Para reforzar las paredes laterales con alambres de acero necesitamos saber el espesor de éstos. Lo deducimos de la siguiente manera: la presión al fondo del cilindro es  $P = h g \rho$ , donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $\rho$  la

<sup>9</sup>Hemos supuesto que la temperatura en el interior de la casa sea  $13^\circ\text{C}$  superior a la del exterior. Esta parte del  $\Delta T$  no puede usarse para transportar calor del almacén a la casa.

masa específica del agua. Según la ley de Pascal ésta es también la presión lateral. Esta presión desciende linealmente con  $h$ , por lo que la media será la mitad de la de la base. Cortemos ahora el cilindro verticalmente en dos partes iguales. La fuerza en una mitad es igual a la presión media multiplicada por el área de la sección  $A = 2rh$ . La fuerza es contrarrestada en los dos lados, luego en un lado la fuerza es:<sup>10</sup>

$$F_{lat} = \frac{grh^2\rho}{2} \quad (6)$$

$$\approx 5000rh^2 \quad (7)$$

Esto nos da un argumento a favor de una  $d$  más grande y una  $h$  mucho más pequeña porque la presión es proporcional a  $r^{-3}$ . Esto se ve sustituyendo  $h$  por su valor  $V/(\pi r^2)$  en la ecuación 6.  $F_{lat}$  llega casi a 18.000 N para un depósito de  $17 m^3$  con  $d = 4 m$  y  $h = 1,35 m$ . Si dividimos esta fuerza por  $N$  alambres repartidos regularmente, la fuerza es  $2 \times 18.000/N$  en el alambre de la parte más baja y (casi) cero en el más alto. El límite elástico del acero es  $250 N/m^2$ , es decir, con 10 alambres el más bajo tiene que tener una sección de al menos  $36.000/10/250 = 14,6 mm^2$ , lo que corresponde a un diámetro de 3,6 mm.

### 3.4 Espesor de la capa aislante

Necesitamos que después de una semana sin sol, es decir, sin cargar calor, el depósito contenga todavía un 80% de su calor original. Por tanto:

$$W = W_0 e^{-\alpha N_d} = 0.80 W_0 \quad (8)$$

$$\rightarrow \alpha = \frac{0.223}{N_d} \quad (9)$$

donde la unidad de tiempo es un "día". Este también vale para  $\alpha$ , la "constante exponencial de tiempo" y  $N_d = 7$  días. El espesor  $d$  de la capa aislante se deduce del flujo de calor por día a través de la pared que es  $\delta W/\Delta T = \alpha W_0$ .

$$\alpha W_0 = \frac{A \Delta T \lambda s_{pd}}{d} \quad (10)$$

<sup>10</sup>La energía potencial del depósito es igual a su masa por la altura del centro de gravedad. Lo vamos a expresar por medio de  $V$  (volumen) y  $s$  (circunferencia):  $E = 2g\pi\rho V^2/s^2$ . La fuerza es  $F = -\delta E/\delta s$ , como si la pared lateral se cortase verticalmente y fuese sujeta por un alambre que aguantase la presión. Sustituyendo  $V$  y  $s$  se obtiene otra vez la ecuación 6

$$\rightarrow d = \frac{A \Delta T \lambda s_{pd}}{\alpha W_0} \quad (11)$$

donde  $S_{pd}$  es segundos por día y  $d$  el espesor de la capa aislante. Utilizando los datos arriba mencionados llegamos a la conclusión de que se necesita una capa de 9 cm de espesor.

## 4 Conclusión

Para calentar una casa necesitamos un colector de unos  $50 m^2$ . Hemos propuesto una versión de prueba de  $4 m^2$  para verificar si realmente podemos obtener 11 kWh en un día soleado de invierno y con una temperatura del agua  $50^\circ C$  superior a la del ambiente. Si la prueba tiene éxito habrá que construir una docena de estos colectores de prueba, o algo similar con la misma superficie de exposición. Podemos empezar calentando la casa directamente con el colector. En las casas con paredes de gran espesor se produce el mismo efecto que en un almacén de calor y cuando el sol desaparece es habitual que la temperatura no baje más de  $5^\circ C$  al día. Por supuesto que el sistema es mucho mejor y más ajustable si tiene un almacén de calor. Proponemos un depósito cilíndrico de 4 m de diámetro y 1,35 m de altura que podrá contener  $17 m^3$  de agua. El aislamiento en todas las paredes tiene un espesor de 9 cm con  $\lambda = 0,04 W/(gr.m)$ . La relación  $A/V$  es un 15% superior a la mínima (que se da para  $h = 2,7 m$ ) pero las ventajas de esta elección son que el depósito puede servir de piscina<sup>11</sup> para los niños en verano y que no salta tanto a la vista en plena naturaleza. Parece muy probable que el tiempo necesario para recuperar el dinero invertido sea bastante corto. Lo que es seguro es que el beneficio para el medio ambiente es inmediato.

<sup>11</sup>Quizás una solución práctica sea comprar una piscina hinchable de  $17 m^3$  y construir un cajón aislante a su alrededor.