

## **AVANCES EN LA ELABORACIÓN DE UN SISTEMA TERMOSOLAR AUTOMATIZADO DE BAJO COSTO QUE UTILIZA MANGUERA DE RIEGO DE PEBD.**

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> Centro Atómico Bariloche

Tel. 011 6772-7764; email: ndilalla@gmail.com

*Recibido : 10/08/12 ; Aceptado : 05/10/12*

**Resumen:** Se muestran los primeros avances obtenidos en la elaboración de un sistema automatizado de bajo costo para el calentamiento de agua por energía solar. El mismo consta básicamente de un absorbedor lineal formado por manguera de riego de polietileno de baja densidad (PEBD) y una cubierta transparente de botellas de PET. El agua en la manguera al llegar a cierta temperatura se descarga, en forma pulsada y automática, hacia un tanque térmico de almacenamiento. Esta acción es llevada a cabo por la apertura de una electroválvula comandada por un termostato bimetálico intercalado en la manguera. Esta automatización permite que el sistema trabaje en el rango de máxima eficiencia. Para conocer las propiedades térmicas del sistema de manguera-PET se caracterizaron los materiales constituyentes y se evaluó al sistema en distintas configuraciones. Se comprobó el funcionamiento de la automatización en dos prototipos realizados con manguera de PEBD de 3/4", uno cubierto por PET y otro cubierto con policarbonato alveolar. Se evaluó la producción de agua caliente en ambos. Estos trabajos apuntan a obtener un sistema automatizado de aprovechamiento de la energía solar simple, eficiente y económico que propicie el reciclaje y la autoconstrucción.

**Palabras Clave:** colector plástico, manguera PEBD, sistema automatizado de bajo costo.

### **INTRODUCCIÓN**

Es de larga data la propuesta de utilización de materiales plásticos para aplicaciones en energía solar (Blaga A., 1978). En particular en los últimos años, existen una variada cantidad de trabajos de investigación que describen los nuevos polímeros desarrollados, el estado del arte de sus tecnologías en aplicaciones térmicas, y la durabilidad de los mismos (Kahlen et al., 2010). La potencial aplicabilidad de los materiales poliméricos en sistemas de conversión fototérmica, es debida a sus cualidades: ópticas, térmicas, químicas y mecánicas, propiedades que los hacen muy aptos para elaborar absorbedores, aislaciones, tuberías, cubiertas, tanques de almacenamiento, reflectores, soportes estructurales, etc. Los polímeros orgánicos cuentan con una gran resistencia a los agentes químicos y debido a su baja densidad presentan una alta resistencia mecánica específica. Pero principalmente, el potencial de los materiales poliméricos radica en los bajos costos de elaboración asociados al reemplazar materiales convencionales como ser metales y vidrios. Podemos citar por ejemplo materiales termoplásticos como ser: polietileno de baja densidad (PEBD) polietileno de alta densidad (PEAD), policarbonato (PC), tereftalato de polietileno (PET), poliestireno expandido (PSE), politetrafluoruro de etileno (teflón). Los distintos procesos masivos de manufactura de estos plásticos: inyectado, moldeado, extruido, laminado, termoconformado etc, permiten una amplia presentación, ya sea como opacos o traslucidos, y en distintas geometrías: films, mangueras, tubos, placas. Estos elementos a través de simples mecanizados pueden ser fácilmente adaptados para desempeñar funciones ópticas o térmicas en sistemas solares térmicos como ser colectores, destiladores, desecaderos, invernaderos, etc.

Una idea muy difundida, para el armado de sistemas de aprovechamiento solar de bajo costo, es la de elaborar los absorbedores a partir de tuberías de PEBD, pues ya cuentan con la tonalidad oscura absorbidora necesaria. Las propuestas generalmente se basan en diseños de absorbedores que permiten la fácil recirculación termosifónica del agua. En estos casos para bajar las resistencias hidráulicas, y así fomentar el movimiento convectivo, lo usual es conectar una gran cantidad de tramos de manguera en forma de parilla, lo cual muchas veces complica el armado y genera la necesidad del empleo de grandes cantidades de conexiones de empalme, aumentando la posibilidad de aparición de pérdidas en las uniones. Otra opción para generar el movimiento del agua es empleando una bomba de recirculación lo cual encarece y complica el diseño.

En el presente trabajo, en búsqueda de concebir un sistema de calentamiento de agua por energía solar, que sea de simple armado, económico y eficiente, se propone la utilización de un absorbedor lineal constituido por un único y largo tramo de manguera de PEBD. Entonces cuando del inventario de agua en el interior de la manguera llega a cierta temperatura, se produce la descarga automatizada a través de la acción de una electroválvula cuya apertura es comandada por un termostato.

Esta descarga se realiza hacia un tanque térmico de almacenamiento, y es promovida por el impulso hidráulico dado desde el extremo de entrada de la manguera por conexión a la presión de línea, o a un tanque a sobre nivel. El agua que se acumula en el tanque térmico satisfará la demanda vespertina y nocturna de agua caliente. La descarga se produce cuando el agua se encuentra entre ciertos valores de temperatura dados por la histéresis del termostato bimetalico elegido, por ejemplo puede ser entre 45°C y 55°C (termostato 35-45). Al vaciarse la manguera una cantidad equivalente de agua fría hace su ingreso a la misma, permanece estacionada hasta calentarse y se vuelve a realizar la descarga. El sistema así propuesto, al forzar al agua a no sobrepasar cierta temperatura, impide el sobrecalentamiento de la manguera en épocas de alta radiación, protegiéndola del deterioro (la temperatura de ablandamiento del PEBD es  $\approx 80^{\circ}\text{C}$ ). Además, al mantener al sistema operando por debajo de la temperatura límite, se controlan las pérdidas de calor hacia el exterior, mejorando el rendimiento térmico de conversión. Para mejorar la ganancia térmica de la manguera esta es rodeada con una cubierta transparente, por ejemplo una forma económica es a través de botellas de PET.

Por comodidad y seguridad la electroválvula empleada es de 12 voltios, esa tensión puede ser suministrado por una batería de automotor, o por un transformador. La electroválvula por conveniencia es normal cerrada (NC) para que trabaje solo al momento de la descarga, y así evitar el consumo eléctrico pasivo en su bobinado por la noche, o de día cuando no hay suficiente radiación. Para preservar los contactos del termostato se utilizó un contactor tipo relay. Todos los elementos utilizados en este diseño son de industria nacional.

La figura 1 muestra un esquema del sistema propuesto. La manguera de PEBD que, en principio, se sugiere es la de  $\frac{3}{4}$ " K4, medida compatible con los diámetros de los picos de las botellas de PET de 1,5 y 2 litros, de uso corriente, y así propiciar el fácil engarzado de las mismas.

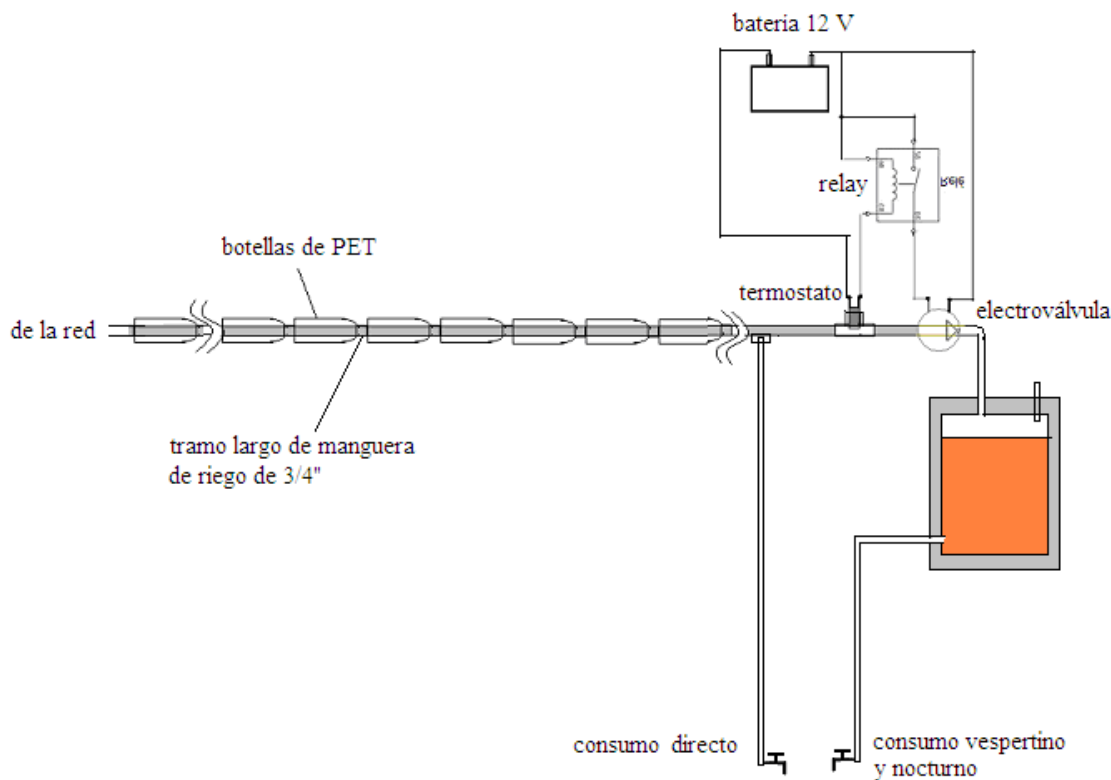


Figura 1. Esquema del sistema termosolar automatizado de bajo costo elaborado a partir de manguera de riego de PEBD.

Es importante destacar que un absorbedor lineal elaborado con manguera presenta una relación A/V (área normal de colección de la manguera/volumen de agua contenida por ella) mucho más alto que el de un colector convencional, por ejemplo al utilizar 100 m de manguera de PEBD de  $\frac{3}{4}$ " el inventario de agua en su interior es de aproximadamente 25 litros, y el área de colección dado por el área normal de la manguera es de aproximadamente  $2,1 \text{ m}^2$ . Teniendo en cuenta que un colector convencional de  $2 \text{ m}^2$  puede contener más de 5 veces ese volumen, queda claro que el sistema de absorbedor lineal, si es adecuadamente diseñado podría dar, a un costo mucho menor, agua suficientemente caliente por la media mañana. La cantidad de esta agua caliente a disposición dependerá entonces de utilizar tramos largos de manguera. Por último digamos que debido a la referida alta relación A/V con que cuenta el sistema de manguera absorbadora, este experimenta un rápido enfriamiento vespertino, de aquí la necesidad de almacenar el agua caliente que se va produciendo durante el día en un tanque térmico, para su uso vespertino y nocturno.

## PARTE EXPERIMENTAL

### Metodología empleada

Las etapas de investigación llevadas a cabo para este reporte las podemos resumir por los siguientes pasos:

Se caracterizaron los materiales utilizados (PEBD, PET, PC alveolar).

Se evaluó el comportamiento de la manguera como absorbedor en distintas configuraciones.

Se evaluó el comportamiento de la automatización propuesta en un prototipo, elaborado a escala reducida tal como muestra la figura 1, y su producción de agua caliente.

Para comparar, se elaboró y evaluó un sistema equivalente al anterior, pero esta vez remplazando a la cubierta de PET por una placa de policarbonato alveolar.

## CARACTERIZACIÓN ÓPTICA Y TÉRMICA DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

### Caracterización del PET

Las botellas de PET propuestas como cubierta de la manguera de PEBD son del tipo cristal de uso corriente, el espesor de las mismas es de 0,4 mm. La figura 2 muestra las transmitancias en el UV-visible de botellas de PET de varias bebidas comerciales.

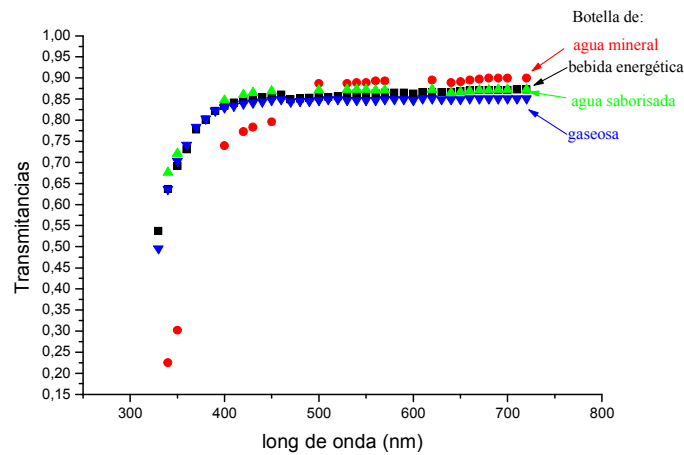


Figura 2. Transmitancias en el UV- visible de botellas de PET de uso corriente.

Se observa que las transmitancias de los materiales de PET utilizados por las distintas empresas son similares, mostrando en el visible valores entre el 80 y el 90%. Por lo tanto, en este sentido, el material de las botellas de PET de uso corriente califica perfectamente como cubierta.

La figura 3 muestra los espectros de transmitancias y reflectancias infrarrojas del material de la botella de agua mineral.

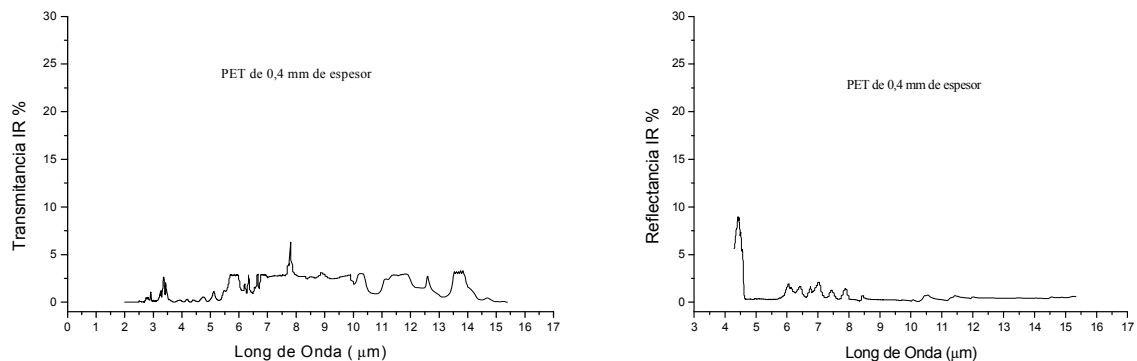


Figura 3. Espectros de transmitancias y reflectancias IR del PET de agua mineral.

Los espectros de reflectancias y absorbancias IR, muestran que el material de PET de las botellas de agua mineral no refleja la radiación proveniente del absorbedor, pero tampoco la transmite, la absorbe.

#### Caracterización del PEBD

La manguera de PEBD posee de fábrica la adición del negro de humo lo que, además de protegerla, le otorga un alto coeficiente de absorción, cercano a  $\alpha = 0,94$ . Por otra parte, en la figura 4, que muestra el espectro de reflectancias en el IR de esta manguera, se observa un interesante comportamiento reflectivo. Podemos observar que la superficie de la manguera negra de PEBD presenta, en el rango medido, un valor de reflectancia IR mayor al 50%, por lo tanto la superficie de la manguera presenta cierta selectividad espectral.

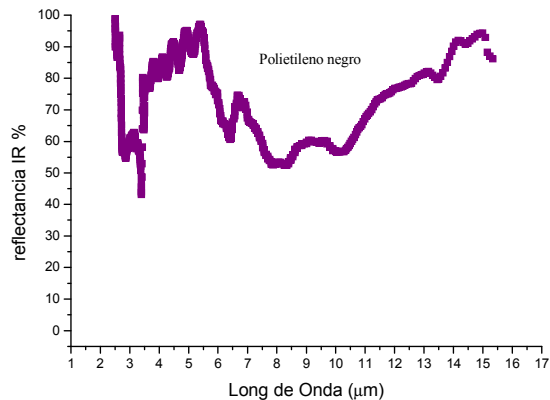


Figura 4. Espectro de reflectancias IR de la manguera negra de PEBD.

#### Caracterización del PC alveolar

Se ensayó una muestra de policarbonato alveolar de 8 mm de espesor, la figura 5 exhibe los espectros obtenidos de transmitancias en el UV-visible y de reflectancias en el IR.

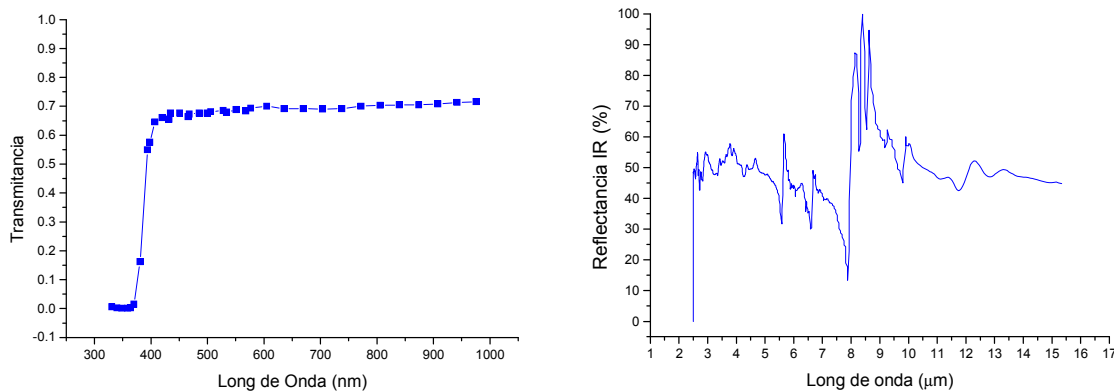


Figura 5. Espectrogramas de transmitancias en el UV-visible, y reflectancias en el IR de policarbonato alveolar de 8 mm de espesor.

El efecto de la doble pared de la cámara de aire, que da al PC alveolar propiedades aislantes, hace que su transmitancia promedie el 70% en el espectro visible. Si bien la transmitancia visible de esta cubierta es menor a la del PET, se espera que la doble pared alveolar proporcione más aislación sobre todo en épocas frías. En este espectrograma además se observa el efecto de la protección UV (una fuerte absorbancia por debajo de los 400 nm). Por otra parte se observan valores muy interesantes de reflectancias IR en las longitudes de onda de máxima emisión del absorbedor si opera a 60°C ( $\lambda_{max} = 8,7 \mu m$ ) lo que indica que el PC alveolar actúa como un buen espejo de calor para esa radiación.

#### CARACTERIZACION DEL SISTEMA MANGUERA-PET

Se realizaron una serie de ensayos para poder caracterizar el comportamiento de la manguera de PEBD como absorbedor solar bajo distintas configuraciones. En orden a esto, es importante destacar que gracias a la geometría tubular del absorbedor ( $L \gg d$ ), los resultados obtenidos en ensayos realizados con tramos cortos de manguera de determinado diámetro, son perfectamente extrapolables a tramos de cualquier longitud de esta, este hecho facilita y simplifica la elaboración de sistemas para ensayar.

Entonces, en orden a esto, se cortaron tramos de manguera 1 metro de longitud y fueron ensayados bajo distintas configuraciones. Las mediciones de temperaturas se realizaron con termocuplas tipo K, utilizando un adquisidor de datos MyPClab de la marca Novus. La irradiancia fue medida a través de un solarímetro de fotocelda de Si.

La figura 6 muestra la mejora en el salto térmico del agua dentro de la manguera al recubrirla con PET en comparación con la manguera desnuda. Se observa que la cubierta de PET introduce en verano sobretemperaturas de hasta 25°C.

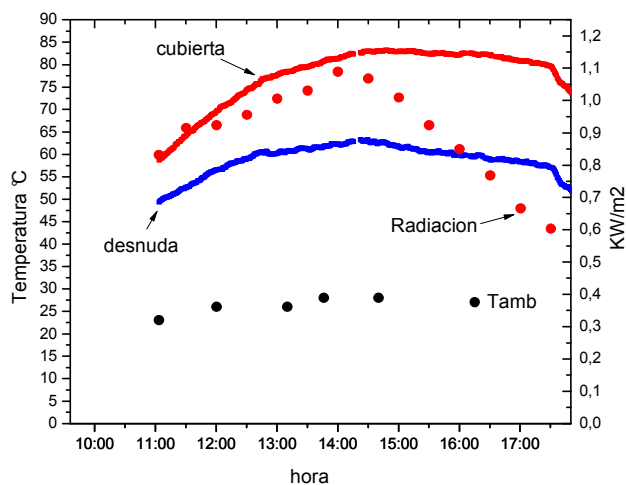


Figura 6. Mejora en el salto térmico al recubrir la manguera con la cubierta de PET.

También se evaluó la conveniencia de utilizar una doble botella de PET. Esto es, recubriendo la manguera con botellas de 1,5 litros, y estas a su vez con botellas de 2 litros. La figura 7 muestra la comparación de las evoluciones de temperaturas en sistemas de manguera recubiertas con simple y doble cubierta de PET. Como se observa, la ganancia de temperatura no se ve sustancialmente incrementada por la incorporación del doble PET, por ejemplo a los 50°C la mejora porcentual de temperatura es a lo sumo de un 5%. Esta pequeña ganancia no justifica la complicación adicional introducida por la aplicación del doble PET.

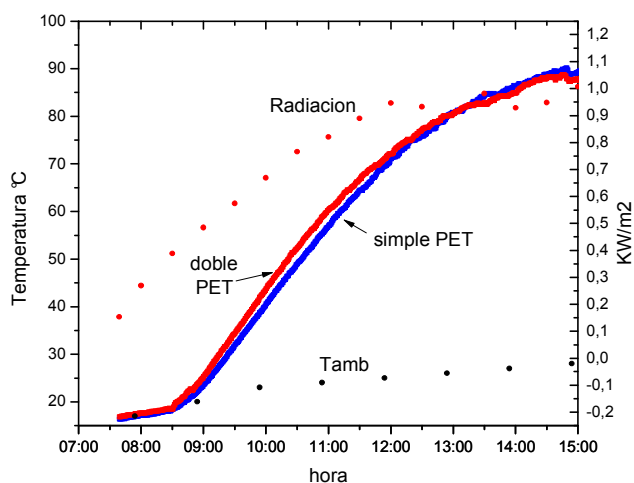


Figura 7. Comparación de evoluciones de temperaturas de manguera cubierta por simple y doble cubierta de PET.

Como puede observarse en esta última gráfica, en épocas de alta radiación, si no se controla la temperatura del sistema, esta puede fácilmente superar los 90°C lo que produciría el deterioro de los materiales. La acción del sistema de descarga automática evita este sobrecalentamiento. Por otra parte, es importante notar que por la mañana el agua experimenta un muy rápido ascenso de temperatura. Esto ocurre debido a dos factores, primero: a que el sistema de absorbedor de geometría tubular manguera-PET posee una capacidad multidireccional de captación de los rayos solares, permitiendo, a diferencia de los colectores planos, la colección de los primeros rayos matutinos; segundo: a la alta relación área de colección de la manguera/volumen de agua contenido en ella. Para ilustrar este hecho la figura 8 muestra las evoluciones de temperaturas del sistema manguera botella de PET por la mañana en dos días soleados, uno de invierno y otro de verano.

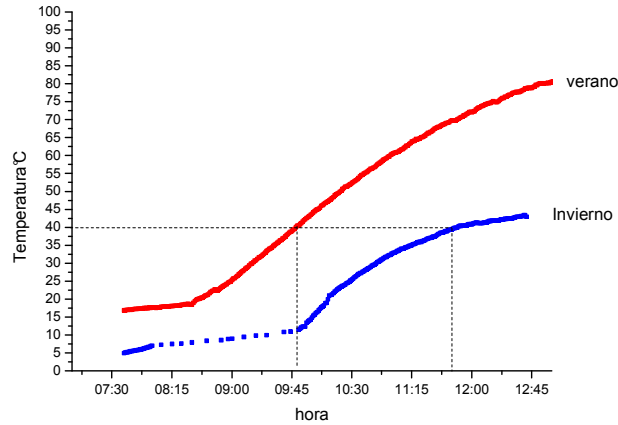


Figura 8. Evoluciones de temperatura del sistema manguera-PET por la mañana, en verano e invierno.

Puede observarse que por la mañana el agua en la manguera puede acceder rápidamente a temperaturas razonables para su utilización. Por ejemplo en verano el agua llega a 40°C antes de las 10:00 AM, y en invierno antes del medio día. Para ejemplificar digamos que si se cuenta con un sistema de manguera absorbidora de 3/4" de 200 m de longitud, en esos horarios se estaría en condiciones de disponer de 50 litros de agua a 40°C a muy bajo costo. El diseño de sistema manguera-PET que se propone en la figura 1 cuenta con una conexión de consumo directo, esta permitiría la utilización de este volumen de agua caliente por la mañana.

Por otra parte, para estimar el rendimiento medio de conversión del sistema manguera-PET se obtuvo la gráfica de la figura 9.

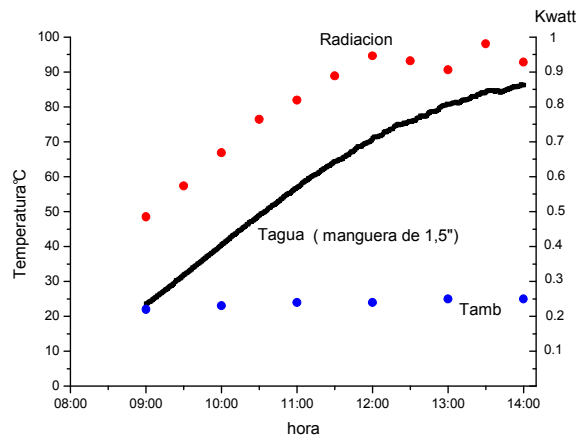


Figura 9. Gráfica para estimación del rendimiento medio de conversión del sistema manguera-PET.

El rendimiento medio de conversión ( $\eta$ ) del sistema manguera-PET se estimó utilizando los datos graficados en la figura 9, lo cual se hizo considerando la expresión (1)

$$I A \eta \Delta t = m c_p \Delta T \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que el área frontal de captación de la manguera de diámetro "d" es  $A = d L$  y que  $m = \delta V$ , la ecuación (1) se reduce a una expresión en función de los datos experimentales relevantes, ec.(2)

$$\eta = \pi d c_p \delta \Delta T / I \Delta t \quad (2)$$

Entonces utilizando la expresión (2) se puede estimar el rendimiento medio de conversión del sistema manguera-PET. Por ejemplo en el periodo entre las 10 y las 11 horas, donde el agua ya se encuentra entre 40 y 57 °C, y considerando una irradiancia media de 750 W/m<sup>2</sup>, el rendimiento térmico medio estimado da un valor superior al 70%.

#### EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO COLECTOR MANGUERA –PET, AUTOMATIZADO.

Para evaluar el funcionamiento del sistema de descarga automatizada, se elaboró un prototipo, a pequeña escala, tal como lo indica la figura 1. Para ello se utilizaron 20 metros de manguera negra de PEBD de 3/4" K4, y se engarzaron en ella las

suficientes botellas de PET de agua mineral de 2 litros hasta cubrir su longitud. Se utilizó un termostato de valores de histéresis 35-45 y una electroválvula de 12 voltios de corriente continua NC. El suministro eléctrico fue tomado de una batería de automotor. La presurización hidráulica a la entrada del sistema se realizó por conexión a un tanque situado a un sobre nivel de 2,5 metros respecto de la manguera. Es importante decir que la electroválvula utilizada, para poder accionar correctamente, necesita de un diferencial de presión entre su entrada y su salida de por lo menos el equivalente a una columna de 2 metros de agua. Por lo tanto si se utilizaran mayores extensiones de manguera, habrá que tener en cuenta la mayor caída de presión hidráulica producida en ella, y así tener que compensar con más presión en la entrada.

La medición de este prototipo se realizó un día de radiación variable del mes de julio, la figura 10 muestra el comportamiento de la temperatura del agua dentro de la manguera. El sistema de descarga intermitente entró en régimen (parte del gráfico en forma de dientes de sierra) luego del medio día, cuando la radiación solar se estabilizó. La producción de agua caliente en ese periodo de buena radiación (entre las 13:30 y las 14:30) fue de aproximadamente 30 litros.

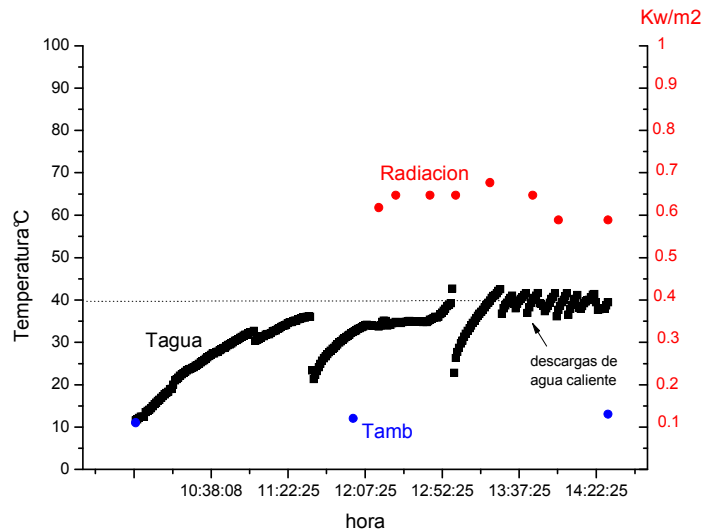


Figura 10. Comportamiento del sistema manguera-PET con descarga intermitente automatizada.

#### EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO COLECTOR MANGUERA CUBIERTO CON PC ALVEOLAR, AUTOMATIZADO.

Para evaluar al sistema de descarga automatizada operando un colector manguera con otro tipo de cubierta, se elaboró un prototipo equivalente al anterior (la misma manguera de 20 metros de longitud) pero esta vez con la aplicación de una cubierta plana de policarbonato alveolar. Para ello, la manguera fue dispuesta en forma de espiral dentro de un bastidor de 1m x 1m. El bastidor fue aislado inferior y lateralmente con poliestireno expandido de 20 kg/m<sup>3</sup> de 2 cm de espesor. Entre la manguera y el poliestireno expandido se colocó, con el fin de aumentar la superficie absorbidora, un film de 200 micrones de nylon negro, ya que la manguera ocupa un área de aproximadamente 0,5 m<sup>2</sup> dentro del bastidor. En la parte superior del bastidor se colocó una cubierta de PC alveolar de 8 mm de espesor. En esta experiencia se utilizó también un termostato 35-45. Este ensayo se realizó a principio de mayo en un día de radiación muy variable. El colector se orientó hacia el norte con una inclinación de aproximadamente 30°, la radiación solar se midió en ese plano. Las mediciones comenzaron a las 10:30 hs y finalizaron a las 16:30 hs. La figura 11 muestra la evolución de temperatura del agua en la manguera medida en esa ocasión. Durante ese periodo el sistema descargó automáticamente el agua caliente producida hacia un tanque de almacenamiento midiéndose una producción total de aproximadamente 50 litros.

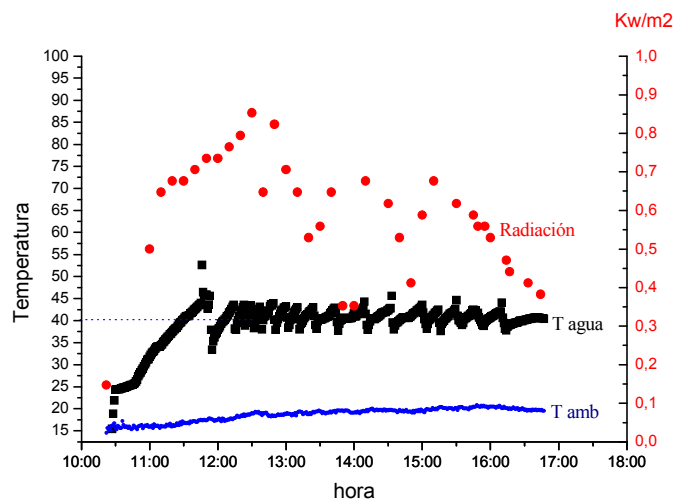


Figura 11. Comportamiento del sistema manguera-PC alveolar con descarga intermitente automatizada.

## COSTOS DE LOS MATERIALES

Los costos de los materiales más importantes utilizados en el colector manguera-PET son:

Manguera negra de PEBD de 3/4" tipo K4 ( 3 \$ /m)  
Termostato bimetálico marca "Bulbos Geny" (40 \$)  
Electroválvula marca "Autovalv" de 3/4", 12V. CC, NC (250 \$)

## CONCLUSIONES

### Sistema de manguera absorbadora :

El sistema de manguera absorbadora de PEBD recubierta por PET presenta interesantes características para el aprovechamiento solar térmico y un muy bajo costo de elaboración, fomenta además el reciclaje de las botellas de PET y la auto construcción. Su geometría tubular favorece la colección de rayos solares en distintas horas del día, cosa que no ocurre con los colectores planos de orientación fija. Este hecho permite captar los primeros rayos matutinos, hecho que sumado a la característica geométrica del absorbador de poseer una muy alta relación Área de colección/Volumen de agua contenido, propicia la obtención temprana de cierta cantidad de agua caliente. Esta cantidad dependerá de la longitud de manguera utilizada, por ejemplo si el sistema es elaborado a partir de 200 metros de manguera de 3/4", en verano este sistema puede entregar 50 litros de agua caliente a 40°C antes de las 10 AM. Entonces el gran potencial del sistema de manguera absorbadora radica en el hecho de que si se utiliza suficiente extensión de manguera, se posibilita el manejo de grandes cantidades de agua caliente a muy bajos costos relativos.

### Sistema automatizado para descarga intermitente:

El sistema propuesto de descarga intermitente de agua calentada por energía solar, elaborado a base de una electroválvula y un termostato, funciona en forma simple, económica y confiable. Estas características son muy atractivas al momento de decidir la construcción de sistemas termosolares automatizados caseros. Esta automatización trabaja perfectamente acoplada a un sistema de manguera absorbadora, ya sea con cubierta de PET o con placa de PC alveolar. Su accionar, además de permitir el almacenamiento, en un tanque térmico, del agua caliente generada en la manguera durante los periodos de insolación, evita el sobrecalentamiento de ésta, sobre todo en épocas de alta radiación. Además, al mantener al sistema trabajando muy por debajo de su temperatura límite, se controlan las perdidas de calor mejorando el calor útil aprovechado.

Debido a los prometedores resultados obtenidos en estos ensayos preliminares, actualmente estamos trabajando en la elaboración de un prototipo de mayor escala utilizando un tramo de manguera de mayor longitud, La idea es poder concebir un sistema automatizado que permita cubrir las necesidades diarias de agua caliente, para todo tipo de requerimiento, a un muy bajo costo relativo.

## AGRADECIMIENTOS:

Se agradece a Ricardo Echazú del INENCO por facilitarnos, muy gentilmente, datos de radiación solar.

## REFERENCIAS.

- Blaga A. Use of Plastics in Solar Energy Applications. Solar Energy, Volume 21, Issue 4, 1978, Pages 331-338.  
Kahlen. G.M. Wallner, R.W. Lang. Aging Behavior of Polymeric Solar Absorber Materials – Part 1: Engineering Plastics. Solar Energy. Volume 84, Issue 9, September 2010, Pages 1567–1576.  
Kahlen, G.M. Wallner, R.W. Lang. Aging Behavior of Polymeric Solar Absorber Materials – Part 2: Commodity Plastics. Solar Energy. Volume 84, Issue 9, September 2010, Pages 1577–1586.

**ABSTRACT:** Are shown first progress in developing a low-cost automated system for heating water by solar energy. Basically consists of an absorber composed of irrigation hose of low density polyethylene (LDPE) and a transparent cover of PET bottles. The water in the hose at a certain temperature is discharged, automatically in pulsed form, to a thermal storage tank. This action is performed by opening a solenoid valve commanded by a bimetallic thermostat inserted in the hose, automation allows the system to operate in the range of maximum efficiency. To know the thermal properties of PET-hose system, constituent materials were characterized, and the system was evaluated in different configurations. Was checked the automatic discharge operation to two prototypes made with 3/4 " LDPE hose , one covered with PET bottles, another covered with polycarbonate honeycomb. In this work aim to obtain a simple, efficient and economical automated system for the production of hot water by solar energy, conducive to recycling and the self build.

**Keywords:** plastic collector, LDPE hose, low-cost automated system