

## **NUEVO COLECTOR SOLAR TÉRMICO DE BAJO COSTO DE FLUJO FORZADO AUTÓNOMO POR PANEL FOTOVOLTAICO**

**N. Di Lalla<sup>1,2</sup>, L. E. Juanicó<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>2</sup> Departamento de Materiales, Centro Atómico Constituyentes.

<sup>3</sup> Departamento de Combustibles Nucleares, Centro Atómico Bariloche  
Tel. 011 6772-7564; email: ndilalla@gmail.com

*Recibido 11/08/16, aceptado 09/10/16*

**RESUMEN:** Se presenta el desarrollo de colectores solares térmicos de bajo costo y simple diseño, basados en una larga manguera de PEBD que operan por recirculación forzada asistida por mini bomba regulada y alimentada por panel fotovoltaico. Se demostró experimentalmente la factibilidad de esta configuración termohidráulica simple y autónoma. Un prototipo (50 litros y 50 metros manguera de 3/4", bomba de 2W y panel fotovoltaico de 3W en 12 voltios) obtuvo eficiencias promedio del 37%, calentando agua a 48°C en invierno en Salta con irradiancias de 700 W/m<sup>2</sup>.

**Palabras clave:** colector solar, recirculación forzada, panel fotovoltaico.

### **INTRODUCCIÓN**

La demanda de agua caliente sanitaria (A.C.S.) en hogares constituye cerca del 50% de su consumo energético total en países de clima templado, y es cubierto mayormente a partir de fuentes no renovables, que generan gases contaminantes de consecuencias ecológicas negativas. En muchos casos la leña es la única alternativa y se quema con bajas eficiencias, provocando además desertificación (Baldwin, 1987). Frente a esta realidad, es ampliamente reconocido el enorme potencial del recurso solar para satisfacer esta demanda.

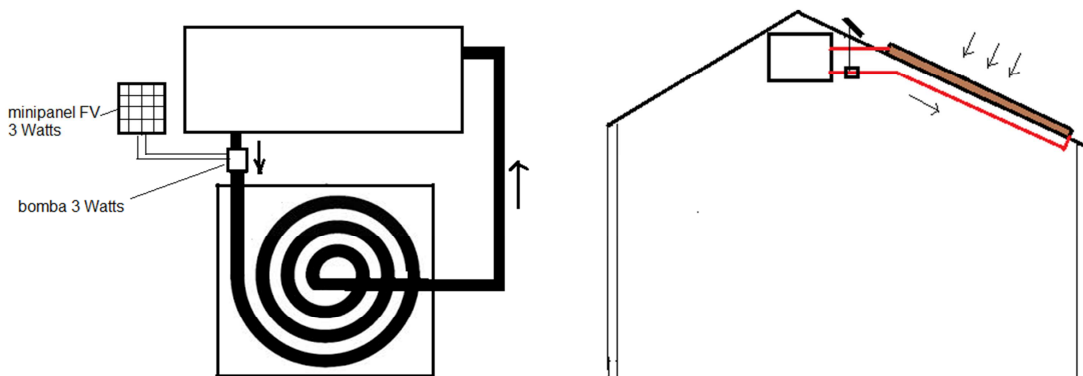
Existen diversos tipos de colectores comerciales: planos (nacionales o importados) o importados de tubos de vacío. Todos cumplen razonablemente el objetivo anterior, con una vida útil de 15 años y con precios en el mercado nacional que oscilan entre 15 a 25 mil pesos (200 litros diarios), debiéndose adicionar el costo de transporte e instalación. En países de baja densidad poblacional y de mercado solar incipiente como la Argentina, estos sobrecostos pueden ser considerables, y explican parcialmente su muy lento desarrollo, incluso comparado con países vecinos. Frente a esta realidad (compleja y que no pretendemos abarcar aquí), nuestra propuesta ha consistido en desarrollar colectores robustos de diseño simple y empleando materiales asequibles localmente, proyectados para su autoconstrucción por parte del propio usuario final.

El colector casero más popular es el típico colector plano "tipo grilla" en el cual el flujo refrigerante se distribuye dentro del colector entre muchos tubos paralelos, y se recircula por convección natural con un tanque superior aislado. Esta configuración requiere muchas uniones, complejiza la elaboración e incrementa la posibilidad de pérdidas. Por otro lado, el diseño más simple (y barato) consiste en una única y larga manguera plástica de polietileno negro de baja densidad (PEBD). Existen varias formas de aplicarla, ya sea como colector acumulador (Juanicó and Di Lalla, 2013 y 2014), o por descarga hacia un tanque de almacenamiento (Juanicó and Di Lalla, 2016). Este tipo de absorbedor provee un rápido calentamiento; por ejemplo una manguera de 1/2" con agua a 20°C bajo una irradiación de 900W/m<sup>2</sup> puede llegar a 50°C en 20 minutos. Sin embargo, y tal como ha sido discutido en los trabajos anteriores, una larga manguera presenta una gran resistencia hidráulica y por lo tanto presenta una casi nula capacidad de circulación termosifónica. Una manera novedosa de resolver este desafío es

mediante el uso de la presión de red como fuerza impulsora (la cual provee una presión del orden de mil veces superior a la termosifónica) que hemos utilizado en los trabajos anteriores. Sin embargo, esta alternativa implica el uso de un micro controlador, sensores y servomecanismos varios si queremos acumular la energía en un tanque bien aislado al cual la manguera vierte su contenido en forma pulsada intermitente (Juanicó and Di Lalla, 2016) o por el contrario, implica sacrificar el desempeño nocturno si nos resignamos a un sistema simple absorbedor-acumulador (Juanicó and Di Lalla, 2013 y 2014).

En este trabajo se presenta una nueva configuración para resolver el desafío anterior. Consiste en la aplicación de una mini-bomba (~2W) que fuerce la recirculación entre el colector “manguera” y el tanque aislado. En un trabajo anterior (Di Lalla y Juanicó, 2013) presentamos un diseño basado en este concepto, que utilizaba una bomba (tipo bomba de gasolina de automóvil de 12 voltios, o tipo bomba de descarga de lavarropa de 220 voltios CA) alimentada externamente y regulada por un termostato (tipo interruptor eléctrico utilizado para controlar el electro-ventilador de radiador de auto) calibrado convenientemente (por ejemplo, a 40°C). Este esquema funcionaba satisfactoriamente, generando un pulso intermitente recirculador cada vez que la manguera (colector solar) alcanzaba la temperatura prefijada. Sin embargo, dificultades sobrellevadas para conseguir este termostato especialmente calibrado a nuestros fines, nos ha motivado a plantear un nuevo diseño, autónomo y auto-controlado, que elimine este termostato y también la necesidad de una alimentación externa.

Cuando hablamos de aplicaciones térmicas domésticas, las potencias de recirculación requeridas son muy bajas, y como hemos verificado en este trabajo, la bomba puede ser energizada mediante un pequeño panel fotovoltaico (de unos pocos watts), lográndose así, una automatización simple, independiente y sustentable (figura 1). La bomba producirá la recirculación solamente en momentos en los que exista cierta radiación umbral, mientras que en los momentos de muy baja, o nula radiación (como la noche, cuando no se quiere que recircule!), se cortará la recirculación manteniendo estanca el agua del tanque preservando el calor acumulado por este. Esta concepción de colector por recirculación forzada tiene además la ventaja adicional de permitir que el tanque pueda ser colocado bajo el techo (al mismo nivel que el colector y no necesariamente sobre éste) y en el interior de la vivienda, una ventaja muy importante sobre todo en zonas frías, como ilustra la figura 1.



*Figura 1. Esquema del colector solar propuesto: es asistido por un bombeo fotovoltaico de muy baja potencia.*

Las primeras experiencias realizadas en este trabajo con pequeños prototipos experimentales, podrán servir para extrapolar las conclusiones para desarrollar sistemas térmicos pequeños aplicables a viviendas, o de mayor escala para posibles usos industriales.

#### *Consideraciones termohidráulicas sobre la convección natural en los colectores planos.*

Como se sabe, la mayoría de los colectores solares trabajan por circulación termosifónica, esto es, el intercambio de agua entre el colector y el tanque (siempre ubicado en la parte superior) se produce cuando existe un gradiente de temperaturas entre ambos. Por efecto de la radiación solar, en cierto

instante, la temperatura media del agua del colector "T<sub>c</sub>" supera a la del tanque "T<sub>T</sub>", generando una diferencia de densidades "Δδ" entre ambas masas de agua, activando así las fuerzas ascensionales, o sea, el mecanismo termosifónico, figura 2.

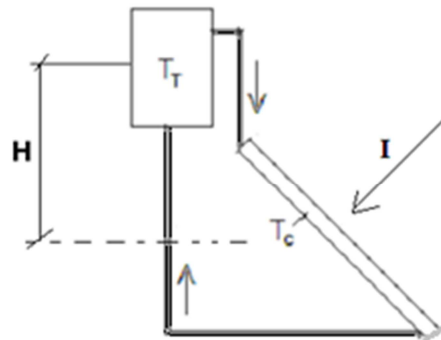


Figura 2. Esquema ilustrativo: convección natural.

Si el tanque está ubicado a cierta altura "H" respecto del baricentro del colector, la diferencia de presión "ΔP" generada por las diferencias de temperaturas entre las masas de agua del colector y del tanque se puede aproximar mediante la expresión (1).

$$\Delta P = g H \Delta \delta \quad (1)$$

Como ejemplo para estimar la ΔP termosifónica generada en un colector solar plano típico hagamos unos cálculos:

Consideremos un colector cuyo tanque se encuentra a una altura H=1,5 metros respecto del centro del colector, y que la temperatura del agua en el colector en cierto instante del calentamiento diurno es T<sub>c</sub>=35°C, entonces la densidad del agua en el colector es δ<sub>c</sub> = 994,08 Kg/m<sup>3</sup>. Por otro lado si consideramos que la temperatura del agua del tanque es ese instante es T<sub>T</sub> = 25 °C, la densidad de esa masa de agua es 997,13 Kg/m<sup>3</sup>. Haciendo el cálculo a través de la expresión (1) se obtiene un valor de diferencia de presión termosifónica de aproximadamente 45 Pa, o sea el equivalente a menos de 5 mm de columna de agua. Como vemos este valor es muy chico, con lo cual si queremos aprovecharlo al máximo, y lograr la tan importante circulación termosifónica, es necesario un diseño donde las pérdidas de presión hidráulicas en todo el circuito, y en particular en el absorbedor sean suficientemente bajas.

En el caso de los absorbedores de manguera debido a su longitud, las resistencias hidrodinámicas son mucho más elevadas que las que presentan los absorbedores tipo "grilla", con lo cual dado a las bajísimas fuerzas ascensionales existentes la circulación termosifónica se ve fuertemente restringida. Una manera de dar solución a este inconveniente, y vencer las resistencias hidrodinámicas intrínsecas de los serpentines es producir la recirculación a través de una bomba. Y tal como lo hemos constatado, si bien las resistencias hidrodinámicas de los serpentines propuestos son mayores a los presentados por los del tipo rejilla, para sistemas de escala doméstica sus potencias absorbidas en la recirculación pueden ser compensadas con la energización mediante un panel fotovoltaico de bajísima potencia (algunos watts). Con esta aplicación se logrará un sistema totalmente autónomo que regulará el caudal de recirculación según sea la radiación instantánea incidente, sin la necesidad de incorporar controladores electrónicos adicionales.

*Consideraciones respecto de los posibles materiales para la cubierta de un colector de bajo costo.*

La concepción integral de sistemas de auto construcción de bajo costo de calentamiento de agua por energía solar térmica, requiere tener en cuenta pautas fundamentales como ser: un diseño adecuado (facilidad de construcción y confiabilidad), una elección de materiales convenientes (de fácil acceso, durables, en lo posible livianos, y económicos), y utilizar tecnologías accesibles para un usuario

promedio. En orden a estas pautas se hacen algunas consideraciones respecto de la cubierta transparente.

La cubierta de un colector solar es una de las partes constitutivas que requiere una buena elección, en este sentido, y teniendo en cuenta las pautas anteriores, los materiales plásticos traslúcidos se destacan. Los mismos poseen en muchos casos costos muy interesantes, son livianos, resistentes y de fácil mecanizado. Además presentan buenas propiedades ópticas (transmitancias superiores al 70%) y algunos de ellos filtran la radiación UV.

La Tabla 1 muestra varias alternativas de materiales plásticos candidatos para la elaboración de una cubierta de bajo costo, se adjuntan sus transmitancias y sus costos unitarios (se comparan con el vidrio común de 4 mm que es a menudo utilizado en aplicaciones corrientes

Material	Transmitancias solares promedio	Protección UV	Precio \$/m <sup>2</sup>
Vidrio común de 4 mm	0,70		300
PET lámina de 0,75mm	0,91	no	100
PC alveolar de 4mm	0,81	sí	110
PC alveolar de 8mm	0,71	sí	200
PE con burbujas de aire (burbuja de 10 mm) 1 capa	0,87	no	4
PE con burbujas de aire ((burbuja de 10 mm) 2 capas	0,77	no	8
PE con burbujas de aire (burbuja de 10 mm) 3 capas	0,70	no	12
PE con burbujas de aire ((burbuja de 10 mm) 4 capas	0,63	no	16
PET 0,75mm + 1 PE ( 10 mm)	0,82	no	104
PE con burbujas de aire (burbuja de 30 mm) 1 capa	0,87	no	10
PE con burbujas de aire (burbuja de 30 mm) 2 capas	0,76	no	20
PE con burbujas de aire (burbuja de 30 mm) 3 capas	0,63	no	30
PE con burbujas de aire (burbuja de 30 mm) 4 capas	0,51	no	40

Tabla1. Transmitancias solares y precios aproximados de distintos materiales plásticos.

La transmitancia óptica de la cubierta y la absorbancia de la manguera son parámetros que determinan la eficiencia óptica "a<sub>0</sub>" de un colector. Este coeficiente junto al coeficiente de pérdidas global "a<sub>1</sub>", a su vez, definen la eficiencia de conversión fototérmica "η" del colector, a través de la ec 2.

$$\eta = a_0 - a_1 (T_m - T_a) / I_n \quad (2)$$

Por ejemplo, eligiendo de la Tabla 1 como cubierta a la lámina de PET de 0,75 mm, podemos lograr muy buenos valores de a<sub>0</sub>. Un alto a<sub>0</sub> significa un muy rápido calentamiento al principio, cuando no existen grandes saltos térmicos (T<sub>colector</sub>-T<sub>ambiente</sub>). Ésta elección, por lo delgado del material, traerá como consecuencia mayores pérdidas al exterior (mayor a<sub>1</sub>), éstas aumentarán proporcionalmente con el aumento de la temperatura del colector, y serán aún más importantes en climas fríos, obteniéndose como resultado rendimientos muy bajos. Esta elección es muy conveniente en zonas de climas templados o cálidos. En aplicaciones para zonas de climas fríos existen las alternativas de cubiertas

constituidas con varias capas, donde se prioriza la aislación térmica, en estos casos las transmitancias, según la Tabla 1, caen a valores aceptables.

## PARTE EXPERIMENTAL

### ABSORBEDOR DE MANGUERA DE PEBD

Como se dijo, una manera de elaborar a muy bajo costo un absorbedor fototérmico es a través de la aplicación de manguera de PEBD. Nosotros lo hemos elegido, a continuación se muestran distintas experiencias básicas realizadas con este tipo de absorbedores.

#### *Curvas de calentamiento de mangueras de PEBD*

Los absorbedores de manguera de PEBD además de presentar simplicidad de elaboración y bajos costos de materiales, muestran una gran rapidez de calentamiento cuando están sometidos a la radiación solar. Esto ocurre fundamentalmente debido a su alto valor de absorbancia solar ( $\alpha \sim 0,94$ ) y a su moderada selectividad espectral (Di Lalla y Juanicó, 2012). En la figura 3 puede apreciarse la evolución de temperaturas, por calentamiento solar, del agua en el interior de mangueras de distintas medidas.

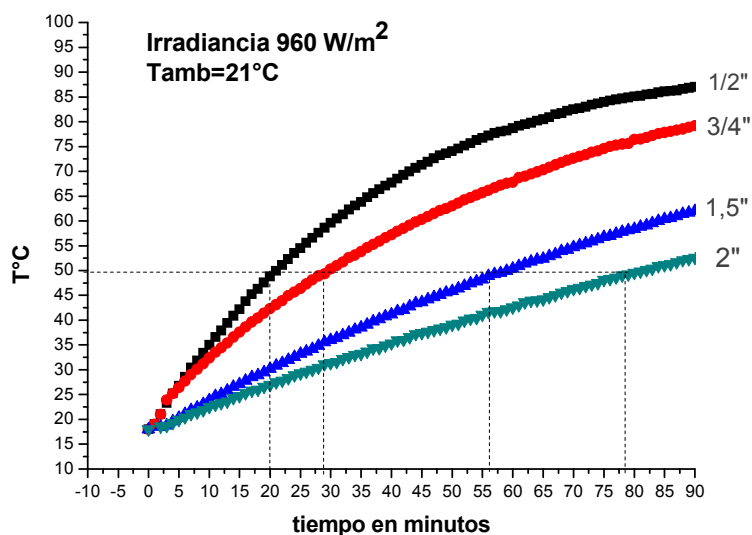


Figura 3. Evoluciones de temperaturas por calentamiento solar de varias medidas de mangueras de PEBD.

Para ilustrar lo anterior, la Tabla 2 muestra los tiempos en que tardan distintas medidas de mangueras en llegar a una temperatura útil (50°C) un día templado de alta radiación solar (960W/m<sup>2</sup>), todas las mangueras fueron envueltas con una capa de polietileno de burbuja de aire de 10 mm de diámetro

Diámetro de manguera	Tiempo de calentamiento desde 20°C hasta 50°C ( I = 960 W/m <sup>2</sup> )
0,5''	20 min
0,75''	30 min
1,5''	55 min
2''	80 min

Tabla 2. Se muestran los tiempos de calentamiento del agua en distintas mangueras.

#### *Caudales y saltos térmicos instantáneos en un absorbedor de manguera*

Para realizar ciertas experiencias hidráulicas y térmicas se ha elaborado un absorbedor en espiral de 74 m de manguera de 3/4" K4, este fue recubierto con una capa de un film de polietileno con burbujas de aire (de 3 cm), que presenta mejor aislación térmica respecto del usado en las experiencias de la figura 3, pero puede ser utilizado cualquier otro material de la Tabla 1. Ésta cubierta además de ser muy económica presenta una transmitancia solar promedio del 87%, y brinda además una interesante aislación térmica proporcionada por el aire que encapsula, muy útil para épocas frías.

Para medir los saltos térmicos proporcionados por este absorbedor se hicieron circular distintos caudales de agua (todos constantes), para cada caudal, y conociendo la radiación incidente sobre el colector (al medio día  $I_{media} \sim 800 \text{ W/m}^2$  en todos los casos) se midieron los valores de temperaturas de entrada y de salida del agua, ver figura 4. Siempre para cada caudal se trató de llegar al estado estacionario, o sea además de mantener constante el caudal, se debe mantener constante el salto térmico entre la entrada y la salida, esto ocurre aproximadamente en 10 minutos. La gráfica de la figura 5 muestra los valores obtenidos.

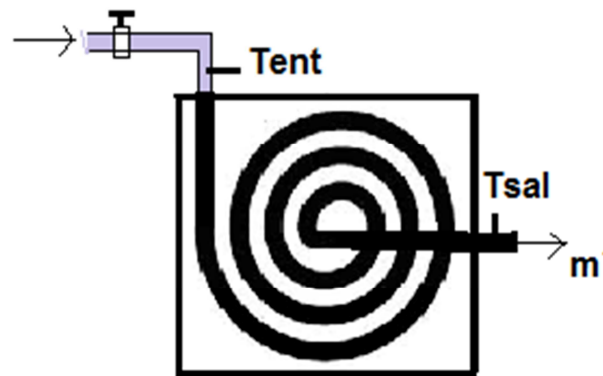


Figura 4. Esquema experiencia en la que se midió para cada caudal los respectivos saltos térmicos instantáneos que aporta el absorbedor.

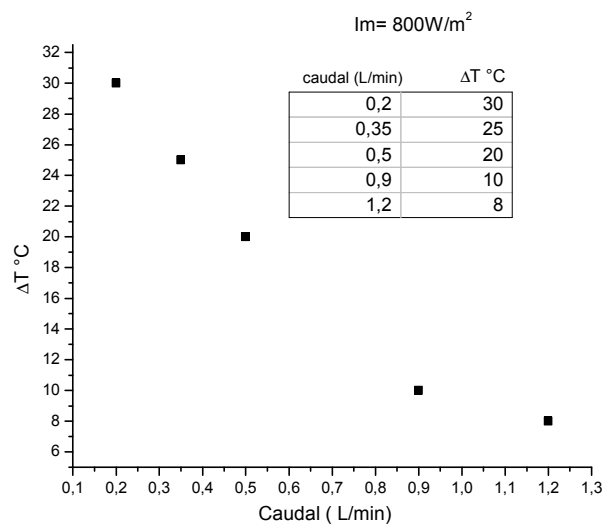


Figura 5. Saltos térmicos logrados en un absorbedor conformado por 74 metros de manguera de 3/4" para distintos caudales de circulación ( $I_m = 800 \text{ W/m}^2$ ).

#### Caracterización hidráulica del absorbedor

El absorbedor fue ensayado hidráulicamente con el fin de determinar su curva resistente. A tal efecto, utilizando distintos desniveles entre la entrada y la salida (utilizando un tanque elevado) se midieron los distintos caudales establecidos. De esta manera se puede estimar la potencia hidrodinámica útil y así elegir la bomba de recirculación necesaria. La Tabla 3 da los resultados obtenidos y los cálculos de las potencias absorbidas por el espiral.

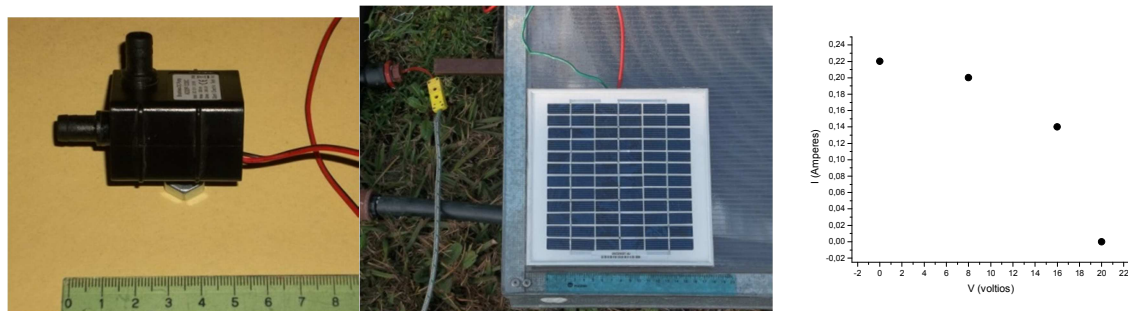
H ( metros)	Caudales (L/min)	Pot= $\delta gH$ (Pa) x Q (m <sup>3</sup> /s) ( watts)
0,25	0,86	0,036
0,6	1,6	0,16
1	2,4	0,4
1,8	4,3	1,3

Tabla 3. Caudales producidos por un desnivel H en un espiral de 74 metros de manguera de 3/4". También se dan las potencias absorbidas por la manguera en cada caso

Como se ve, las potencias requeridas para el bombeo y lograr estos caudales son muy bajas. Con lo cual hemos decidido probar la aplicación de una pequeña bomba, y en lo posible buscar que opere a 12 Voltios de tal manera de que la energía para activarla pueda ser suministrada directamente a través de un pequeño panel fotovoltaico.

### LA BOMBA DE RECIRCULACIÓN UTILIZADA

Atentos a lo obtenido en las experiencias anteriores, se buscó la bomba de menor potencia ofertada en el mercado. Finalmente, para realizar distintas pruebas, se adquirió una bomba del tipo para pecera de 3Watts que trabaja con un voltaje nominal de CC de 12 V (150\$). La misma, según el fabricante, posee cojinetes cerámicos, puede trabajar a temperaturas cercanas a los 75°C sin problemas, y consta de dos conexiones de 3/8". La bomba es energizada mediante un panel fotovoltaico de 3 Wp (250\$). Los valores de voltaje de circuito abierto y de corriente de cortocircuito del panel son Voc= 22 V y Isc= 0,21 A. Las figuras 6 muestran las fotos de la bomba y del pequeño panel, además la gráfica I vs V de este último.



Figuras 6. Fotografías de la pequeña bomba de recirculación y del panel fotovoltaico utilizados en este trabajo, además la curva característica del panel a 1000W/m<sup>2</sup>.

### Características H (altura de elevación) vs Q (caudal) de la bomba

Para poder conocer el potencial de bombeo de la bomba adquirida, se midieron los caudales que puede suministrar a distintas alturas de elevación. Entonces fue trazada la curva característica H vs Q, estas experiencias se hicieron a un voltaje constante suministrado por una batería (12V). La Tabla 4 muestra lo obtenido, se adjuntan los valores de las potencias eléctricas consumidas por la bomba para cada par de valores de H y Q. Estos valores son graficados en la figura 7.

Se observa que el caudal máximo en boca de la bomba (a 12 V) es de aproximadamente 2,5 litros/min. Además se infiere, que al ser la altura máxima de bombeo aproximadamente 2,10 metros, que el  $\Delta p$  que aplica esta bomba cuando trabaja a ese voltaje es de aproximadamente 21 KPa.

Finalmente, se realizó la intersección entre las características de la bomba y la curva resistente del espiral (valores de la Tabla 3), para poder estimar el punto de trabajo del sistema, figura 8. Se observa que en el punto de trabajo ubica un caudal de aproximadamente Q = 1,8 L/min.

Q (litros/min)	H ( metros)	I (Amperes)	Potencia eléctrica consumida (Watts)
2,5	0	0,21	2,5
2,4	0,3	0,21	2,5
2,2	0,6	0,20	2,4
2	0,9	0,20	2,4
1,8	1,1	0,20	2,4
1,6	1,3	0,19	2,3
1,3	1,6	0,19	2,3
0,55	1,9	0,19	2,3
0	2,1	0,19	2,3

Tabla 4. Alturas de elevación y los respectivos caudales dados por la bomba utilizada (conectada a 12V). Además se dan las respectivas potencias eléctricas consumidas por la bomba.

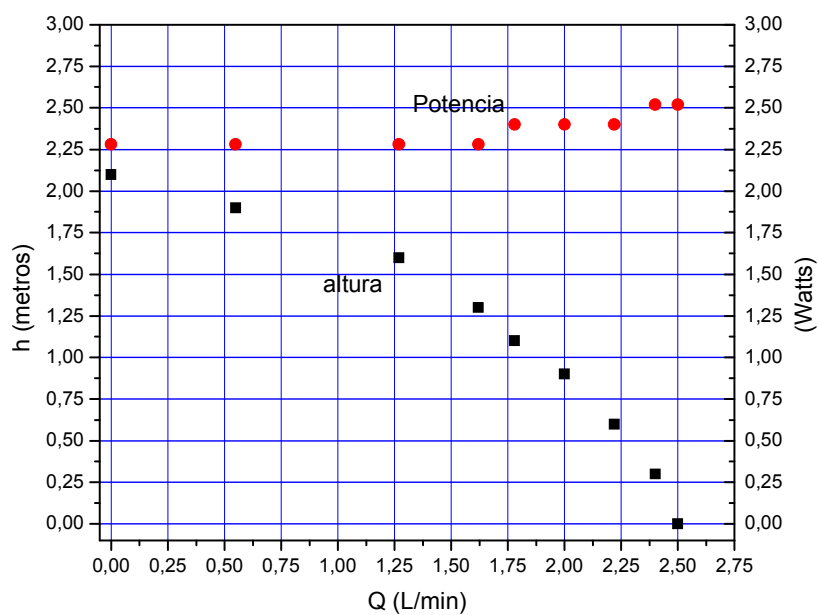


Figura 7. Alturas de elevación vs caudales, y las respectivas potencias consumidas por la bomba (conectada a 12V).

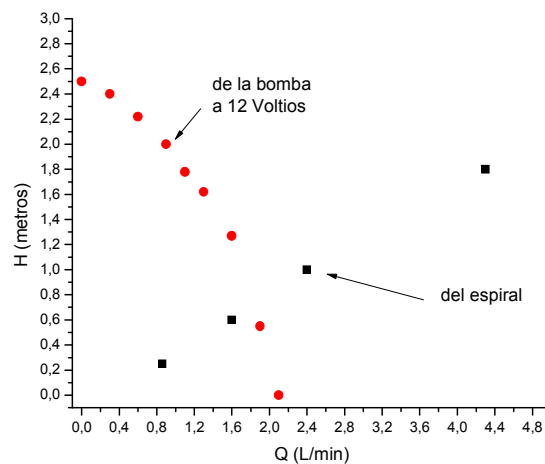


Figura 8. Intersección entre las características de la bomba y la curva resistente del espiral.



## ARMADO DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR RECIRCULADO CON MINI PANEL FV

*Estimación de la longitud de la manguera absorbidora según la masa de agua a calentar en el tanque.*

Se armó un sistema recirculado (como el de la figura 1) con la pequeña bomba y el mini panel fotovoltaico de 3Wp, con el fin de realizar varias experiencias y decidir una relación entre la longitud de manguera a utilizar en el absorbedor y la masa de agua a calentar en el tanque; buscando que para la más desfavorable condición (invierno) se pueda lograr una temperatura útil en el agua del tanque. Entonces, utilizando un tanque térmico de construcción casera de 50 litros aislado mediante 3 cm de poliestireno expandido de mediana densidad, y externamente recubierto por otro tanque plástico, se procedió a medir en tres situaciones distintas la rapidez de calentamiento del agua del tanque. Las situaciones fueron utilizando tres relaciones distintas de longitud de manguera / vol de agua a calentar en el tanque. Estas relaciones fueron: 0,5, 1 y 1,5 metros / litro, se usó solamente la medida  $\frac{3}{4}$ ", y por economía los espirales fueron recubiertos con films de polietileno con burbuja de aire (/de 3 cm de diámetro). Las mediciones se hicieron en condiciones equivalentes de radiación y temperatura ambiente. La figura 9 muestra lo obtenido para una radiación promedio de  $700\text{W/m}^2$  y una temperatura ambiente media aproximada de  $11^\circ\text{C}$ . La Tabla 5 muestra las tasas de calentamiento obtenidas en cada caso.

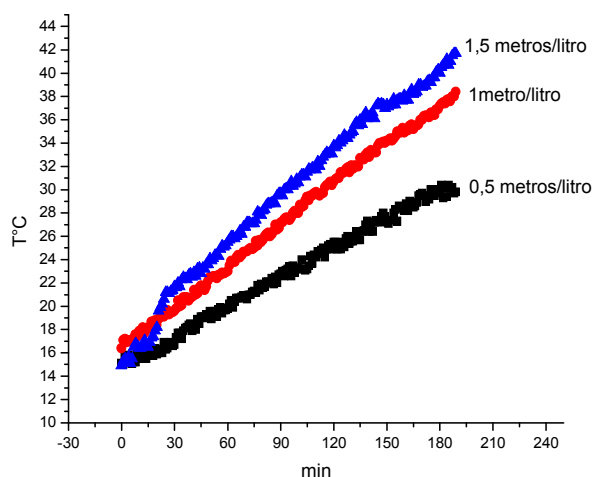


Figura 9. Calentamiento en invierno del agua del tanque para tres relaciones distintas de longitud de manguera / litro de agua del tanque.

Cantidad de manguera /litro de agua del tanque	Rapidez de calentamiento
0,5 metros / litro	4,25 °C/hora
1 metros / litro	6,25 °C/hora
1,5 metros/litro	8,5 °C/hora

Tabla 5. Tasas de aumentos de temperatura del agua del tanque en función de la cantidad de manguera utilizada (en invierno con  $T_{amb}=11^\circ\text{C}$  e  $I_m=700\text{W/m}^2$ ).

*Caracterización de un prototipo, mediciones de: caudales de recirculación y potencia consumida por la bomba.*

Considerando los valores de la Tabla 5 se decidió utilizar un prototipo que cumpla con la relación 1metro de manguera/litro de agua del tanque (que dará en invierno con buena radiación una ganancia de aproximadamente  $6,25^\circ\text{C/hora}$ ). El colector constó con el tanque de 50 litros y un absorbedor de 50 metros de manguera de  $\frac{3}{4}$ " K4 envuelta con una capa de film de polietileno con burbujas de aire de 3 cm. A este colector se lo ensayó en un día completo (de invierno) para poder establecer una

eficiencia media de conversión. El colector fue direccionado al norte con un ángulo de elevación de 20° (simulando la inclinación de un techo a dos aguas), y se estudió su comportamiento térmico e hidráulico. Se ensayó desde la mañana, en plena operación se midieron los caudales instantáneos de recirculación establecidos por la bomba para distintos valores de irradiancias (valores medidos en el plano del colector). Además se midieron la caída de voltaje en la bomba y la corriente de circulación. La Tabla 6 muestra lo obtenido.

I (W/m <sup>2</sup> )	Q (L/min)	Caída en la bomba (Voltios)	I (Amperes)	Pot= V x I (Watts)
160	0,03	5	0,03	0,15
280	0,11	5,5	0,04	0,22
480	0,25	6	0,06	0,36
540	0,3	6,2	0,07	0,43
570	0,43	6,5	0,08	0,52
650	0,66	6,6	0,13	0,8
740	0,86	6,7	0,17	1,2
800	1,18	7,8	0,18	1,40
<b>920</b>	<b>1,8</b>	<b>8,5</b>	<b>0,20</b>	<b>1,78</b>
1000	1,9	8,6	0,22	1,806

Tabla 6. Valores de caudales establecidos en el colector y potencias eléctricas consumidas por la bomba, a distintos valores de irradiancias.

Puede observarse que la bomba comienza a recircular a valores de irradiancias superiores a los 100 W/m<sup>2</sup>. Por otro lado, si consideramos, por ejemplo, la operación de la bomba al medio día (I~920W/m<sup>2</sup>) vemos que en el colector se estableció un caudal de aproximadamente 1,8 Litros/min. Puede decirse que con ese caudal en ese absorbedor el agua dentro de la manguera se renueva aproximadamente cada 8 minutos, y observando la figura 5 se puede extrapolar un valor de salto térmico entre entrada y salida de la manguera de aproximadamente 6 °C. La figura 10 muestra la ubicación de ese punto en curva I vs V del panel.

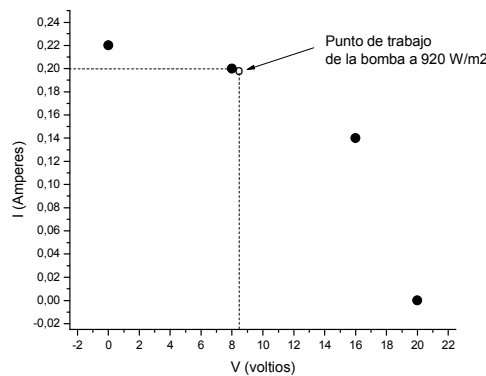


Figura 10. Punto de trabajo del sistema bomba- panel al medio día (I =920W/m<sup>2</sup>).

#### Evolución diaria de temperatura del tanque

La figura 11 muestra la evolución de temperatura del agua del tanque en un día del mes de julio desde las 10 hs hasta las 17 hs, muestra que la relación utilizada (1m/litro) es suficiente para poder llegar en invierno a una temperatura máxima de 48°C.

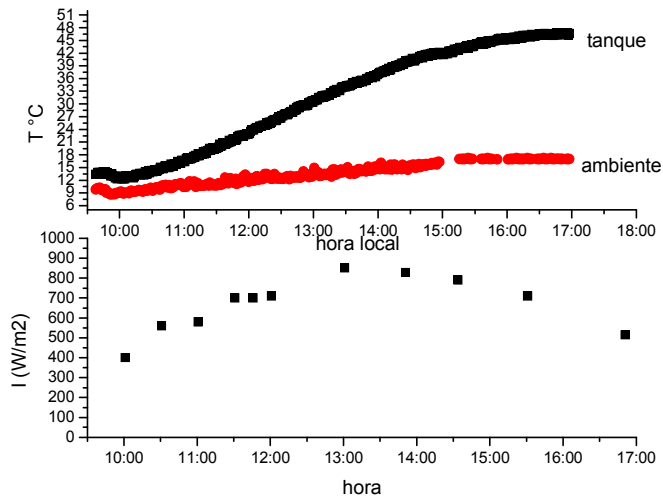
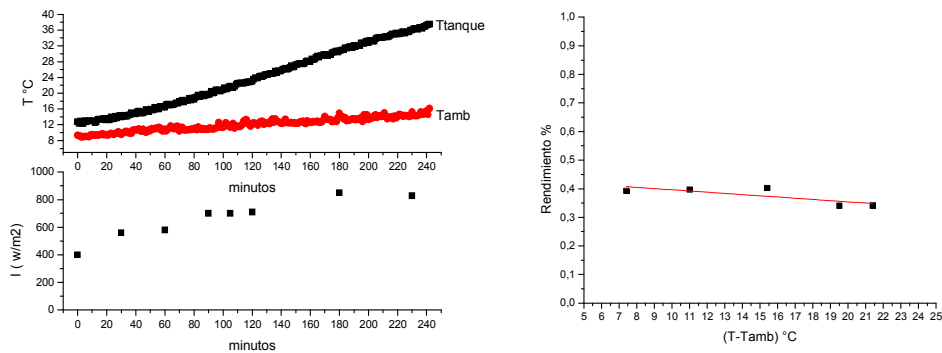


Figura 11. Evolución diaria de temperatura en invierno de un sistema recirculado armado con una relación 1 metro/litro, la temperatura máxima llegó de 48°C

*Estimación del rendimiento medio del prototipo*

Se estimó la potencia media del prototipo (a una temperatura ambiente menor a los 12°C) desde las 10 hs con el agua a 13°C, y llegando hasta los 37,5°C a las 14 hs. A continuación en las figuras 12 se muestran el gráfico de evolución de temperatura en el agua del tanque y la gráfica de eficiencia media obtenida. Como área de colección se ha utilizado el área normal de la manguera, esto es 1,2 m<sup>2</sup> En esta experiencia se obtuvo un rendimiento promedio del 37 %.



Figuras 12. Colector recirculado con bomba y minipanel fotovoltaico. Gráficas: de evolución diaria de temperaturas y de eficiencia media en invierno.

**CONCLUSIONES**

Se propone un sistema colector solar de bajo costo por recirculación forzada mediante un sistema bomba más mini-panel fotovoltaico de 3W. El mismo se basa en un diseño sencillo y robusto de flujo recirculante forzado, fácil de replicar por los propios usuarios. Esta configuración ha demostrado servir a este doble finalidad propuesta (control y alimentación autónoma) siendo sencillo e intuitivo de instalar. Nuestra propuesta además utiliza el tipo de absorbedor más sencillo y económico de elaborar: el espiral de manguera de PEBD, la cual es ampliamente conocida, pero se cuenta aquí con un mecanismo que soluciona su “histórico” problema de alta restricción hidráulica, que imposibilita la solución tradicional (termosifónico). En este sentido, nuestra propuesta es moderna y superadora: moderna porque utiliza dos tecnologías (mini bomba y mini panel PV) que no existían en los albores de la tecnología de colectores solares en los 70s, y superadora porque no recurre a complejos sistemas (como ser microcontroladores, servomecanismos, etc.) que pondrían barreras para su implementación hogareña.

Se demuestra experimentalmente que con una pequeña bomba de recirculación (~ 2W) permite recircular eficazmente el refrigerante con el tanque de acumulación, verificando los cálculos teóricos hidráulicos.

Se realizaron pruebas con un prototipo de muy bajo costo, cuya relación de 1 litro de manguera por litro de agua a calentar, mostró una eficiencia global promedio del 37%, y que en invierno (13°C ambiente) pudo llegar a una temperatura máxima de 48°C.

Se prevé a futuro realizar experiencias utilizando la misma bomba y el mismo minipanel en un sistema de mayor escala, con un absorbedor de manguera mucho más extenso y un tanque de acumulación de mayor capacidad. Sin embargo, este sistema por su gran sencillez es fácilmente escalable.

## REFERENCIAS

- Baldwin, S. F. BIOMASS STOVES: ENGINEERING DESIGN, DEVELOPMENT, AND DISSEMINATION, 1987. Center For Energy and Environmental Studies. Princeton University USA.
- Di Lalla, N. y Juanicó, L.. AVANCES EN LA ELABORACIÓN DE UN SISTEMA TERMOSOLAR AUTOMATIZADO DE BAJO COSTO QUE UTILIZA MANGUERA DE RIEGO DE PEBD. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 16, 2012.
- Di Lalla, N. y Juanico, L. Avances en la elaboracion de un calefón solar de muy bajo costo con circulacion forzada intermitente. Avances En Energias Renovables y Medio Ambiente. 1; 10-2013; 1-7.
- Juanicó, L. and Di Lalla, N. A New Low-Cost Plastic Solar Collector. Renewable Energy Volume 2013 (2013), Article ID 102947, 10 pages.
- Juanicó, L. and Di Lalla, N. "Optimization of the Hose-Based Low-Cost Solar Collector," International Journal of Renewable Energy & Biofuels, Vol. 2014 (2014), Article ID. DOI:10.5171/2014.344621
- Juanicó, L. and Di Lalla, N. The pulsed-flow design: A new low-cost solar collector. Renewable Energy, 2016, vol. 87, issue P1, pages 422-429.

## ABSTRACT

The development of simple and inexpensive design of solar thermal collectors is presented. They are based on a long LDPE hose, that works by forced recirculation assisted by a pump which is powered by a little photovoltaic panel. The feasibility of this simple and autonomous thermoidraulic configuration was experimentally demonstrated. A prototype, of 50 liters with 50 meters of hose (3/4") and a 2 W pump which is operated by 3W 12 V panel, has been elaborated. The prototype has worked with an average efficiency of 37%, reaching the water, on a winter day with solar average irradiances of 700 W / m<sup>2</sup>, a maximum temperature of 48 °C.

**Keywords:** solar collector, recirculation by photovoltaic pane