

EVALUACIÓN DE CAPTADORES DE ENERGÍA SOLAR DE BAJO COSTE PARA INVERNADEROS

J. M. Abril Hernández – jmabril@us.es

Universidad de Sevilla, Departamento de Física I

J. M. Cámara-Zapata – jm.camara@umh.es

Universidad Miguel Hernández, Departamento de Física y Arquitectura de Computadores

A. Pascual – granged@us.es

Universidad de Sevilla, Departamento de Física I

A. Madueño Luna – amadueo@us.es

Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

V. Ruiz Hernández – varuher@us.es

Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética

2.2 Equipamentos e sistemas de aquecimento de água

Resumen. *El coste de la calefacción en horticultura puede suponer entre el 10 % y el 30% de los gastos de explotación. En el área mediterránea la potencia media a instalar ronda los 240 kcal h⁻¹ por m² de suelo cubierto (para mantener una temperatura interior de 15 °C), necesitándose en las zonas más cálidas del Mediterráneo entre 5 y 6 L de fuel por año para calentar 1 m² de invernadero. Es probable que el elevado precio actual del petróleo suponga un encarecimiento de la calefacción de invernaderos por lo que el estudio de la aplicación de la energía solar para reducir el consumo de combustibles convencionales en la calefacción de invernaderos adquiere una gran relevancia. En otros países también se han estudiado sistemas de calefacción de invernaderos a partir de la energía solar. En este trabajo se evalúa el rendimiento medio de nuevos diseños de captadores de bajo coste realizados con materiales plásticos para la calefacción invernal de invernaderos y se comparan con el determinado en un captador comercial de placa plana en las mismas condiciones de trabajo. Los resultados obtenidos muestran que los nuevos diseños ensayados con materiales plásticos tienen un comportamiento termodinámico muy similar al captador de placa plana y presentan unos costes claramente inferiores. Como conclusión, cabe destacar que los captadores de materiales plásticos se construyen y manejan de forma muy sencilla y eficiente, lo que los convierte en una alternativa interesante para ahorrar energía en el sector agrícola, tanto en invernaderos como en granjas pecuarias u otras explotaciones.*

Palabras clave: *Energía solar térmica, calefacción de invernaderos, captadores solares de materiales plásticos, rendimiento termodinámico*

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de sistemas de calefacción permite el adecuado crecimiento y desarrollo de los cultivos, la programación de las cosechas, un incremento notable sobre la producción y ayuda a evitar el deterioro precoz de las plantas. Los sistemas empleados se pueden clasificar en aire caliente de combustión directa, aire caliente de combustión indirecta, agua caliente a baja temperatura (entre 30 y 50°C) y agua caliente a alta temperatura (hasta 90°C). Los sistemas de calefacción por agua caliente permiten distribuir el calor de forma uniforme y generalmente resultan más eficientes que los sistemas por aire. La temperatura óptima agronómica no tiene por qué coincidir con la óptima económica. Por tanto, es conveniente adoptar los niveles de control térmico que generen los mejores resultados económicos. Dada la gran incertidumbre que mantienen los precios de los pro-

ductos hortícolas y de los combustibles, es importante hacer un seguimiento continuo de la rentabilidad de los sistemas (López *et al.*, 2000).

Como dato orientativo, el coste de la calefacción en horticultura puede suponer entre el 10% y el 30% de los gastos de explotación. En el área mediterránea la potencia media a instalar ronda los 240 kcal h⁻¹ por m² de suelo cubierto (para mantener una temperatura interior de 15°C), necesiándose en las zonas más cálidas del Mediterráneo entre 5 y 6 L de fuel por año para calentar 1 m² de invernadero (Matallana y Montero, 1995). Es probable que el elevado precio actual del petróleo suponga un encarecimiento de la calefacción de invernaderos por lo que el estudio de la aplicación de la energía solar para reducir el consumo de combustibles convencionales en la calefacción de invernaderos adquiere una gran relevancia. En otros países también se han estudiado sistemas de calefacción de invernaderos a partir de la energía solar. Así, en la región de Salta (Argentina), se desarrolló un captador en las horas diurnas que funcionaba como intercambiador durante las nocturnas (Saravia *et al.*, 1992; Iriarte *et al.*, 1993). El captador solar estaba construido con bolsas en forma de tubo de polietileno de larga duración térmica (LDT), transparentes y negras, conectadas entre sí en forma de zig – zag, y por las que circulaba el agua. Otro prototipo empleado con éxito en invernaderos con cultivo hidropónico consiste en un acumulador de calor formado por paquetes de botellas de agua dispuestos en el interior del invernadero, sobre los que se hace circular un flujo de aire recogido en la parte superior del interior del invernadero (Saravia *et al.*, 2000). En Almería se ensayaron tres captadores solares construidos con materiales plásticos que alcanzaron rendimientos térmicos similares a los de los captadores planos metálicos pero con un coste económico mucho menor (Montero, 1985). Más recientemente, se ensayó con un captador – acumulador, en forma de balsa cubierta, situado en el interior de un invernadero sometido a climas fríos y concluyeron que la instalación puede reducir los costes de calefacción durante un largo periodo de tiempo (Al-Hussaini y Suen, 1998). En Marruecos también se han ensayado captadores metálicos de placa plana y se han comparado con un sistema que emplea azul de metileno para realizar una absorción selectiva de la radiación solar (Tadili y Dahman, 1997; Bargach *et al.*, 2004). En Turquía se han empleado captadores de placa plana con agua y material de cambio de fase como fluido de trabajo para calefacción de invernaderos con resultados satisfactorios (Kürklü y Bilgin, 2004). Recientemente, se ha evaluado el rendimiento de captadores acumuladores en forma de balsa, con y sin aislamiento térmico inferior, alojadas directamente en el suelo. Los resultados indican un buen comportamiento del captador-acumulador con aislamiento inferior alcanzando rendimientos del 30%. Sin embargo, se han encontrado dificultades de tipo técnico para utilizar de forma adecuada en el invernadero la energía almacenada en el captador (Abril *et al.*, 2005). En estos y otros trabajos se concluye positivamente sobre la posibilidad de emplear energía solar para calefacción de invernaderos. Uno de los principales problemas de la utilización de la energía solar térmica para reducir el consumo de combustibles derivados del petróleo es el de la acumulación (Sen, 2004).

Este trabajo forma parte de un proyecto que analiza la aplicación de la energía solar térmica como apoyo a la calefacción de invernaderos. En concreto, el objetivo del presente estudio es analizar las prestaciones de dos modelos de captadores de energía solar térmica como acumuladores.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos se han realizado entre marzo y junio de 2005 en la finca situada en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de la Universidad de Sevilla. La instalación consta de un captador selectivo T130-S de Termicol de 2,74 m² de superficie bruta (2,60 m² de superficie útil), con un factor óptico de 0,67 y un coeficiente de pérdidas de 4,2 W m⁻² °C⁻¹. Su inclinación es de 45° y está orientado al sur sin obstáculos que proyecten sombras. El acumulador, de configuración horizontal, es un CV 200 HDP de 200 L de capacidad, con intercambiador de doble envolvente, con 1,7 m² de superficie de intercambio. La instalación se completa con una bomba de circulación Grundfos, un sistema de expansión, un controlador diferencial de temperatura con función antihelada y protección de acumulador por alta temperatura (modelo TR 301 de Steca).

Además se han empleado captadores de materiales plásticos alojados sobre el suelo y con acumulación en el mismo depósito. El primer prototipo consiste en una parrilla de diez líneas de polietileno de 12 mm de diámetro de 3 m de longitud cada una. Para reducir las pérdidas energéticas, se emplea un lecho absorbedor aislante y cubierta en forma de tunelillo (Abril *et al.*, 2005). El segundo prototipo consiste en un captador formado por 3 líneas de polietileno de 12 mm de 10 m de longitud cada una y con disposición en espiral, de modo que en ambos casos el volumen del captador es idéntico y la única diferencia es la disposición. Se ha empleado un tercer prototipo de captador formado por tres tuberías en esta misma disposición en espiral y una longitud total de 150 m (50 m cada línea).

El método de ensayo consiste en determinar el incremento de temperatura del agua en el acumulador a lo largo del día, sin extracción de consumo, y renovando con agua de red a primera hora de la mañana a fin de mantener condiciones iniciales similares. De esta forma es posible evaluar la energía útil recogida al final del día. Por otra parte se utilizan los datos de radiación global diaria (MJ m^{-2}) de la zona (promedio de los valores registrados en las estaciones agroclimáticas de Los Palacios, Las Cabezas y La Rinconada) para conocer la energía disponible.

Para la estimación de estos rendimientos medios diarios se han tomado los máximos de la temperatura alcanzados en el acumulador, se ha asumido una reducción del 10% en la superficie del captador de placa plana debido a una malla de protección empleada y el cálculo de la radiación sobre placa plana inclinada se ha realizado a partir de la radiación global sobre suelo horizontal, con componentes directa y difusa estimadas mediante el índice de claridad del día en cuestión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ensayo de referencia, realizado con el captador comercial, tuvo lugar entre los días 29 y 31 de marzo de 2005, obteniéndose un valor medio del rendimiento de 32,8% (Tab. 1). Se registraron incrementos máximos de temperatura del agua en el depósito entre 23 y 27°C (Fig. 1).

Tabla 1. Valores de radiación, energía incidente, incremento de temperatura del agua del depósito, energía útil y rendimiento medio diario del captador de placa plana

| | Días de ensayo | | |
|--------------------------------------|----------------|----------|----------|
| | 29/03/05 | 30/03/05 | 31/03/05 |
| Radiación | | | |
| Los Palacios (MJ m^{-2}) | 21,8 | 22,3 | 22,2 |
| Las Cabezas (MJ m^{-2}) | 22,6 | 26,3 | 26,5 |
| La Rinconada (MJ m^{-2}) | 21,8 | 22,3 | 22,2 |
| Valor medio (MJ m^{-2}) | 22,1 | 23,6 | 23,6 |
| Valor medio (kWh m^{-2}) | 6,1 | 6,6 | 6,6 |
| Sobre placa (kWh m^{-2}) | 7,0 | 7,5 | 7,5 |
| Superficie captador (m^2) | | 2,5 | |
| Energía incidente (kWh) | 17,4 | 18,6 | 18,4 |
| ΔT (°C) | 23,0 | 25,0 | 27,0 |
| Energía útil (kWh) | 5,6 | 6,0 | 6,3 |
| Rendimiento medio diario (%) | 32,1 | 32,4 | 34,0 |

La instalación de energía solar formada con el prototipo realizado con cubierta de tunelillo y diez líneas de 12 mm de diámetro con una longitud total de 30 m tiene un rendimiento medio diario de 15,2%, muy similar al encontrado en la instalación formada con tres líneas enrolladas en espiral cuyo valor medio es de 19,0% (Tab. 2).

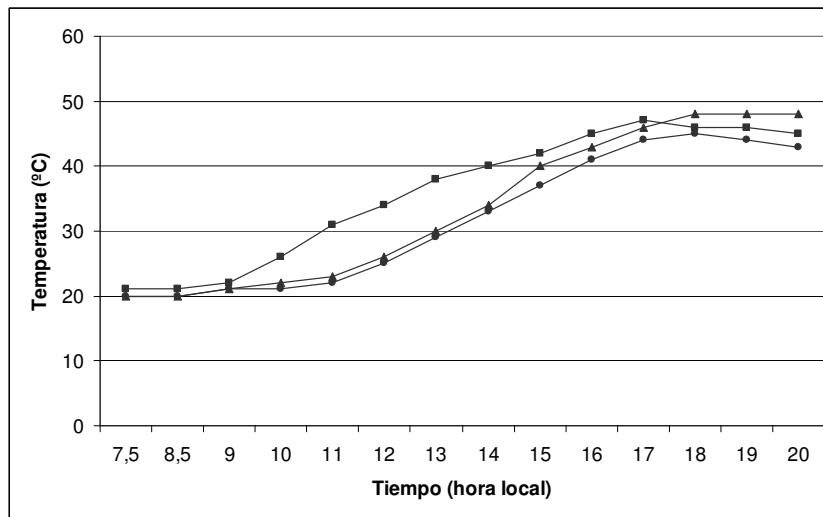


Figura 1- Evolución de la temperatura del agua en el depósito en los días de ensayo, 29 (●), 30 (■) y 31 (▲) de marzo de 2005.

Tabla 2. Valores de radiación, energía incidente, incremento de temperatura del agua del depósito, energía útil y rendimiento medio diario de los captadores de 30 m de tubería de polietileno de 12 mm de diámetro

| | Tipo de captador | | | |
|---------------------------------------|--------------------|---------------------|----------|----------|
| | Disposición lineal | Disposición espiral | | |
| | Fecha | Fechas | | |
| | 10/05/05 | 26/04/05 | 27/04/05 | 28/04/05 |
| Radiación | | | | |
| Los Palacios (MJ m ⁻²) | 26,4 | 27,1 | 27,5 | 27,1 |
| Las Cabezas (MJ m ⁻²) | 30,9 | 23,5 | 32,3 | 32,3 |
| La Rinconada (MJ m ⁻²) | 23,3 | 26,9 | 24,4 | 26,8 |
| Valor medio (MJ m ⁻²) | 26,9 | 28,8 | 28,1 | 28,7 |
| Valor medio (kWh m ⁻²) | 7,5 | 8,0 | 7,8 | 8,0 |
| Superficie captador (m ²) | 3,1 | | | |
| Energía incidente (kWh) | 23,0 | 24,6 | 24,0 | 24,5 |
| ΔT (°C) | 15,0 | 20,0 | 18,0 | 22,0 |
| Energía útil (kWh) | 3,5 | 4,6 | 4,2 | 5,1 |
| Rendimiento medio diario (%) | 15,2 | 18,8 | 17,4 | 20,8 |

El captador de energía solar formado con tres líneas de polietileno de 12 mm en espiral con una longitud total de 150 m tiene un rendimiento medio diario de 27,5% (Tab. 3), determinado en ensayos realizados entre el 25 de mayo y el 2 de junio de 2005. En este prototipo la altura del tunelillo se rebajó sensiblemente con la finalidad de reducir la superficie de la cubierta y con ello las pérdidas energéticas por convección.

El rendimiento de este prototipo de captador se aproxima al de un captador plano comercial y resulta el más adecuado para un campo de captadores dado que aunque tiene una superficie de 3,1 m², se puede realizar un diseño con superficies muy superiores sin ninguna complicación técnica. Al aumentar la superficie del captador es de esperar que se reduzcan las pérdidas energéticas por condiciones de frontera en sus extremos. Las tareas de montaje se simplifican enormemente al trabajar con pocos captadores de gran superficie.

Tabla 3. Valores de radiación, energía incidente, energía útil y rendimiento medio diario del captador formado por tres tuberías de 12 mm de diámetro de 50 m cada una con disposición en espiral

| | Días de ensayo | | | | |
|---------------------------------------|----------------|----------|----------|----------|----------|
| | 25/05/05 | 27/05/05 | 30/05/05 | 01/06/05 | 02/06/05 |
| Radiación | | | | | |
| Los Palacios (MJ m ⁻²) | 27,8 | 28,8 | 17,7 | 26,6 | 26,2 |
| Las Cabezas (MJ m ⁻²) | 33,7 | 33,4 | 19,9 | 31,6 | 31,1 |
| La Rinconada (MJ m ⁻²) | 29,1 | 28,1 | 18,2 | 26,3 | 26,1 |
| Valor medio (MJ m ⁻²) | 30,2 | 30,1 | 18,6 | 28,2 | 27,8 |
| Valor medio (kWh m ⁻²) | 8,4 | 8,4 | 5,2 | 7,8 | 7,7 |
| Superficie captador (m ²) | 3,1 | | | | |
| Energía incidente (kWh) | 25,8 | 25,7 | 15,9 | 24,1 | 23,7 |
| ΔT (°C) | 33,0 | 34,0 | 18,0 | 25,0 | 30,0 |
| Energía útil (kWh) | 7,4 | 7,7 | 4,2 | 5,8 | 6,7 |
| Rendimiento medio diario (%) | 28,8 | 29,8 | 26,3 | 24,1 | 28,3 |

La principal limitación para el tamaño del captador es la pérdida de carga. Para evitar este problema, se pueden considerar variantes del diseño que contemplen similares valores de longitud de tubería de polietileno por unidad de superficie del captador empleando un mayor número de líneas en paralelo o bien utilizar diámetros de tubería ligeramente superiores al utilizado en estos experimentos, con un claro efecto en la reducción de las pérdidas de carga.

La proyección de sombra es muy pequeña en la configuración en espiral de modo que la separación entre captadores estaría condicionada principalmente por la facilidad de las tareas de montaje y mantenimiento.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a dos proyectos de investigación. Por un lado el proyecto CO3 – 027 de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía titulado Desarrollo de captadores solares de bajo coste para la climatización de invernaderos. Por otro, el proyecto GV06/318 de la Consellería d'Empresa, Universitat i Ciencia de la Generalitat Valenciana, con el título Calefacción de invernaderos mediante energía solar térmica.

REFERENCIAS

- Abril J.M., Cámara-Zapata J.M., Pascual A., Franco A., Madueño A. y Ruiz V. 2005. Evaluación de captadores de energía solar térmica para calefacción de invernaderos. Libro de Actas de First International Conference on Energy and Environmental Engineering and Management.
- Al-Hussaini H. y Suen K.O. 1998. Using shallow solar ponds as a heating source for greenhouses in cold climates. *Energy Convers. Mgmt.* Vol. 39, Nº 13, pp. 1369-1376
- Bargach M.N., Tadili R., Dahman A.S. y Boukallouch M. 2004. Comparison of the performance of two solar heating systems used to improve the microclimate of agricultural greenhouses in Morocco. *Renewable Energy* 29, pp. 1073-1083
- Iriarte A., Biagi S. y Saravia L. 1993. Caracterización de intercambiador para calefacción de invernaderos. Acta 16ª. Reunión ASADES La Plata, Tomo I, pp. 461-466
- Kürklü A. y Bilgin S. 2004. Cooling of a polyethylene tunnel type greenhouse by means of a rock bed. *Renewable Energy* 29, pp. 2077-2086
- López J.C., Lorenzo P., Medrano E., Sánchez-Guerrero M.C., Pérez J., Puerto H.M. y Arco. Ruiz M. 2000. Calefacción de invernaderos en el Sudeste español. *Caja Rural de Almería*, pp. 47
- Matallana, A. y Montero J.I. 1995. *Invernaderos*. Mundiprensa

- Montero J.I. 1985. Ensayo de paneles solares de bajo coste para calefacción de invernaderos en Almería. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba
- Saravia L., Echazú R., Cadena C. y Cabanillas C.L. 1992. Calentamiento solar de invernaderos en la Provincia de Salta. Actas 15ª Reunión Nacional de ASADES, Tomo I, pp. 371-375
- Saravia L., Echazú R., Quiroga M. y Robredo P. 2000. Acumulador de agua para climatización de invernaderos armado con botellas de PET. Revista Averma, Vol. 4
- Sen Z. 2004. Solar energy in progress and future research trends. Progress in Energy and Combustion Science 30, pp. 367-416
- Tadili R. y Dahman A.S. 1997. Effects of a solar heating and climatisation system on agricultural greenhouse microclimate. Renewable Energy, Vol. 10, Nº 4, pp. 569-576