

SISTEMA INTEGRADO DE SECADO Y ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE UN SUSTRATO DE PROPAGACIÓN

M. Quiroga, M. Condori, G. Durán, C. Martínez y R. Echazú

Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO, UNSa-CONICET)
Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta, República Argentina
FAX 54 387 4255489 – e-mail: mirtaqui@gmail.com

Recibido 15/08/13, aceptado 28/09/13

RESUMEN: Se presenta el diseño y la puesta en marcha de un sistema integrado de secado y acondicionamiento térmico de un invernadero, como prototipo de aprovechamiento del calor residual de un generador solar de vapor. El equipo consta de un intercambiador de calor inmerso en un sustrato de germinación, un intercambiador agua-aire asociado a una cámara de secado y una fuente de calentamiento solar de agua. El fluido de trabajo circula en serie entre estos equipos, impulsado por una bomba y retorna a un depósito de agua desde el cual se alimenta.

Para el estudio de este sistema, se construyó un prototipo a escala planta piloto alimentado con dos calentadores solares y un tanque provisto de energía auxiliar. A partir de las medidas térmicas realizadas se obtuvieron algunos de los parámetros de diseño para el equipo a escala real. El rango de temperatura fue adecuado para el acondicionamiento térmico del lecho de sustrato de germinación pero resultó insuficiente para el sistema de secado.

Palabras clave: cogeneración, calentamiento solar de invernáculos, sistemas de propagación de plantas, aerocondensador, condensador, intercambiador de calor

INTRODUCCION

Los concentradores Fresnel lineal (CFL) están constituidos por un conjunto de reflectores que concentran la radiación solar en absorbedores elevados. El agua, impulsada por una bomba, ingresa a los absorbedores por un extremo y aumenta gradualmente su temperatura hasta convertirse en vapor que sale por el extremo opuesto. El vapor obtenido, se puede emplear para generar electricidad o directamente para un proceso industrial y el condensado debe enfriarse para reiniciar el ciclo. El INENCO de Salta ha estudiado estos sistemas (Gea, Saravia et al, 2007, 2012) y al presente se concluye la instalación de una planta de 270 m² en San Carlos, Salta. Este trabajo trata sobre estudios tendientes al aprovechamiento del calor residual que se genera en la etapa de condensación del sistema, buscando darle un uso productivo apropiado a la zona donde se construye la planta.

La localidad de San Carlos se encuentra ubicada a 25° 24' S y 65° 57' W a 1600 msnm, en Los Valles Calchaquíes - a 212 Km de la ciudad de Salta y 20 km de la localidad de Cafayate, con radiación sobre el plano horizontal que supera los 1,8 MWh/m² escasos días nublados y muy bajas precipitaciones, lo que representa un valor importante para aplicaciones solares (Grossi et al, 2009)

Su clima puede caracterizarse como muy seco, (aunque no se registran valores climáticos en el lugar), con precipitaciones anuales que no alcanzan los 200 mm, temperaturas invernales por debajo de 0 °C y estivales que superan los 30 °C. El lugar se caracteriza por su déficit hídrico permanente y gran amplitud térmica. La economía del lugar se sustenta desde tiempos más recientes principalmente en el turismo, con afluencia provincial, nacional e internacional de turistas, y tradicionalmente con la producción agrícola, donde puede destacarse, la producción de pimiento para pimentón como principal actividad a la que se suman cultivos de vid, comino, anís, tomate destinados a comercialización, y hortalizas en general, destinadas sobre todo a autoconsumo. La zona es apta para la producción de algunas especies frutales como nogales, olivo y manzano, aunque no se realizan a escala comercial.

Un gran potencial de la zona radica en que su clima semidesértico y seco dificulta la proliferación de enfermedades fúngicas transmisibles por semilla, por lo que es apta para producción de las mismas.

Desde décadas atrás la zona viene sufriendo, una de deforestación creciente, para el empleo de la madera como combustible. Esta deforestación sumada a las condiciones climáticas y a la naturaleza arenosa y lábil de los suelos ha generado degradación de suelos, y erosión eólica en un proceso de desertificación agudizado, con el aumento de la sequía de éstos dos últimos periodos (2011-2012)

Una manera de contribuir a retardar o revertir parcialmente esta situación es aportando una fuente energética adicional que permita reducir la presión por la “leña” proveniente de la vegetación, y a su vez, reforestar, con especies arbustivas y arbóreas que consoliden el suelo, reduciendo así la erosión, y creando microambientes con evapotranspiración atenuada y menor consumo de agua.

El presente trabajo cuyo diseño preliminar fue presentado en una comunicación anterior (Condori, Quiroga, et al 2011), parte de la construcción en San Carlos de un sistema de producción de energía eléctrica a partir de energía solar con generación de vapor, y propone el aprovechamiento del calor en el fluido, por medio de intercambiadores que transfieran calor para:

- Una cámara de secado solar, aplicable a una gran diversidad de productos agrícolas
- Calentar un sistema de propagación de plantas bajo invernadero destinado a la producción de arbustos y árboles para facilitar la reforestación.
- Calentar un invernadero destinado a la continuidad del crecimiento luego de logrado el enraizamiento de las plantas provenientes del sistema de propagación.

Como primera aproximación para el estudio de los sistemas, se ha efectuado la construcción una planta piloto en INENCO Salta, constituida por un invernadero, un sistema de calentamiento de agua solar – eléctrico, como fuente de calor, una cámara de secado y un invernadero con dos compartimentos, uno destinado a la propagación de plantas y otro a la cría de las plantas propagadas.

En esta etapa se presentan los primeros resultados térmicos del funcionamiento de la cámara de secado, y el sistema de mesas de propagación del invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

La figura 1 ilustra las partes constituyentes de la planta piloto y en la figura 2 se muestra una foto del equipo ensayado:

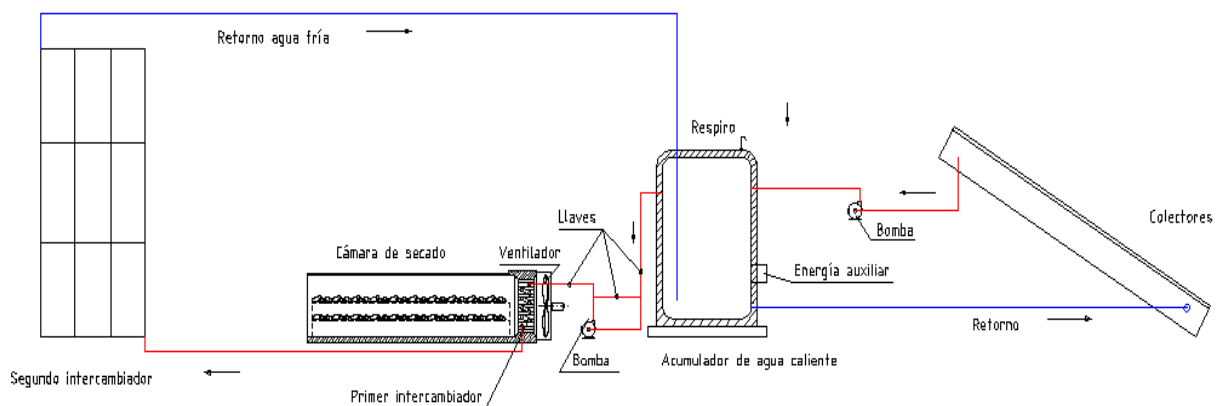


Figura 1: Esquema del equipo en estudio.



Fig. 2 – Fotografía del banco de colectores solares, tanque de almacenamiento, y cámara de secado.

El equipo ensayado consta de:

1 – Un sistema de calentamiento solar de agua con absorbedor formado por un arreglo de tubos PVC pintados de negro mate. El sistema de calentamiento (*Fig 2*), cuyo diseño construcción fueron informados en Martínez, et al 2012, funciona como fuente de calor en el ensayo de la planta piloto, sustituyendo al sistema de Fresnel lineal que será utilizado en la planta real. Este equipo de calentamiento de agua está conformado por dos colectores solares planos, con un área total de colección de 4 m², conectados a un depósito de agua de 220 L., aislado térmicamente. Para lograr la temperatura adecuada se cuenta además con el aporte auxiliar de energía provisto por una resistencia eléctrica de 1,5 kW controlada con un termostato bimetalico.

2 – Una electrobomba centrífuga monofásica de 370 W que impulsa el agua desde el tanque de depósito al intercambiador aire-agua ubicado en la cámara de secado. Un juego de llaves esféricas en by-pass permite regular el caudal.

3 – Una cámara de secado, en forma de túnel, de dimensiones 1,50 m de largo, 0,43 m de ancho y 0,39 m de alto (*Fig 2, 3*). Las paredes y fondo de la cámara se construyeron con poliestireno expandido de densidad 12 Kg/m³. Se utilizó como cubierta horizontal una placa de policarbonato alveolar transparente de 4 mm de espesor, que permite la incidencia directa de radiación solar sobre el producto, permitiendo con ello un aporte extra de energía al producto a secar. El flujo de aire en el secador es impulsado por un ventilador axial de 0,40 m de diámetro, girando a 420 r.p.m, con disposición de presión (Multi-Wing, 2011), acoplado a un motor monofásico de 750 W. La velocidad del ventilador puede variarse entre 14 y 22,5 Hz mediante un controlador a varistor.

4 - Para calentar el flujo de aire en el secador se instaló un intercambiador agua-aire, de un tubo y aletas, similar a los empleados en las heladeras comerciales (*Fig. 3, 4*). El aire fresco del ambiente es tomado por el ventilador, que lo impulsa sobre el intercambiador, aumentando su temperatura y recorriendo la cámara de secado, saliendo al ambiente por el otro extremo. El agua que ingresa desde la bomba, recorre el tubo del intercambiador, disminuyendo su temperatura por el intercambio de energía con el aire circulante y es conducida hacia el invernadero por una tubería de polietileno aislada térmicamente.



Figuras 3 y 4 – Intercambiador de calor agua – aire, y detalle de construcción de la cámara de secador.

5 – En el invernadero se construyó un sistema de “cama caliente” (Condorí, Quiroga, et al 2011) conformado por una mesa de 1 m de ancho, 5 m de largo y de 20 cm de profundidad, con fondo de malla metálica, cubierto con plástico y una aislación de poliestireno expandido de 12 Kg/m³ y 30 mm de espesor y paredes laterales de madera con aislación térmica de poliestireno expandido de 8 Kg/m³ y 2 mm de espesor, sobre la aislación se colocó una capa de polietileno negro de 100 µm.

La mesa de cultivo se dividió en dos partes, de las cuales la mitad se incorporó directamente el sustrato de cultivo sin calefaccionar y la otra mitad lleva en la base el intercambiador de calor, por donde circula el agua caliente entregando calor directamente al sustrato y base de los esquejes o a las semillas según el uso, de manera tal que el sistema permite evaluar comparativamente el comportamiento térmico y el rendimiento en plantas producidas con y sin calefacción.

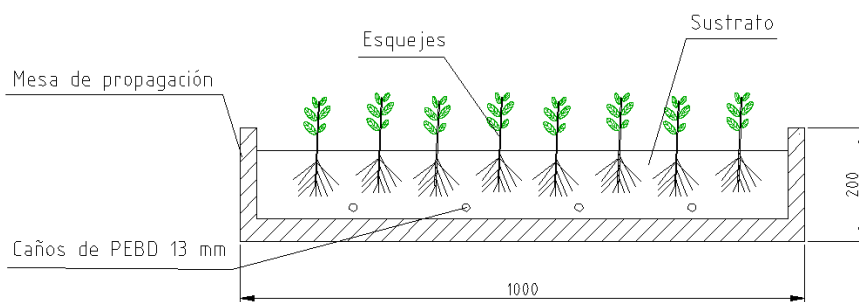


Figura 5 – Esquema del sistema del sistema de propagación.

El intercambiador agua – sustrato está construido con tubos de polietileno de baja densidad de 13 mm en un entramado de 4 líneas espaciadas cada 25 cm a lo ancho y 4 líneas a lo largo una en cada extremo y dos interiores, de modo tal que forma una cuadrícula de 25 x 60 cm (*Fig 1*), proveniente de la cámara de secado.



Figuras 6 y 7 – Detalle del intercambiador de calor en la mesa de propagación. Sustrato de turba y perlita.

Al intercambiador de la mesa de propagación (Fig. 6) ingresa agua caliente proveniente de la primera etapa de enfriamiento (salida de la cámara de secado), o directamente del sistema de calentamiento, según los requerimientos y sale agua a menor temperatura retornando al depósito por una cañería de polietileno. En una etapa posterior se espera conectar la salida de este intercambiador a un tercer intercambiador destinado a calentar el piso del invernadero para acelerar el desarrollo posterior de las plantas provenientes del sistema de propagación.

Son varios los sustratos posibles a aplicar en un sistema de este tipo. Entre las condiciones necesarias para lograr el buen enraizamiento de esquejes, el sustrato debe poseer baja densidad aparente, alta porosidad para permitir una adecuada aireación de la base de las raíces, gran capacidad de retención de agua, PH neutro a levemente ácido y preferentemente bajo costo, y abundancia. En vista de estos factores, se decidió rellenar el sector del sistema calefaccionado con una capa de 15 cm de un sustrato conformado con turba y perlita (Fig. 7). Esta mezcla, empleada en la zona para realizar almácigos de tabaco en hidroponía, cumple con la mayoría de las condiciones citadas, excepto por el alto costo y relativa escasez.

La turba es capaz de retener 10 veces su peso en agua, favoreciendo su comportamiento como conductor y acumulador de calor. La perlita por otro lado, con una capacidad de retención de agua de 4 veces su peso seco, aporta mayor consistencia al sustrato para el soporte de las plantas. Una ventaja del sustrato empleado es que proporciona las condiciones adecuadas para el desarrollo de raíces, particularmente para la propagación vegetativa y no requiere desinfección por ser inerte.

6 – Instrumentación: Sobre el prototipo fueron medidas las siguientes variables:

- Temperatura de flujo de agua en la entrada y salida del banco de colectores, a la entrada y salida del intercambiador agua – suelo (invernadero), en el tanque de almacenamiento, y a la entrada y salida del intercambiador agua – aire (secador). Además, se midió la temperatura del flujo de aire a la entrada y salida del secador, y la temperatura ambiente dentro del invernadero, a nivel del suelo, y a nivel del lecho de propagación.
- Se midieron las variables ambientales usuales: temperatura ambiente, humedad relativa ambiente, velocidad de viento, y radiación sola sobre plano horizontal.
- Se sensaron el caudal de agua circulante, y la velocidad del flujo de aire que circula por la cámara de secado.
- Se siguió la curva de la pérdida de peso de una muestra de producto colocada en el interior de la cámara de secado.

Las medidas de temperaturas se realizaron mediante el uso de termocuplas de tipo E (cromel - constantán) y tipo K (cromel - alumel), conectadas por medio de un multiplexor AM25T, a un data logger Campbell CR23X, programado con una frecuencia de adquisición de cinco minutos. El caudal de agua en el retorno se midió mediante el llenado de un vaso de volumen calibrado y el tiempo requerido con un cronómetro. La velocidad del flujo de aire en la cámara fue medida con un anemómetro de hilo caliente TSI 8345, el consumo eléctrico del ventilador y de la bomba, con un vatímetro DW6060 y la velocidad de rotación del ventilador, con un tacómetro digital DT2234C. Las variables ambientales se midieron mediante una estación meteorológica Davis Vantage Pro II.



Figuras 8 y 9 – Instrumental: Datalogger y multiplexor utilizados. Se aprecia conexiones de termocuplas.

RESULTADOS

Los ensayos preliminares del prototipo se realizaron desde el 9 al 15 de Agosto de 2013, en el predio experimental del

INENCO, Salta. La tabla 1 indica la referencia de las medidas realizadas, ubicación y nombre.

Nombre	Descripción	Ubicación
TempAmb	Temperatura ambiente	Estación meteorológica. Terraza INENCO
HR Amb	Humedad relativa ambiente	Estación meteorológica. Terraza INENCO
I	Radiación solar global horizontal	Estación meteorológica. Terraza INENCO
VelViento	Velocidad de viento a 6 m de altura sobre suelo	Estación meteorológica. Terraza INENCO
Tamb.int1	Temperatura ambiente dentro del invernadero	10 cm del suelo del invernadero
Tamb.int2	Temperatura ambiente dentro del invernadero	Nivel del sustrato (1m suelo del invernadero)
T1.interc1	Temperatura flujo en intercambiador agua - sustrato	Entrada del intercambiador
T2.interc1	Temperatura flujo en intercambiador agua - sustrato	Salida del intercambiador
T1.sustrato	Temperatura de sustrato	Misma profundidad y ubicación que T1.interc1
T2.sustrato	Temperatura de sustrato	Misma profundidad y ubicación que T2.interc1
T1.interc2	Temperatura de flujo en intercambiador agua - aire	Entrada del intercambiador
T2.interc2	Temperatura de flujo en intercambiador agua - aire	Salida del intercambiador
T1.colector	Temperatura de flujo de agua en colector	Entrada de banco de dos colectores
T2.colector	Temperatura de flujo de agua en colector	Salida de banco de dos colectores
T1.secador	Temperatura de flujo de aire en secador	Entrada de secador
T2.secador	Temperatura de flujo de aire en secador	Salida de secador

Tabla 1: Nomenclatura y descripción de las variables medidas

En la Figura 10 se muestran los resultados de las medidas de temperatura y humedad relativa ambiente para esos días. En la figura 11, la velocidad de viento y radiación solar global sobre plano horizontal. De la Figura 10 se observa gran variación térmica en el periodo ensayado, registrándose temperaturas mínimas próximas a $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en las primeras horas de la mañana, y máximas de hasta $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ en horas cercanas al mediodía solar. Para el día 12, en particular la amplitud térmica día – noche fue de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los valores de humedad relativa registrados muestran mínimos inferiores a 15% y valores máximos cercanos a 80%. Los resultados de radiación solar, Figura 11, muestran la alternancia de días nublados y claros, registrándose para estos últimos máximos del orden de 700 W/m^2 , en horas del mediodía solar (13:15 para el mes de Agosto en Salta); en la figura también se muestran los valores de velocidad de viento, observándose ráfagas intermitentes, con máximas de 6 m/s. Se aclara que estas medidas fueron tomadas en la terraza del edificio, 6 metros de altura, en ausencia de obstáculos.

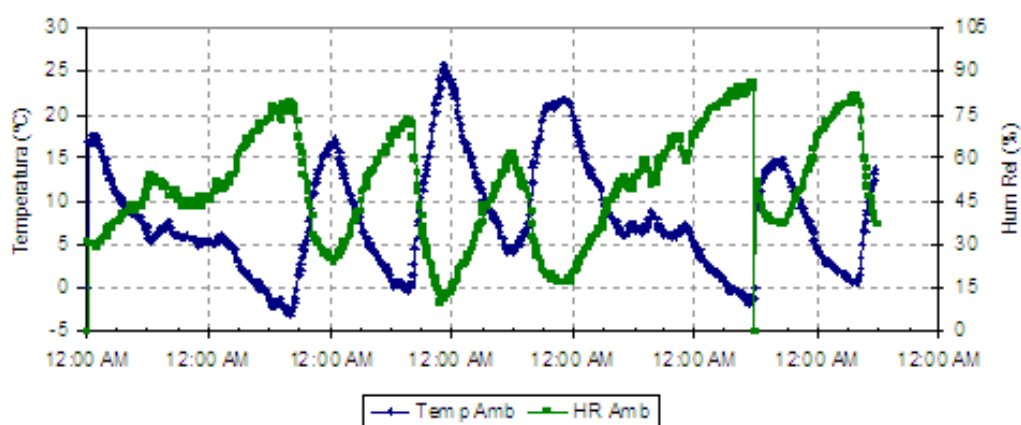


Figura 10: Variables ambientales: temperatura y humedad relativa ambiente.

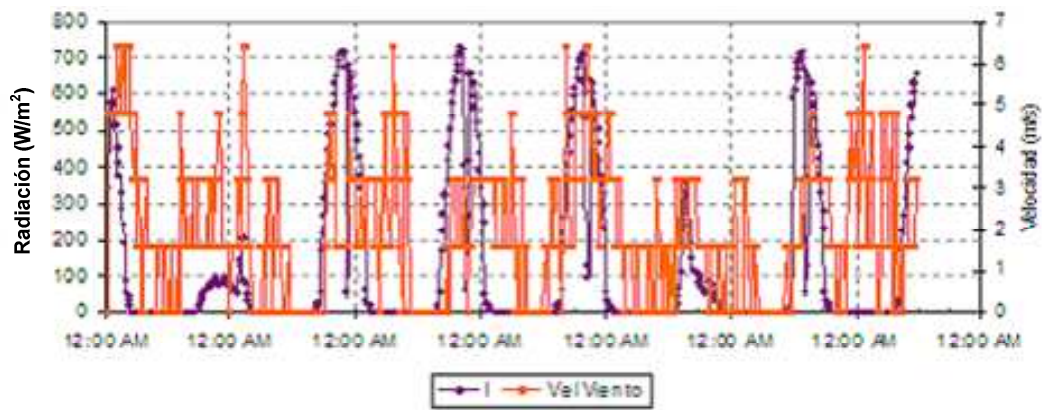


Figura 11: Variables ambientales. Radiación solar (I) y velocidad de viento (vel viento).

La figura 12 muestra las temperaturas del aire en el invernadero, medida a nivel de suelo (Tamb.int1), a nivel del lecho (Tamb.int2); y la temperatura de flujo de agua a la entrada (T1.interc1) y salida (T2.interc1) del intercambiador agua – sustrato. En la figura 13 se muestran las temperaturas del sustrato, en dos puntos del lecho, a la misma profundidad y cercanos a los puntos de entrada y salida del intercambiador (T1.sustrato y T2.sustrato, respectivamente). Las curvas presentan el aspecto de “dientes de sierra” en concordancia con los ciclos de prendido y apagado del respaldo eléctrico.

El primer día no es tenido en cuenta porque representa la puesta en marcha del sistema y presenta efectos transitorios de la carga del invernadero. De acuerdo a los valores mostrados en la Figura 12, existe un descenso de temperatura de hasta 5 °C, entre la entrada y salida del intercambiador, observado en horas de la tarde del tercer día, y durante la mayor parte del período ensayado la diferencia es menor. Siendo la diferencia despreciable en horas de la noche, para los cuatro primeros días. Debido a la escasa radiación solar y baja temperatura ambiente durante el quinto día del ensayo se decidió incrementar la temperatura del flujo de agua, aumentando la temperatura de corte a 50 C del sistema eléctrico de resguardo. Se registran en este día diferencias de hasta 10 °C entre la temperatura de entrada y salida del flujo de agua del intercambiadora. El calor asociado a estas diferencias de temperaturas se entregó al lecho con el sustrato elevando su temperatura. Esto es consecuencia de que en ese día la radiación solar fue muy baja, el sexto día de radiación de la figura 11; en consecuencia las temperaturas en el invernadero descendieron y la demanda de calefacción del sustrato aumentó.

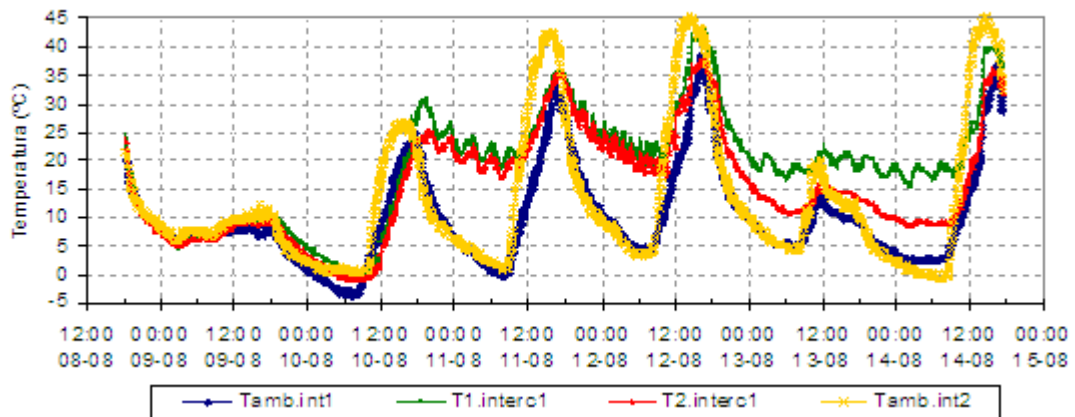


Figura 12. Invernadero: Temperatura ambiente interna, y temperatura de flujo de agua por intercambiador.

En la Figura 13 se muestran las temperaturas del sustrato en puntos próximos a la entrada y salida del intercambiador de calor, y se las compara con las temperaturas del aire en el interior del invernadero. Para la noche del 11 de agosto, se observa que mientras la temperatura en el invernadero estuvo próxima al 0 °C la temperatura del sustrato a la entrada se mantuvo cercana a los 25 °C y próxima a los 15 °C en la zona de salida. También se observa el comportamiento propio de los sistemas de acumulación de calor donde la amplitud térmica se amortigua respecto a la del aire. El efecto “diente de sierra” disminuye en la zona del sustrato a la salida con respecto a la entrada, efecto de la amortiguación de la onda térmica en el lecho.

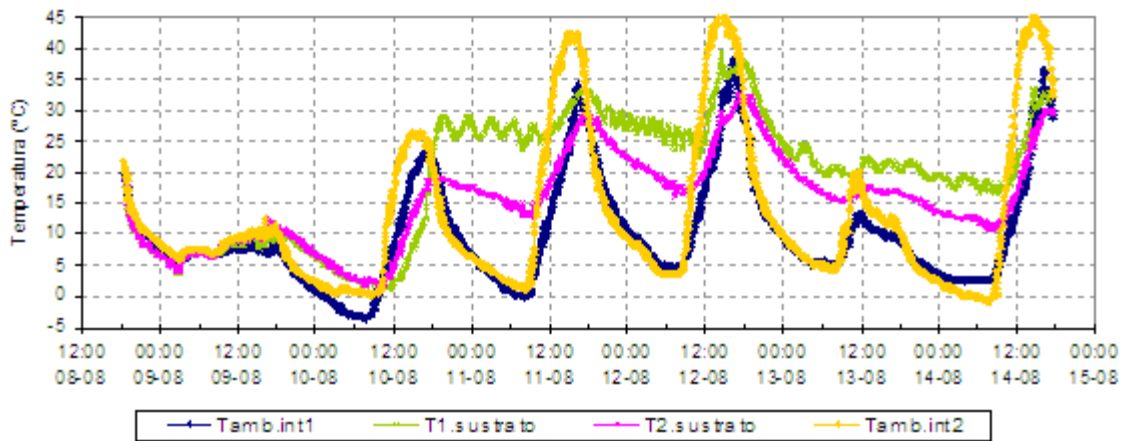


Figura 13. Invernadero: Temperatura ambiente interna, y temperatura de sustrato.

En la Figura 14 se muestra el comportamiento de los dos intercambiadores en serie, el intercambiador agua-aire en el secadero (interc 2) y el descrito anteriormente (interc 1) cubierto por sustrato que pierde al ambiente del invernadero. Se observa para el intercambiador en el secadero, que para los últimos días, la temperatura de entrada se encuentra aproximadamente a 35 °C mientras que la temperatura de salida está próxima a los 15 °C; El intercambiador en el sustrato toma el agua a esta temperatura y la devuelve al depósito aproximadamente a 6 °C. Es decir que en el primer intercambiador el sato de temperatura es de 20 °C y en el segundo de 10 °C aproximadamente, con las áreas y caudales descritos anteriormente.

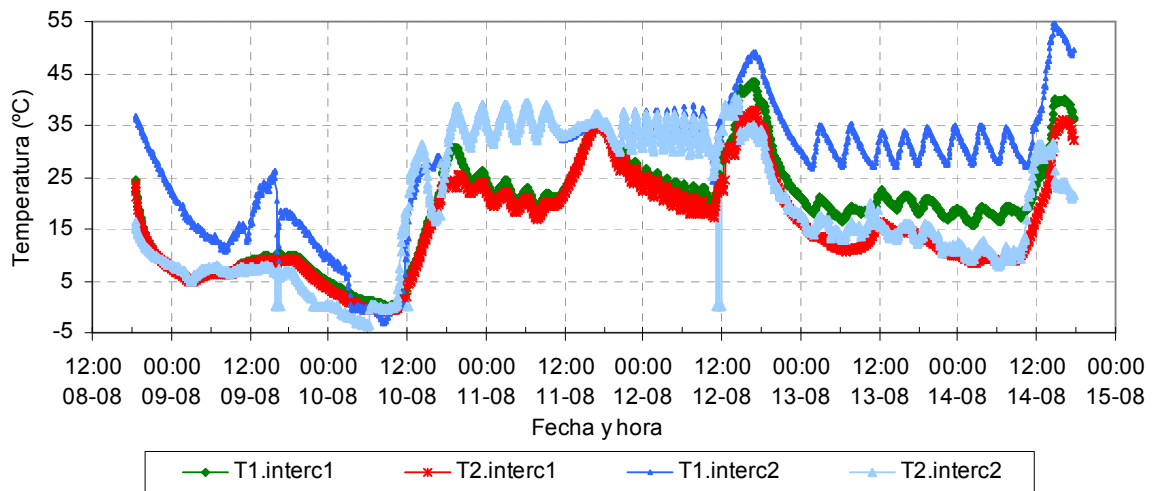


Figura 14. Temperaturas de flujo de agua en la entrada y salida de los dos intercambiadores.

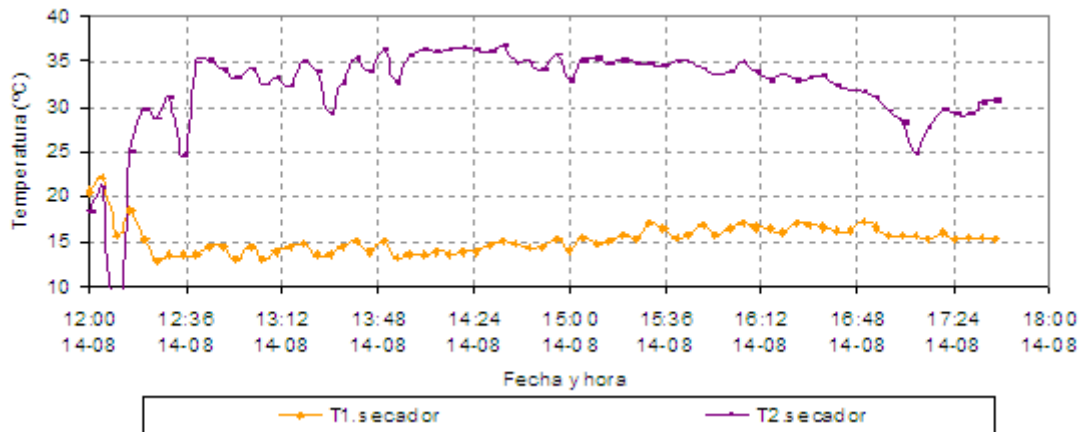


Figura 15. Temperaturas de flujo de aire en la entrada y salida del secador.

En la Figura 15 se muestran las temperaturas del aire a la entrada y a la salida del secador. Durante este ensayo se colocó perejil ocupando con una bandeja toda el fondo de la cámara. Se observa un salto térmico de 20 °C entre la temperatura de entrada, mayormente (35 °C) y la de salida (15 °C). La temperatura de entrada resultó muy baja por lo que no fue adecuada para el ensayo del secado de perejil, que necesita temperaturas más elevadas, entre 50 °C y 70 °C. Además la temperatura de salida está afectada por la temperatura ambiente, por lo que el salto no es representativo del real flujo de calor transferido.

CONCLUSIONES

Se ensayó un sistema en serie integrado por un secador y un calentador de sustrato de germinación en camas de crecimiento. Se trata de un prototipo para estudiar la descarga de calor de la etapa de enfriamiento o condensación de un circuito cerrado de una posible caldera solar. Ante la falta de la caldera se ensayó con un prototipo de menor escala utilizando calentadores solares de agua con un sistema auxiliar de calentamiento.

Se midió el comportamiento térmico de las distintas partes que componen el sistema siendo esta una etapa de ensayos preliminares. De los resultados de las mediciones la conclusión más importante es que el rango de temperaturas de trabajo del sistema de intercambiadores se ubicó entre los 40 °C y los 5 °C, con lo cual se cumple el propósito de descargar la mayor parte del calor generado en el conjunto de intercambiadores. Para el primer intercambiador, las caídas de temperatura fueron de aproximadamente 25 °C, mientras que el resto, aproximadamente 15 °C, cayó en el sustrato. Las temperaturas obtenidas por este último fueron adecuadas para calentar el sustrato de las camas en el invernadero manteniéndolas por encima de los 15 °C, aún cuando el aire exterior se encontraba en 0 °C. Sin embargo para el secador, la descarga en el aire de entrada no permitió ubicar el sistema dentro del rango de trabajo de 50 °C a 70 °C. Este es un resultado previsible, debido a que en estos ensayos preliminares se trabajó con temperatura de acumulación baja, ya que por el momento no se cuenta con la caldera.

Para ensayos futuros se prevé aumentar la calefacción auxiliar y bajar el caudal de agua de los colectores a fin de trabajar en el rango de temperaturas adecuado para el secador. Estos ensayos permitirán dimensionar un sistema de mayor escala para ser incorporada en la etapa de condensación de una caldera solar. También, se espera realizar una simulación computacional del sistema y los ensayos definitivos a fin de validar la misma, variando los parámetros más importantes de funcionamiento.

REFERENCIAS

- Condorí M., Quiroga M., Echazú R. (2011). Sistemas Integrados de Aprovechamiento del Calor Residual del Circuito de Enfriamiento de una Caldera Solar, para Usos Productivos. Comunicación al XXXIX Congreso de ASADES, Río Hondo, 2011, p.p. 02.17 – 02.21
- Gea M., Saravia L., Fernández C., Caso R. y Echazú R. (2007). Concentrador Lineal Fresnel para la Generación Directa de Vapor de Agua. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol 11. p.p. 03.83 – 03.89
- Gea M., Saravia L., Placco C., Altamirano M., Hongn M., Fernández C., Caso R., Tilca, F. Bárcena H., Suligoy H. (2012) Diseño y Estado de Avance de la Construcción de un Concentrador Fresnel Lineal de 270 m2. Averma Vol 16 p.p. 03.79 - 03.86
- Grossi Gallegos H., Aristegui R., Righini H R.. (2009) Análisis de la Radiación Solar Global en San Carlos, Salta Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 13,. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184
- Multi-Wing, (2011) www.multi-wing.org

ABSTRACT

The design and implementation of an integrated system for drying and thermal conditioning of a greenhouse is presented, as a prototype for the use of waste heat of a solar steam generator. The equipment consists of a heat exchanger immersed in a germination substrate, a water-air exchanger associated with a drying chamber and a source of solar water heating. The working fluid circulates in series between these devices, driven by a pump and is returned to a water reservoir from which it is fed. To study this system, a pilot plant scale prototype was constructed and was powered with two solar water heaters and a tank equipped with auxiliary energy. From thermal measurements, some design parameters for the full-scale equipment were obtained. The temperature range was suitable for thermal conditioning of the substrate bed germination but was insufficient for the drying system.

Keywords: cogeneration, solar heating of greenhouses, plant propagation systems, air cooled condenser, condenser, heat exchanger