

COLECTOR SOLAR DE ALTA EFICIENCIA CON MATRIZ POROSA RECICLADA

Andrés E. Díaz, Alejandro L. Hernández, Nicolás Di Lalla

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)
Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA)
Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina.
Tel. 54-0387-4255579 – Fax 54-0387-4255489. E-mail: andresmadara86@gmail.com

Recibido: 2-05-2022; Aceptado: 31-05-2022.

RESUMEN.- Se presenta la construcción y evaluación de un prototipo de colector solar calentador de aire de doble paso en contracorriente con material poroso debajo del absorbedor. Posee como elemento absorbedor una placa negra en forma de cuña y una matriz porosa de acero reciclado. La caja soporte del colector está construida de soleras galvanizadas, material que permitió bajar considerablemente el costo y el peso. Se ensayó el prototipo en la ciudad Salta, con flujo forzado a circuito abierto y pendiente de 39° bajo condiciones invernales. Se calefaccionó un módulo habitacional. El salto térmico medio entre las temperaturas de entrada y salida del colector fue de 18 °C, 20 °C y 25 °C, para tres flujos máscos ensayados: 0,027 Kg/s, 0,025 Kg/s y 0,021 Kg/s respectivamente. Aplicando la norma ASHRAE 93-2003 se obtuvieron las curvas de eficiencia térmica instantánea presentando valores máxicos de 70 %, 68 %, y 45 %, para los tres flujos ensayados respectivamente. Los resultados obtenidos indican muy buena performance termo-energética y se recomienda operar el prototipo con un flujo máscico de al menos 0,025 Kg/s.

Palabras claves: Colector solar, Matriz porosa, Calefacción de edificios, Energía solar.

SOLAR COLLECTOR WITH HIGH-EFFICIENCY RECYCLED POROUS MATRIX

ABSTRACT: The development and thermo-energetic evaluation of a new prototype solar collector air heater, with countercurrent flow with porous material under the absorber, is presented. Its absorbing element is a black wedge-shaped plate and a porous matrix of recycled steel. The void factor or porosity of the matrix is $\epsilon=96\%$. The collector support box is made of screeds, a material that considerably lowered its cost and weight. The collector was tested in the city of Salta, with forced open circuit flow and a slope of 39° under winter weather conditions. It was tested by heating a residential prototype. The average thermal jump between the inlet and outlet temperatures of the collector was 18 °C, 20 °C and 25 °C, for three mass flows tested: 0.021 Kg/s, 0.025 Kg/s and 0.027 Kg/s, respectively. Experimentally, the instantaneous thermal efficiency curves were obtained, presenting maximum values of 70%, 68%, and 45%, for the three flows tested, respectively. These values indicate a very good thermo-energetic performance of the prototype presented in this work and the convenience of operating it with a mass flow greater than 0.025 Kg/s.

Keywords: solar collector, porous matrix, buildings heating, solar energy.

1. INTRODUCCIÓN

La energía es considerada como un agente principal en la generación de riqueza y es un factor significativo en el desarrollo económico. En vista de sus crecientes necesidades mundiales y la preocupación por la degradación ambiental, la posibilidad de construir sistemas térmicos utilizando la energía solar, está recibiendo una atención fundamental en los últimos años. La energía solar es limpia y la más inagotable de todas las fuentes de energía conocidas. Es conveniente la utilización de la energía solar, en particular en las zonas en las que no existen redes de energías convencionales como ser electricidad o gas natural o donde sus costos asociados son relativamente altos (Hernández, 2017).

El calentamiento solar del aire ha despertado gran interés en la comunidad solarista, debido a que se trata de una aplicación de bajo costo, simple y requiere mínimo mantenimiento. A lo

largo de los años, diversos prototipos de colectores fueron diseñados, modelados matemáticamente y ensayados experimentalmente. Hoy en día, existen muchas configuraciones de colectores solares calentadores de aire, diferenciadas por la manera en que circula el aire en su interior. Y en la forma y disposición del elemento de captación solar (placas planas, corrugadas, tubos cilíndricos, caños rectangulares, etc.). En la actualidad, la energía renovable suministra aproximadamente el 9 % de la energía final utilizada para calefacción y refrigeración en edificios e industrias, la mayoría proviene de biomasa, con contribuciones menores de energía solar térmica y geotérmica. Aproximadamente las tres cuartas partes del consumo de la energía para calefacción se sustentan en combustibles fósiles (Ministerio de Energía, 2020). El colector solar calentador de aire es un dispositivo diseñado para calentar aire aprovechando la energía solar. Las temperaturas máxicas del aire de salida son de 60 °C

aproximadamente al medio día solar. En la actualidad se han diseñado y ensayado numerosos prototipos de colectores solares calentadores de aire por convección natural, o forzada, entre los que se cuentan los colectores de paso simple (Hernández et al., 2007), de doble flujo paralelo (Salvo et al., 2009), doble paso en contracorriente con y sin matriz porosa para potenciar la transferencia de calor hacia el aire (Sopian et al., 1999; Quiñones et al., 2012), con baffles y aletas adosadas al absorbedor (Pottler et al., 1999), entre otros. Una alternativa conveniente es la de utilizar, como material absorbente, una matriz porosa. Las ventajas de este material, son el incremento del área de transferencia de calor entre el absorbedor y el aire y el aumento del coeficiente de transferencia de calor convectivo debido al incremento de la turbulencia generada en el flujo por las hebras de la matriz (Hernández et al., 2015).

El colector solar calentador de aire, cualesquiera de los mencionados, permite obtener energía útil solamente durante las horas de sol y a determinados niveles de radiación, aproximadamente mayores a 200 W/m^2 . Las condiciones de funcionamiento de un colector calentador de aire pueden variar instantáneamente de acuerdo al estado térmico de la vivienda y a las condiciones climáticas del lugar. Por lo tanto, el encendido y apagado del equipo solar puede llegar a ser una tarea tediosa para el usuario y transformarse en una barrera para su transferencia. Para evitar estas complicaciones y mejorar las condiciones del uso del funcionamiento Quiñones et al. (2019) diseñaron un sistema de control automático que permite encender el equipo bajo ciertas condiciones de funcionamiento y apagarlo cuando sea necesario.

En este trabajo se presenta la construcción y evaluación termo-energética de un prototipo de colector solar calentador de aire cuyo absorbedor es una placa negra en forma de cuña, que en la parte inferior tiene una matriz porosa construida con viruta de acero reciclada. La estructura del colector está fabricada con soleras de chapa galvanizada utilizadas en la construcción con Durlack®. Este colector puede ser empleado en la calefacción de viviendas de interés social, pudiéndose utilizar en cualquier otro tipo de edificios.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

El colector de aire desarrollado en este trabajo corresponde a un colector solar de doble paso y flujo en contracorriente con material poroso abajo del absorbedor, con una cubierta de policarbonato alveolar en la parte superior. El prototipo tiene un área de 2 m^2 . El área de entrada es de $0,04 \text{ m}^2$. En la Figura 1, se muestra un esquema del colector indicando el recorrido del aire en su interior.

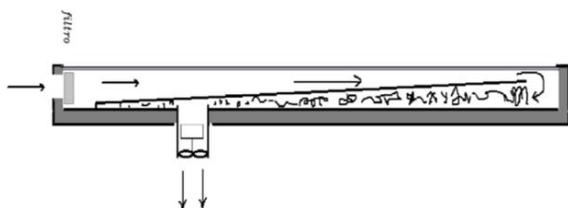


Fig. 1: Esquema del colector calentador de aire de matriz porosa.

Por el tipo de colector elegido, el flujo debe ser forzado, necesariamente. El ingreso del aire se realiza a través de una entrada rectangular. El egreso se realiza mediante un ducto de sección circular, según se aprecia en el esquema.

La radiación solar que atraviesa la cubierta transparente es absorbida por la placa absorbidora en forma de cuña, calentando el aire por convección de acuerdo con la velocidad del flujo que circula dentro del colector, Figura 2.

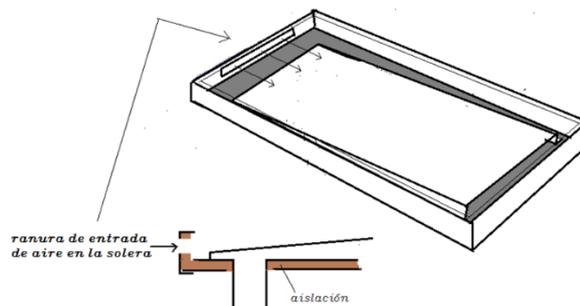


Fig. 2: Esquema de la entrada de aire en el colector.

Luego de ingresar el aire llega a una curva ubicada en el otro extremo del colector que lo redirecciona hacia la matriz porosa. Esta matriz se ubica entre la placa absorbidora y la base del colector. El fluido caloportador es impulsado mediante un ventilador axial que funciona en modo "extractor de aire" que se encuentra ubicado en el ducto de salida del colector. Entonces, el aire ingresa al colector, lo recorre longitudinalmente de ida y vuelta y aumenta su temperatura gracias a la transferencia de calor desde la placa absorbidora en forma de cuña y la matriz porosa que actúa como acumulador de calor.

El colector solar desarrollado y ensayado en este trabajo fue construido en el taller del INENCO-CONICET-UNSA. Para su fabricación se emplearon materiales de fácil adquisición en los comercios locales. Con el fin de aumentar la transferencia de calor desde el absorbedor al aire, el diseño de colector propuesto fuerza al fluido a circular a través de un material poroso caracterizado por una alta relación *área de transferencia / volumen ocupado*. Esta matriz porosa, de acero oscuro, es de baja emitancia infrarroja. Al poseer una emitancia baja (por ser metálica) se incrementa la transferencia de calor hacia el aire circulante al calentarse a temperaturas superiores a las que alcanzaría si su emitancia fuera mayor.

El prototipo cuenta con una cubierta en la parte superior de policarbonato alveolar de 6 mm. En su interior, contiene el absorbedor en forma de cuña y debajo de éste, la matriz porosa de viruta reciclada.

2.1 Caja de soporte.

La caja soporte aloja todos los elementos componentes del colector. Es una caja rectangular de chapa, como se muestra en la figura 3. Está construida con chapa galvanizada calibre 27 (27 chapas/pulgada). Sus dimensiones son: 1,95 m de largo; 0,97 m de ancho y 0,10 m de alto. Los laterales que forman la caja son de soleras de 10 cm de alto en forma de perfil C (unidas con remaches a la placa base). Esto presenta dos ventajas: la primera es su bajo precio y la segunda es la reducción considerable del costo de fabricación del colector. La caja soporte se encuentra aislada térmicamente en su fondo y lateralmente con poliestireno expandido de 2,5 cm de espesor y densidad 35 kg/m^3 .



Fig. 3: Caja soporte del colector.

2.2 Matriz porosa.

Es el elemento de mayor masa térmica del colector. Su función es optimizar la transferencia de calor entre la placa absorbidora y el fluido caloportador. Esta puede ser de distintos materiales. En el trabajo se utilizó, como material poroso, viruta de acero reciclada de distintos talleres de tornería de la ciudad de Salta. El material recolectado se compone de distintos tipos de acero. Por ello, se hizo una cuidadosa selección con el objetivo de dejar el material lo más homogéneo posible. La matriz porosa quedó conformada, en su mayoría, por acero al carbono SAE 1045, de color azul oscuro, buena dureza; con un pequeño porcentaje de acero al Cromo Molibdeno SAE 4140, de color plateado y mayor dureza que el anterior. Ambos tipos de acero provienen de una producción siderúrgica vía hornos Siemens-Martin.

Gracias a la forma que posee la matriz, el área de transferencia de calor en contacto con el aire circulante, se ve incrementada. En la figura 4 se muestra la distribución de la viruta debajo de la placa absorbidora.



Fig. 4: Viruta reciclada distribuida en el colector.

La porosidad de la matriz ensayada fue determinada por López, (2019) y es del 96 %. La incerteza de este resultado se calculó mediante la técnica de propagación de errores resultando: $\varepsilon=(0,96 \pm 0,02)$.

2.3 Placa absorbidora.

A la placa absorbidora, de chapa galvanizada lisa, se le dio forma de cuña, Figura 5. El objetivo de esta forma es acelerar el aire a medida que atraviesa el colector, aumentando

paulatinamente el coeficiente convectivo sobre la matriz porosa. La placa cuña fue pintada en la cara superior de color negro mate. La placa forma un ángulo optimizado con respecto a la cubierta del colector. Su ancho es de 92 cm y su largo es 198 cm.

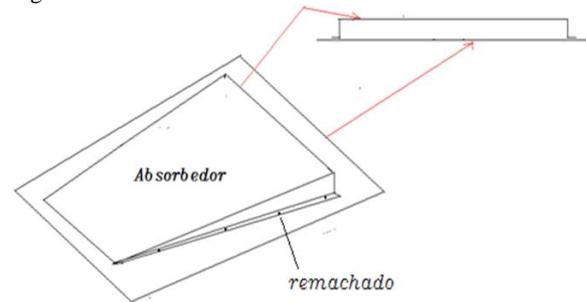


Fig. 5: Esquema de la configuración del absorbedor utilizado.

2.4 Cubierta transparente.

Es de policarbonato alveolar transparente de 6 mm de espesor. Según el fabricante tiene una transmitancia del 82% en el visible, del 70% en el IR cercano, y del 10% en el IR lejano. Además, filtra el 98% de los rayos UV. La cubierta de policarbonato reduce las pérdidas de calor provenientes del elemento absorbente mediante dos mecanismos, minimizando las pérdidas por radiación que emite el absorbedor y reduciendo las pérdidas por convección al evitar que el aire exterior esté en contacto con el absorbedor.

2.5 Ventilador axial.

Para el funcionamiento del colector se requiere forzar la corriente de aire por el colector. Para ello se empleó un ventilador axial de 30 W y 1.800 rpm, con una paleta de 0,17 m de diámetro. Su funcionamiento fue en modo de "succión" ubicado en el ducto de salida. En la Figura 6 se puede apreciar una imagen del ventilador. Se observa cómo quedó instalado en el ducto que se fabricó para su sostén y, a la vez, para la salida del aire caliente del colector. El diámetro del ducto es de 0,18 m.

2.6 Aislante térmico.

Se usó un sistema de dos asistentes térmicos, el primero es de poliestireno expandido de alta densidad, con un espesor de 2,5 cm. El segundo es una espuma de polietileno aluminizada de 10 mm espesor. Este tipo de aislante es el apropiado debido a que los aislantes plásticos derivados de los hidrocarburos se deterioran a temperaturas superiores a 70 °C.



Fig. 6: Ventilador axial instalado en el ducto de salida.

La temperatura de los colectores expuestos al sol puede superar este límite, sobre todo cuando no se encuentran en funcionamiento (temperatura de estancamiento). En especial el medio poroso en condiciones de estancamiento puede alcanzar este límite térmico y producir la destrucción del aislante. En las figuras 7 y 8 se muestran el colector y el sistema de aislación.

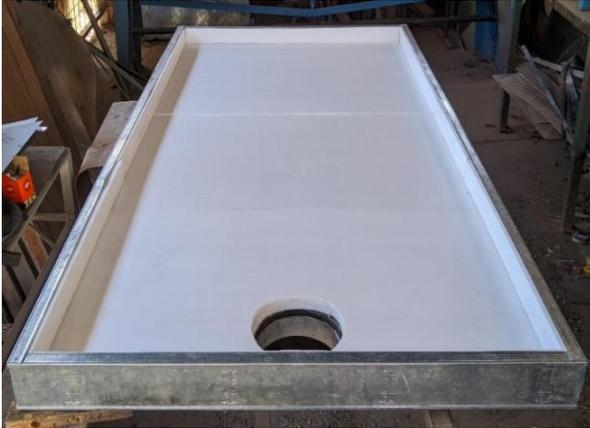


Fig. 7: Aislación térmica de poliestireno expandido de alta densidad.

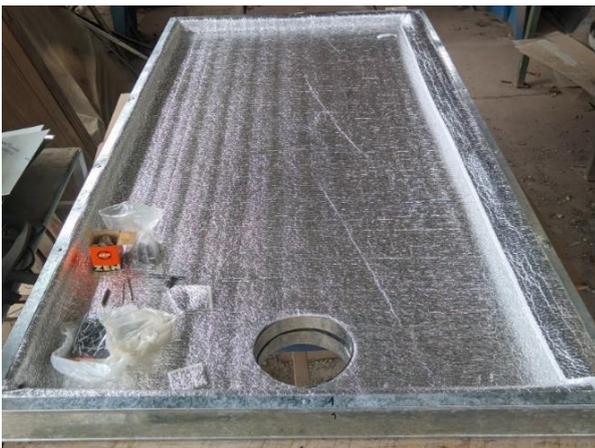


Fig. 8: Aislación térmica de espuma de polietileno aluminizada.

3. METODOLOGÍA

Se aplicaron las pautas de la norma ASHRAE 93-2003 para colectores calentadores de aire. Esta exige la variación de la temperatura de entrada del fluido caloportador. Para ello se construyó un circuito de calentamiento eléctrico del aire de entrada mediante dos mecanismos, el primero con un calientador y luego con dos velas de cuarzo cuyas potencias disipadas fue comandada mediante un potenciómetro. Los niveles de potencia disipada para el calientador fueron: 500, 700 y 900 W, figura 9, mientras que los niveles de potencia disipada por las velas de cuarzo fueron: 600, 900 y 1.200 W. Se ensayaron estos dos métodos diferentes de aumentar la temperatura de entrada del colector para verificar si presentaban un cambio significativo en el flujo de aire.



Fig. 9: Método de aumento de la temperatura de entrada al colector mediante calientador.

En la figura 10 se muestra un esquema de la ubicación de las termocupas en el colector. Se instalaron 12 sensores enumerados del 1 al 12. El número 2 mide la temperatura de entrada del aire (ubicada en el borde de la caja de soporte); los sensores 4, 3 y 6 las temperaturas de la placa absorbedora. El sensor 5 la temperatura en la curva, el sensor 11 la del aire circulante en la matriz porosa y el sensor 12 la temperatura entre placa absorbedora y la cubierta. Para medir las pérdidas térmicas se colocaron los sensores 9 y 10 en la cubierta, mientras que para medir pérdidas en la parte inferior del colector se colocaron los sensores 7 y 8. Finalmente el sensor 1 es la salida del colector.

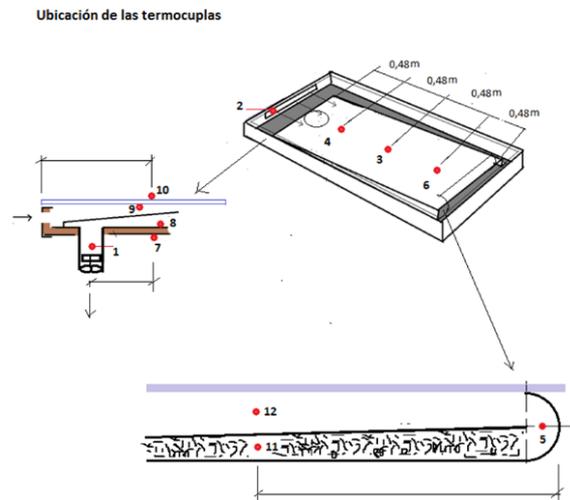


Fig. 10: Ubicación de las termocupas en el colector.

El colector fue instalado en el campo experimental del INENCO ubicado en la Universidad Nacional de Salta a 1.190 msnm, orientado al Norte, con una pendiente de 39°. Fue ensayado durante el invierno de 2022, en un circuito de aire abierto, con el ambiente exterior. En la Tabla 1 se detallan los días ensayados.

Tabla 1: Días de ensayo del colector en el invierno de 2022.

Mes	Días
Junio	1,6,8,13,15,21,30
Julio	1,7,12,15,19,25
Agosto	1,2,18,19

Los datos tomados durante los ensayos fueron:

- Temperatura ambiente.
- Radiación solar sobre el plano del colector y sobre plano horizontal.
- Presión atmosférica.
- Temperatura en la entrada del colector.
- Temperatura en la salida del colector.
- Temperaturas en 10 posiciones dentro del colector.
- Velocidad del aire en ducto de salida.
- Temperatura a la salida del colector que coincide con la de entrada al prototipo habitacional.

En la figura 11 se muestra una vista del colector en operación, calefaccionando el módulo habitacional.



Fig. 11: Colector en operación y toma de datos de temperaturas y variables meteorológicas.

Se realizaron tres períodos de medición, diferenciados por el flujo másico de aire. En la Tabla 2 se muestran los períodos de medición y las velocidades de flujo del aire.

Tabla 2: Período de medición según la velocidad de aire circundante.

Velocidad del flujo [m/s]	Días de duración
1,71	01/06 al 30/06 (excepto 21/06)
2,05	01/07 al 19/07
2,23	01/08 al 02/08 y 18/08 al 19/08

En el período del 13/06 al 30/06 se varió la temperatura del aire de entrada mediante el encendido del caloventor en cuatro diferentes potencias. Del 12/07 al 19/07 y del 01/08 al

02/08 se varió la temperatura del aire de entrada mediante el encendido de las velas de cuarzo en cuatro diferentes potencias.

En la Tabla 3 se muestran las temperaturas de entrada (T_{fi}), para flujo 1,71 m/s (caloventor) y 2,23 m/s (velas de cuarzo) y de salida (T_{fo}) del aire alcanzadas con esas potencias.

Tabla 3: Posiciones del potenciometro durante los ensayos.

Posición	Velas [w]	T_{fi} [°C]	T_{fo} [°C]	caloventor [w]	T_{fi} [°C]	T_{fo} [°C]
	Off	-	-	Off	-	-
1	600	34	62	500	38	60
2	900	42	67	700	41	64
3	1.200	43	69	900	43	65

3.1 Descripción del equipo de monitoreo.

Los datos de temperatura ambiente y radiación solar se registraron con una estación meteorológica marca DAVIS modelo PRO ubicada cerca del prototipo. Como sensores de temperatura dentro del colector se utilizaron termocuplas tipo K de cromel - alumel con una sensibilidad de 3,6 mV/100 °C. El equipo de monitoreo de las termocuplas se completa con un datalogger NOVUS FIELDLOGGER que se comunica con una PC.

Para la medición de la velocidad del aire se utilizó un anemómetro de hilo caliente digital marca TSI. Se midió la velocidad del aire en cinco puntos diferentes del ducto de salida y se promedió la velocidad con una estimación de error del 0,05 m/s. La presión atmosférica se midió con la estación meteorológica DAVIS PRO. Con la Ecuación (1), válida para gas ideal (Lide, 1990), se calcula la densidad del aire para la altitud del lugar:

$$\rho_{(P,T)} = \rho_{ref} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \left(\frac{T_{ref}}{T} \right) \quad (1)$$

Siendo P la presión del lugar, $\rho_{ref}=1,2929 \text{ Kg/m}^3$ a $T_{ref} = 273,13 \text{ K}$ y a $P_{ref}=101.325 \text{ Pa}$. T es la temperatura absoluta promedio del aire entre la entrada y la salida del colector.

El flujo másico de aire se calcula mediante la Ecuación (2):

$$\dot{m} = \rho_{(P,T)} v A_t \quad (2)$$

Donde:

v = velocidad media del flujo de aire [m/s]

A_t = área de sección transversal del ducto de salida [m²]

$\rho_{(P,T)}$ = densidad del aire a la presión P [Pa] y a la temperatura T [K]

3.2 Curvas de eficiencia térmica instantánea

Las curvas de eficiencia instantánea se obtuvieron siguiendo las pautas de la norma ASHRAE 93-2003. La norma exige que la radiación solar y la temperatura ambiente sean lo más estable posible durante el ensayo, por ello se realizaron las medidas alrededor del mediodía solar, entre media hora antes y media hora después del mismo.

La eficiencia instantánea de un colector solar se calcula mediante la Ecuación (3):

$$n_c = \frac{\dot{m}C_p(T_{fo}-T_{fi})}{A_c G_p} \quad (3)$$

Donde:

- \dot{m} =flujo másico [Kg/s]
- C_p =calor específico del aire a la temperatura T [J/kg °C]
- T_{fo} =temperatura del aire de salida del colector [°C]
- T_{fi} =temperatura del aire de entrada al colector [°C]
- A_c =área de apertura solar del colector [m²]
- G_p =irradiancia incidente sobre el colector [W/m²]

Graficando los valores calculados con la Ecuación (3) en función de la variable $(T_{fi}-T_a)/G_p$ se obtienen las curvas de eficiencia instantánea del colector para los tres flujos másicos ensayados. T_a es la temperatura ambiente en °C.

3.3 Energía útil generada por el colector

La energía útil generada por el colector se calcula mediante la Ecuación (4) (Duffie y Beckman, 2006):

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi}) \quad (4)$$

Donde:

- Q_u = energía útil generada por el colector [W]
- \dot{m} = flujo másico de aire [Kg/s]
- C_p = calor específico del aire [J/Kg °C]
- T_{fo} =temperatura de salida del colector [°C]
- T_{fi} = temperatura de entrada del colector [°C]

4. RESULTADOS

En las Figuras 12 y 13 se presentan los valores de irradiancia solar global sobre el plano del colector G_p y los de temperatura ambiente T_{amb} medidos cuando el colector funcionó con un flujo másico de 0,021 Kg/s y con un flujo másico de 0,025 Kg/s respectivamente. Los valores máximos de T_{amb} no superaron los 21 °C en junio y los 24 °C en julio. En la mayoría de los días las amplitudes térmicas alcanzaron los 16,5 °C. Los valores de irradiancia solar no superaron los 850 W/m² para ambos periodos.

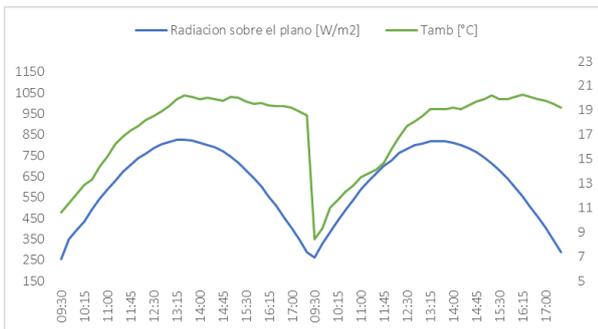


Fig.12: Valores de G_p y de T_{amb} para los días 6 y 8 de junio.

4.1 Temperaturas de entrada y salida del colector

En las Figuras 14 y 15 se grafican las curvas de temperaturas del aire medidas en la entrada, T_{fi} , y en la salida, T_{fo} , del colector para los periodos de junio y julio respectivamente. El encendido de las velas de cuarzo se realizó a partir del 13 de junio y entonces la temperatura de entrada al colector superó los 38 °C.

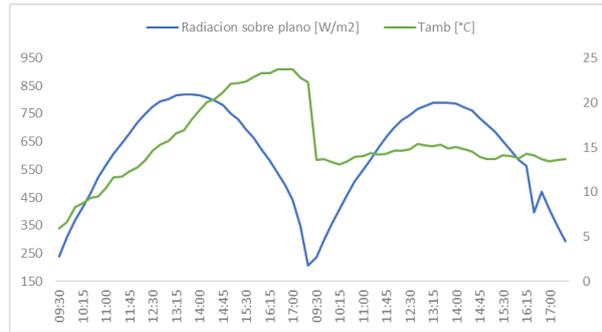


Fig.13: Valores de G_p y de T_{amb} para los días 1 y 7 de julio.

Los valores máximos alcanzados por el aire a la salida del colector fueron de 55,5 °C y 58,1 °C cuando las temperaturas de entradas fueron de 27,7 °C y 28,7 °C, respectivamente. Bajo estas condiciones climáticas, este prototipo produjo un incremento de temperatura entre 20 °C y 25 °C.

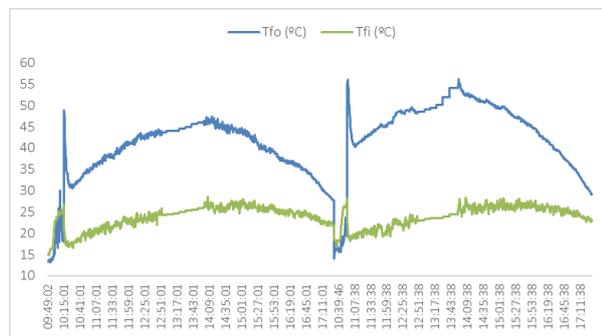


Fig. 14: Temperatura de entrada y temperatura de salida del colector para periodo de junio.

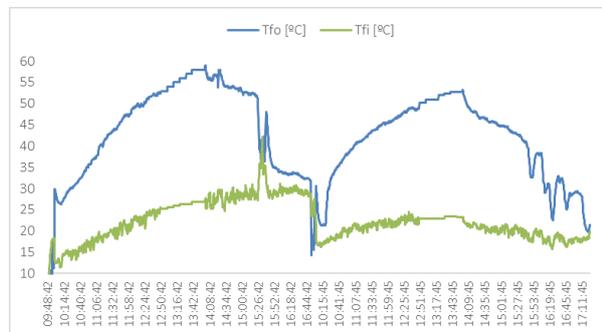


Fig. 15: Temperatura de entrada y temperatura de salida del colector para periodo de julio.

Con un flujo másico de 0,025 Kg/s, el máximo valor de temperatura de salida del aire fue de 55,2 °C con la temperatura de entrada de 26 °C. En este caso, el aumento promedio de la temperatura del aire a través del colector fue de 25 °C. Con un flujo másico de 0,021 Kg/s, el promedio del salto térmico fue de 20 °C. Los máximos en la temperatura de salida medida se mantuvieron por encima de los 47 °C, con temperaturas de entrada de hasta 26 °C. Esta dependencia de la temperatura de salida del aire con el flujo másico es coherente debido a que cuanto mayor es el flujo, menor es la temperatura de salida en cualquier tipo de colector solar.

4.2 Energía útil producida por el colector.

El día 6 de junio, Figura 16, la energía útil alcanzó un máximo de 521 W cuando la irradiancia solar era de 811 W/m², generando durante el día una energía térmica total de 10,6 MJ con un flujo masico de 0,021 kg/s. El día 8 de junio, Figura

16, la energía útil alcanzó un máximo de 663 W cuando la irradiancia solar era de 790 W/m², generando durante el día una energía térmica total de 15,2 MJ con un flujo masico de 0,021 kg/s.

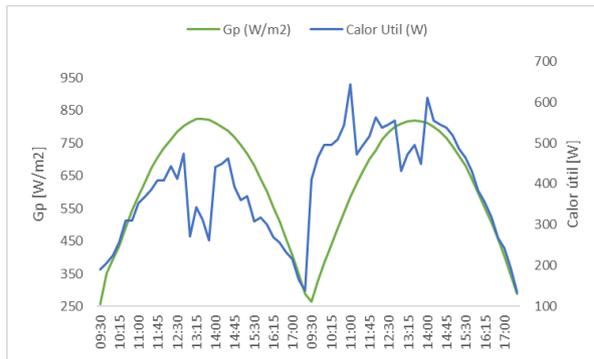


Fig. 16. Energía útil producida por el colector y de irradiancia solar global sobre el plano del colector para el 6 y 8 de junio, con un flujo másico de 0,021 Kg/s.

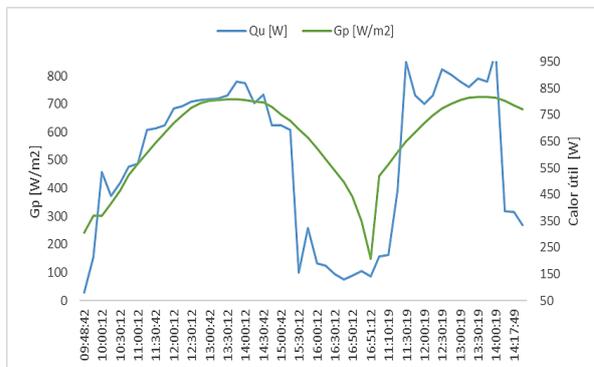


Fig. 17. Energía útil producida por el colector y de irradiancia solar global sobre el plano del colector para el 1 y 7 de julio, con un flujo másico de 0,025 Kg/s.

El día 1 de julio, figura 17, la energía útil alcanzó un máximo de 801 W cuando la irradiancia solar era de 700 W/m², generando durante el día una energía térmica total de 13,6 MJ con un flujo másico de 0,025 kg/s. El día 7 de julio, figura 17, la energía útil alcanzó un máximo de 900 W cuando la irradiancia solar era de 740 W/m², generando durante el día una energía térmica total 18,8 MJ con un flujo másico de 0,025 kg/s.

4.3 Variación de la temperatura del aire a lo largo del colector.

Con el objeto de evaluar la variación de la temperatura del aire a lo largo del colector, se representaron gráficamente los valores medidos por 4 termocuplas en función de la distancia desde la entrada hasta la salida del colector. Observando la Figura 10, a los 0,1 m está la termocupla de entrada T₁, a los 0,96 m está la termocupla entre la placa absorbidora y la cubierta T₁₂, a los 2,88 m la termocupla donde está la matriz porosa T₁₁ y finalmente la termocupla a la salida del colector T₂.

Cada curva presentada corresponde a un día distinto en el período 05/08-19/08 y al mediodía solar a fin de comparar el cambio en la temperatura de salida con el cambio en el movimiento aparente del sol sobre la bóveda celeste. Como sólo se cuenta con medidas a distancias discretas, se generó

una curva logarítmica de tendencia potencial, para representar el posible comportamiento de la temperatura. En la figura 18 se pueden observar las curvas de tendencia obtenidas de las evoluciones de las temperaturas de aire.

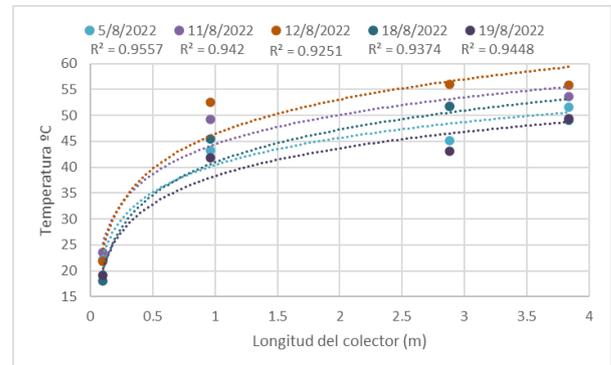


Fig. 18. Evolución de la temperatura del aire dentro del colector. Para un flujo másico de 0,027 Kg/s.

Se puede observar que los coeficientes R² de todas las curvas logarítmicas son mayores a 0,93.

4.4 Curvas de eficiencia térmica instantánea.

Graficando los valores arrojados por la Ecuación (3) en función de la variable $(T_{fi} - T_a)/G_p$ se obtuvo la curva graficada en la Figura 19 para el máximo flujo másico ensayado (0,027 kg/s), la Figura 20 para el flujo másico mediano ensayado (0,025 kg/s) y finalmente la Figura 21 para el menor flujo ensayado (0,021 kg/s).

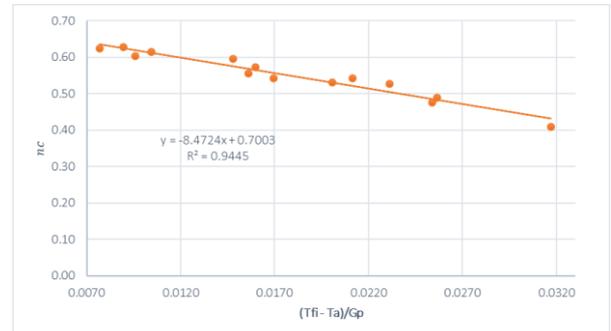


Fig. 19: Curva de eficiencia instantánea del colector cuña con malla porosa para el flujo másico de 0,027 Kg/s.

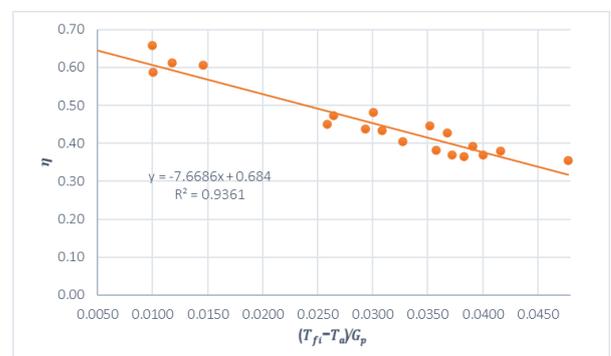


Fig. 20: Curva de eficiencia instantánea del colector cuña con malla porosa para el flujo másico de 0,025 Kg/s.

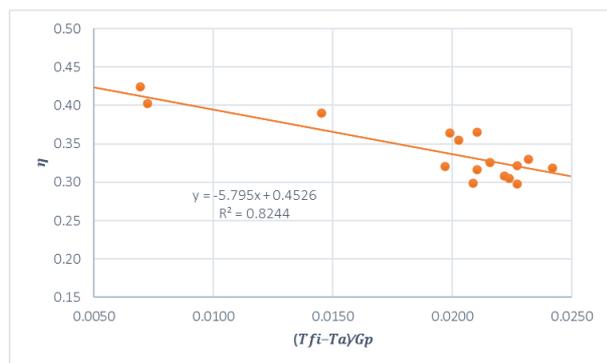


Fig. 21: Curva de eficiencia instantánea del colector caña con malla porosa para el flujo másico de 0,021 Kg/s.

Los valores máximos de eficiencia obtenidos (0,70 y 0,68) son altos, teniendo en cuenta que se trata de un colector calentador de aire y que el flujo másico ensayado es relativamente bajo. Las ecuaciones de las curvas de eficiencia instantánea obtenidas por regresión lineal son las siguientes:

$$n_i = 0,7003 - 8,4724 \left(\frac{T_{fi} - T_a}{G_p} \right) \quad (5)$$

$$n_i = 0,684 - 7,6686 \left(\frac{T_{fi} - T_a}{G_p} \right) \quad (6)$$

$$n_i = 0,4526 - 5,795 \left(\frac{T_{fi} - T_a}{G_p} \right) \quad (7)$$

La ecuación (7) corresponde a la velocidad del aire circulante de 1,71 m/s lo que dio un flujo masico de 0,021 kg/s. Estas curvas deben predecir con buena exactitud el comportamiento termo-energético del colector para condiciones climáticas y de funcionamiento similares a las ensayadas.

4.5 Calefacción del módulo habitacional.

Durante los días 18 y 19 de agosto se realizó la calefacción, con el colector de aire, de un módulo habitacional ubicado en el campus del INENCO. El colector solar calentador de aire fue instalado junto a la fachada norte del local (figura 11) cuya envolvente es de ladrillo cerámico hueco de 0,15 m de espesor revocado hacia el interior; el techo es de chapa galvanizada y el piso de platea de hormigón de 0,10 m de espesor sobre suelo de tipo sedimentario. No posee aislación térmica en paredes, ni piso, ni en techo. Estos materiales son los que comúnmente se utilizan en la construcción de viviendas.

En la figura 22 se muestra la evolución de las temperaturas de entrada al colector T_{fi} , temperatura salida del colector que coincide con la entrada de la habitación T_{fo} , y la temperatura interior T_{int} del local medida en su centro geométrico, a media altura entre piso y techo.

Según se observa en la figura 22, el módulo habitacional se mantuvo dentro de la temperatura de confort entre las 12:00 y las 17:00 hs. Durante los dos días del ensayo la temperatura ambiente estuvo entre 7 °C y 24 °C.

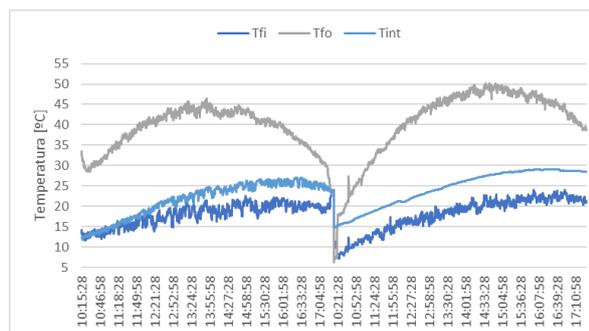


Fig. 22: Evolución de las temperaturas del colector y del prototipo habitacional.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la construcción y evaluación del funcionamiento de un colector solar calentador de aire que posee como elemento absorbedor una placa negra en forma de caña y una matriz porosa de acero reciclado con factor de huecos o porosidad del 96 %, determinada experimentalmente.

El colector operó con tres flujos másicos de aire diferentes (0,021 Kg/s; 0,025 Kg/s; y 0,027 Kg/s). Se encontró que la eficiencia instantánea máxima, para el máximo flujo másico, es del 70 %, valor muy aceptable para un colector calentador de aire. Para los otros flujos másicos, la eficiencia térmica instantánea máxima fue del 68 % y 45 % aproximadamente.

En condiciones normales de funcionamiento el incremento de temperatura a lo largo del colector estuvo entre 20 y 25 °C. La temperatura máxima alcanzada a la salida del colector fue de 58,1 °C para una temperatura de entrada de 28 °C.

En cuanto a la energía útil generada por día, los valores diarios fueron de 20 MJ; 22 MJ y 24 MJ, para el menor y para los 2 mayores flujos de aire ensayados, respectivamente. Estos valores son altos y son consecuencia del gran contacto térmico existente entre el aire circulante y los medios absorbedores constituidos por la placa en forma de caña y la matriz porosa que, por su constitución y características superficiales, constituye una superficie extendida selectiva caliente acumuladora. A la caja soporte se le redujo considerablemente el costo al construirla con soleras de chapa galvanizada. La temperatura del prototipo habitacional calefaccionado con este colector se mantuvo dentro del rango de confort entre las 12:00 y las 17:00 hs. Los valores de eficiencia térmica instantánea encontrados indican una muy buena performance termo-energética del colector desarrollado, siendo conveniente operarlo con un flujo másico superior a 0,025 Kg/s. En cuanto al mecanismo de entrega de energía auxiliar para el aumento de la temperatura de entrada del colector, no hubo una diferencia significativa entre el uso del caloverdor y de las velas de cuarzo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) a través del PIP N° 11220170100972 y al Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA) a través del Proyecto N° 2.335 por aportar el financiamiento necesario para el desarrollo de este colector solar y su evaluación termo-energética. Por último, agradecen al investigador Ricardo

Echazú de la UNSa y a los técnicos del taller INENCO-Física Emanuel Armata y Carlos Fernández por su participación en la construcción del prototipo.

REFERENCIAS

- Duffie, J. A. y Beckman, W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd edition, John Wiley & Sons, USA, 2006.
- Hernández A. L. y Quiñonez J. E. (2017). Experimental validation of an analytical model for performance estimation of natural convection solar air heating collectors. *Renewable Energy*, **117**, 1, 202-216.
- Hernández A. L., Quiñonez J. E. y González S. (2015). Modelización numérica de un colector solar calentador de aire con matriz porosa metálica. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. <http://portalderevistas.unsa.edu.ar/ojs/index.php/averma/article/view/1854>.
- Hernández A., Fernández C., Salvo N. y Suligoy H. (2007). Diseño, construcción y primeros ensayos de un colector solar calentador de aire de tipo loop convectivo para el calentamiento de edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **11**: 2, 03.76 –03.82.
- López y A. Hernández, 2018. Nuevo calentador solar de aire con matriz porosa selectiva. Desarrollo tecnológico y evaluación experimental. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. <http://portalderevistas.unsa.edu.ar/ojs/index.php/averma/article/view/1194>
- Ministerio de Energía y Minería (MinEM), Sitio Web: <https://www.argentina.gob.ar/energiaymineria>. (Último acceso 20 de julio del 2020).
- Pottler, K.; Sippel, C. M.; Beck, A.; Fricke, J. (1999). Optimized finned absorber geometries for solar air heating collectors. *Solar Energy* **67**, 1–3, 35–52.
- Quiñonez, J., Hernández, A., (2019). Automatización de un colector solar calentador de aire. *Acta de la XLII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente* **7**, 06.51-06.57.
- Salvo, N.; Hernández, A.; Molina Castillo, V. (2009). Análisis hidráulico de la circulación de aire en un colector para calefacción. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **13**(1), 8.59 – 8.64.
- Sopian, K.; Supranto; Daud, W.R.W.; Othman, M.Y.; Yatim, B. (1999). Thermal Performance of the Double-Pass Solar Collector with and without Porous Media. *Renewable Energy* **18**, 557 – 564.