

ENSAYO Y MEDICIÓN DE UN SECADOR SOLAR INDUSTRIAL TIPO TÚNEL EN EL NORTE ARGENTINO

M. Condori, G. Durán, R. Echazú, L. Saravia

INENCO, Instituto de Investigación en Energía No Convencional. (UNSa-CONICET)

Universidad Nacional de Salta,

Avda. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta, Argentina.

Te: 54-387-4255424, Fax: 54-387-4255489, E-mail: condori@unsa.edu.ar

RESUMEN: Se presentan un conjunto de mediciones realizadas en un secador solar tipo túnel, de circulación de aire forzada, de 500 kg de carga de producto fresco, que está operando en la planta de deshidratado de productos hortícola en Huacalera, Quebrada de Humahuaca, al norte de Argentina. Se presentan mediciones de temperatura, humedad, radiación y velocidad de aire en las distintas partes del sistema. Se obtuvieron además curva de nivel de temperatura y flujo de aire para la cámara de secado con distintas situaciones de funcionamiento.

Palabras Claves: secador solar, colector solar de aire, comportamiento térmico, medición

INTRODUCCIÓN

Como parte del proyecto PROSOL, cofinanciado por la Agencia Española de Cooperación Internacional, se construyó una planta de deshidratado de productos hortícola, que utiliza la energía solar como fuente de calentamiento del aire para dos secadores tipo túnel. La planta está ubicada en Huacalera (lat: 23° 26" S y long: 65° 21" O), Quebrada de Humahuaca, al norte de Argentina. La comunidad de Huacalera se encuentra a 2462 m sobre el nivel del mar lo que significa una presión atmosférica media de 772 HPa. Se caracteriza por ser una región con alta heliofanía solar durante todo el año y cuenta con un clima árido de grandes amplitudes térmicas, siendo la temperatura media anual de 13,5 °C. Las precipitaciones son escasas, la media anual es de 121 mm, y están concentradas entre los meses de diciembre y marzo. Es también una zona con fuertes ráfagas de vientos concentradas principalmente en horas de la tarde, el promedio anual de la velocidad de vientos es aproximadamente 5 ms⁻¹. En la figura 1 se muestra una vista del lugar de emplazamiento de la planta. Está ubicada en la ladera este de la Quebrada, que es también la más húmeda.



Figura 1: Planta de deshidratado de Huacalera, en la región de la Quebrada de Humahuaca

La planta de deshidratado cuenta con dos secadores solares idénticos en dimensiones, donde la cámara de secado es del tipo indirecto respecto a la incidencia del sol sobre el producto. Para cada cámara, el aire caliente es proporcionado por un banco de colectores de 100 m² de área de colección. Respecto a la circulación del aire, el secador es de flujo forzado, cada secador cuenta con un ventilador monofásico de 2 hp. Considera la disposición y el manejo del producto fresco, la cámara de secado es del tipo túnel (Mujundar, 1987).



Figura 2: Secador Solar de Huacalera, Quebrada de Humahuaca. Vista de colectores, cámara de secado y caño maestro del secador.

En la figura 2 se muestran cuatro fotos con diferentes vistas de las partes constitutivas del secador, estas son la cámara de secado, foto de la izquierda abajo, el banco de colectores, las dos fotos superiores, y el sistema de distribución de aire, foto derecha abajo, conformado por campanas de conexión a los colectores, el caño maestro donde se recoge el aporte de los colectores y el ventilador. El calentamiento del aire se realiza sólo con la energía solar provista por el banco de colectores y se utiliza un ventilador eléctrico monofásico para producir la circulación del aire. Cada secador cuenta con un banco constituido por 10 colectores, distribuidos en grupo de 5 a ambos lados del caño maestro. El colector tiene aproximadamente 1 m de ancho y 10 m de largo. Cada cámara de secado tiene una capacidad de carga de hasta 500 kg de producto fresco, que se distribuye en el interior de la cámara en carros con bandejas.

El aire ambiente ingresa a los colectores, a atravesando un filtro sintético, impulsado por el ventilador y recorre el banco aumentando su temperatura. El aire caliente pasa al caño maestro y luego, por un banco de filtros metálicos donde se limpia del probable polvo remanente, por el ventilador centrífugo hacia la cámara de secado. El ventilador se conecta a un difusor y éste a su vez a la cámara de secado donde el aire encuentra el producto a deshidratar. Finalmente, el aire sale de la cámara a través de dos ventanas ubicadas en la parte superior de la puerta de ingreso del producto fresco. El aire caliente entra por un extremo de la cámara de secado y lo recorre hasta el otro extremo pasando entre las bandejas con producto. Una vez seco el producto de los primeros carros, estos se desalojan por una puerta lateral y el resto de los carros se mueven hacia delante, a contracorriente de la circulación del aire.

La planta de deshidratado se puso en marcha al comienzo del invierno del 2006 y desde entonces se encuentra operando en forma continua. Los detalles constructivos y de funcionamiento del secador ya fueron presentados en un trabajo anterior (Condorí, 2006). Durante el año 2007 se completaron una serie de ensayos y medidas a fin de determinar su funcionamiento y proceder a su mejorar general. En el presente trabajo se presentan los resultados de las campañas de ensayos y la medición del sistema, como así también el análisis de dichos resultados.

EL SISTEMA DE MEDICIÓN

En la figura 3 se muestra un esquema de planta de un secador, indicando la ubicación de los sensores de medición que se utilizaron. Los números corresponden a termocuplas. Se censaron de forma simultanea 14 canales de temperatura, la humedad en la entrada y salida de la cámara de secado, la radiación global sobre plano horizontal y velocidad de viento. También se midieron curvas de nivel de caudal y temperatura en el interior de la cámara de secado para el área transversal a

la dirección de circulación. Además, se realizó el seguimiento del peso de los productos que se estaban secando. En este trabajo se presentan sólo los resultados de las mediciones térmicas y de flujo, mientras que los resultados de los ensayos con diferentes cargas y productos vegetales se muestran en otro trabajo (Echazú, 2007).

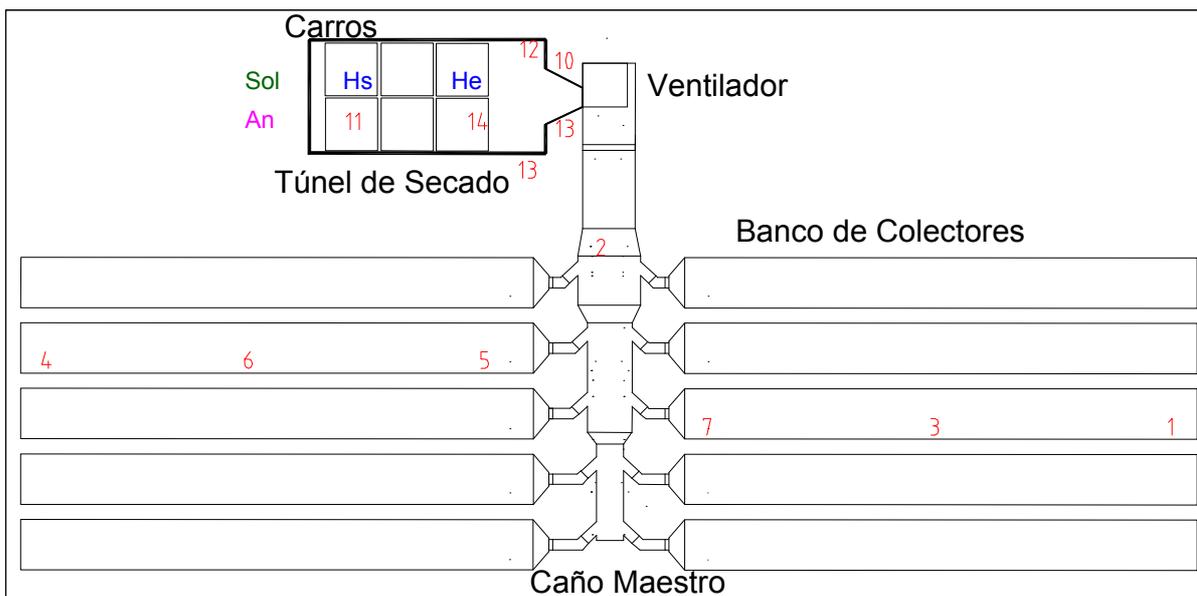


Figura 3: Vista de planta del secador sur. Los números indican el lugar de las termocuplas en los canales del micrologger.

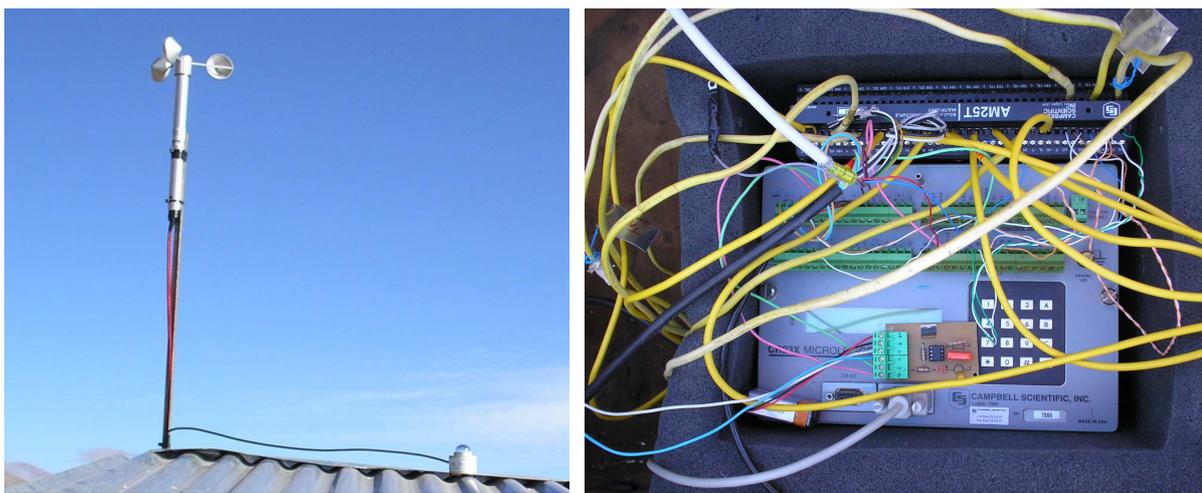


Figura 4: A la derecha una foto del micro datalogger y el multiplexor para termocuplas. A la izquierda una foto del anemómetro de cazoleta y el piranómetro colocados en el techo de la cámara de secado.

Todas las medidas fueron comandadas y almacenadas utilizando un datalogger Campbell Scientific mod. CR 32X, de 12 canales diferenciales, que se muestra en la figura 4, izquierda. El sistema de adquisición puede controlar la entrada de 12 señales analógicas y 12 señales diferenciales. Posee una memoria interna de 4 Mb, dividida en dos bancos independientes, y una autonomía a carga completa de un mes. Debido a que la cantidad de señales a monitorear fue mayor que el número de entradas analógicas del instrumento, se le adosó un multiplexor de estado sólido Campbell Scientific AM25T de 25 señales seteado para controlar las medidas de temperatura. La programación del sistema de adquisición de datos se realizó a través de la conexión RS232 del datalogger y un PC utilizando el software PC200W Campbell.

En las medidas de radiación se utilizó un piranómetro Kipp & Zonnen mod CM2 colocado sobre el techo de la cámara de secado, de forma de medir radiación incidente sobre un plano horizontal. Este solarímetro posee una selectividad espectral de $\pm 5\%$ (350 - 1500) nm., y un error direccional inferior a $\pm 25 \text{ Wm}^{-2}$ por cada 1000 Wm^{-2} . La sensibilidad del instrumento provista por el fabricante es de $16.6 \mu\text{V} / \text{Wm}^{-2}$, y su impedancia es 60 - 200 Ohm. La cartilla de especificaciones indica una exactitud estimada de $\pm 10\%$ en días claros.

Para censar velocidad de flujo de aire se utilizó un anemómetro de hilo caliente TSI Veloci Calc mod. 8345. El rango de operación del instrumento es de 0 a 30 ms^{-1} , con una apreciación de 0.01 ms^{-1} y un tiempo de respuesta de 2000 ms.

En las medidas de humedad relativa se utilizaron dos sensores HMP45A de Vaisala para medición de temperatura y humedad.

Las medidas de temperatura fueron realizadas con termocuplas tipo K, convenientemente calibradas, a las que se les colocó un capuchón de aluminio reflectivo a fin de protegerlas de posibles perturbaciones originadas por el intercambio radiativo interno entre las distintas superficies del sistema.

RESULTADOS

Primeramente se muestran los resultados obtenidos en los ensayos con los colectores solares. Una foto de uno de ellos y un esquema constructivo del mismo se muestra en la figura 5. Se midieron dos colectores del banco de 10, y que se pueden identificar en la figura 3 como colector este y oeste respecto al caño maestro que se encuentra en la dirección norte-sur. Las termocuplas fueron colocadas para medir la temperatura de a la entrada, al medio y a la salida del colector.

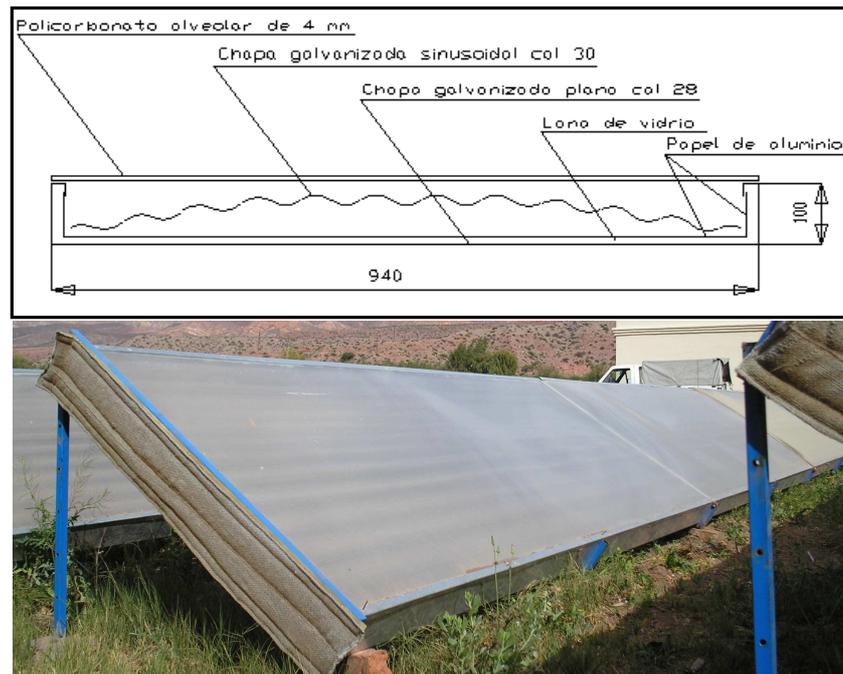


Figura 5: Esquema constructivo y foto del colector solar izquierdo.

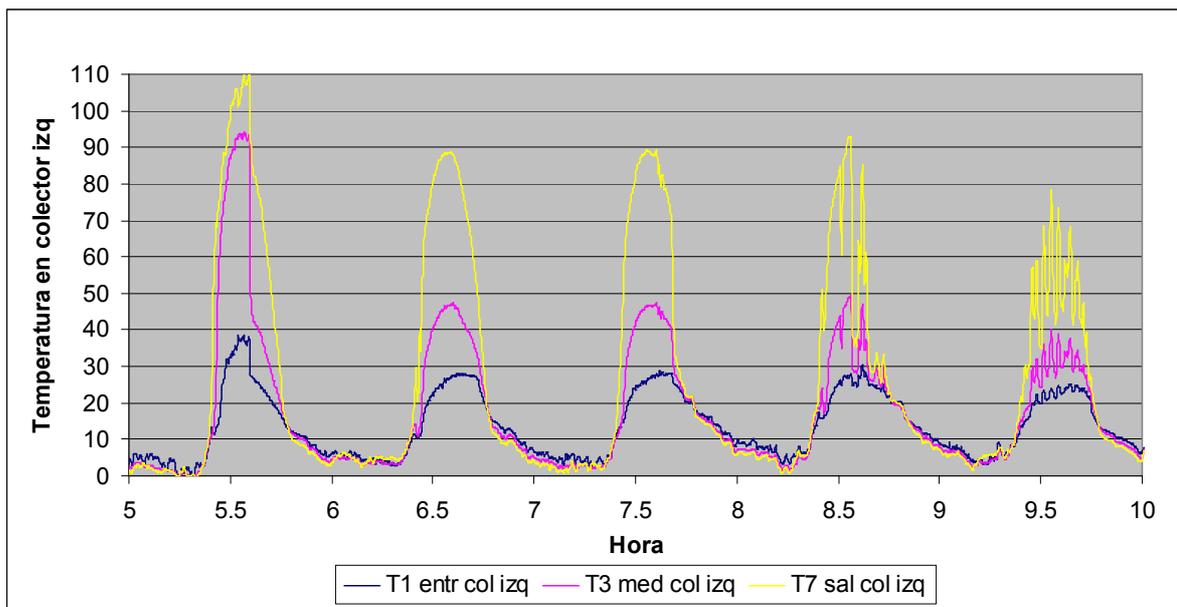


Figura 6: Cinco días consecutivos de medidas en el colector este. El primer día el ventilador está apagado

En la figura 6 se muestra una serie de cinco días consecutivos, del 2 al 6 de mayo, de las temperaturas que se midieron en el colector este respecto a la dirección norte-sur, o izquierdo mirando al sur. En el primero día de esta serie el ventilador no está en funcionamiento, de allí el valor elevado de la temperatura correspondiente a la longitud media del colector. Los últimos días corresponden a días con nubosidad variable, no obstante se observa que la temperatura de salida está próxima a los 60 °C. De estos, se elige el 3 de mayo para describir el funcionamiento de los colectores, durante el cual la cámara de secado estaba cargada con acelga. En la figura 7 se muestran los datos de temperatura ambiente a la sombra y radiación global sobre plano horizontal correspondientes a este día. Se observa que la primera alcanza los 28 °C al medio día solar y que la amplitud térmica día-noche es de 24 °C aproximadamente. Los valores de temperatura y amplitud térmica observados son característicos de la zona de Puna, para el invierno. Por otra parte la intensidad de radiación al medio día es próxima a los 800 Wm⁻². Se observa que la salida del sol para los colectores se produce aproximadamente a las 9 horas y la puesta a las 18 horas. Esto se debe a que la planta se encuentra en un corredor entre dos cordones montañoso, uno al este y otro al oeste. Este corredor es lo que constituye la Quebrada de Humahuaca, y que se extiende de norte a sur.

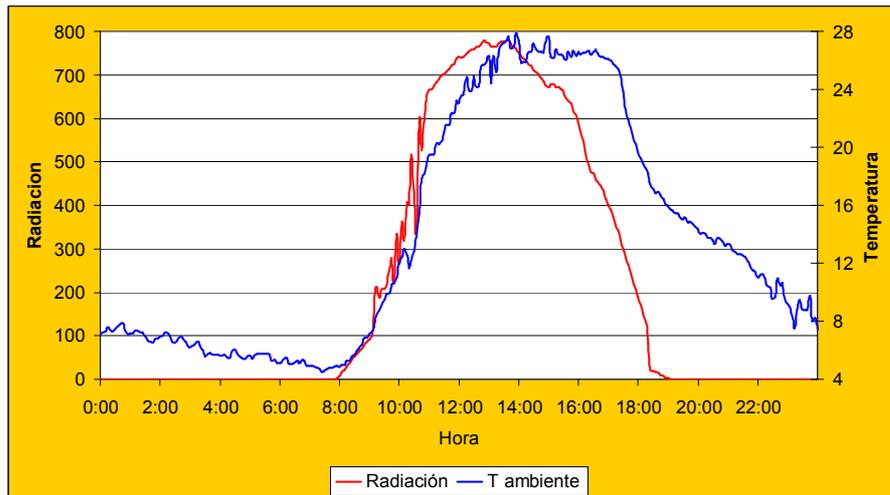


Figura 7: Valores de Radiación solar global sobre plano horizontal y Temperatura ambiente medidos el 3 de mayo de 2007 en Huacalera, Quebrada de Humahuaca.

En la figura 8 se muestran las temperatura de entrada, al medio y a la salida del colector oeste. Tanto las temperaturas de entrada como la de salida corresponden a valores promedios del aire. En el caso de la temperatura medida en el medio del colector, la temperatura del aire puede ser medida por debajo o por arriba de la chapa absorbidora. En el caso del colector que se muestra en la figura 8, la temperatura al medio corresponde a medidas por encima de la chapa absorbedor, en una ubicación próxima esta placa por lo que su valor se ve afectado por esta y está por arriba de la media simétrica entre las temperaturas de entrada y la salida.

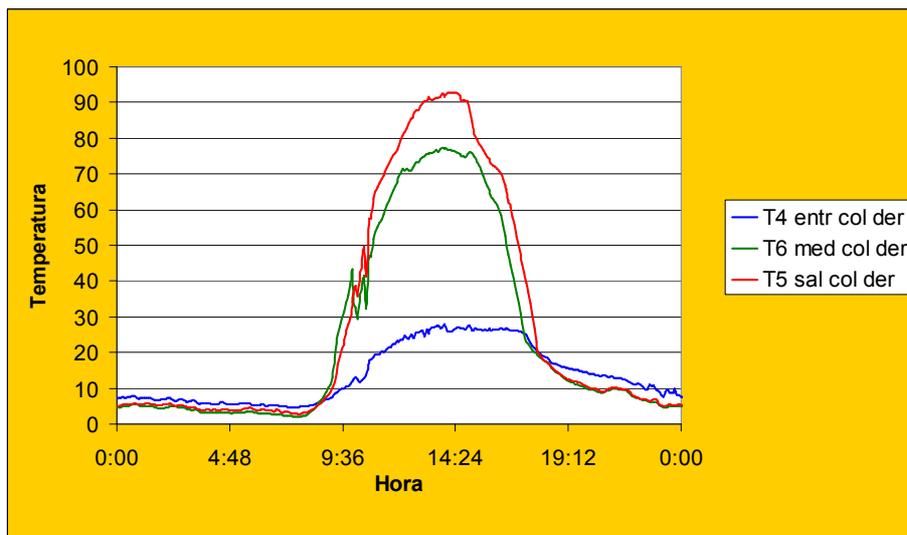


Figura 8: Temperatura del colector oeste a la entrada, al medio día y a la salida.

Cada colector cuenta con una válvula tipo mariposa para regular el paso de aire. En este caso el flujo medido en el colector fue de 0,033 Kg s⁻¹. Si se tiene en cuenta que la densidad del aire corregida por la altura es de 0,93 kgm⁻³, esto significa un

caudal de $127,7 \text{ m}^3/\text{hr}$. Como es de esperar, la temperatura de entrada se corresponde con la temperatura ambiente y alcanza un máximo de $28 \text{ }^\circ\text{C}$ al medio día, mientras que la temperatura de salida alcanza los $90 \text{ }^\circ\text{C}$ en ese mismo tiempo. Es decir que con ese caudal el colector produce un salto térmico de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente. En horas de la noche el ventilador no está funcionando y se observa que las tres temperaturas se aproximan, quedando sólo separadas por unos cuantos grados. El hecho que la temperatura del colector esté unos grados por debajo de la ambiente podría indicar que debido a la emisividad del absorbedor, existen mas pérdidas radiactivas entre absorbedor y la placa de policarbonato, y por ende desde esta última hacia el ambiente.

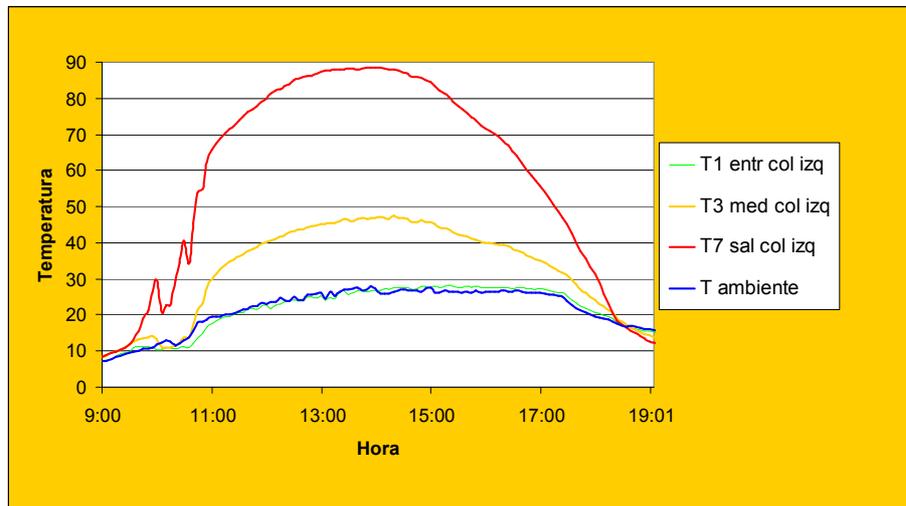


Figura 9: Temperatura del colector este a la entrada, al medio día y a la salida.

En la figura 9 se muestra la temperatura ambiente y a la entrada, al medio y a la salida del colector este, para el mismo día. Como se observa, la temperatura ambiente y a la entrada al colector son prácticamente las mismas. Se observa también que la temperatura al medio es menor que la temperatura al medio del colector oeste, debido a que la termocupla se ubicó por debajo de la chapa absorbedor. Pero también se debe a que en este colector la válvula mariposa se reguló para un flujo de aire casi el doble, siendo el flujo medido de $0,06 \text{ kgs}^{-1}$ aproximadamente. Esta diferencia al medio día de casi $30 \text{ }^\circ\text{C}$ entre las temperaturas al medio de ambos colectores también indicaría que también existen diferentes velocidades de flujo entre arriba y por debajo de placa absorbedor. La temperatura de salida de este colector es inferior algunos grados a la del colector oeste debido principalmente al mayor flujo de aire.

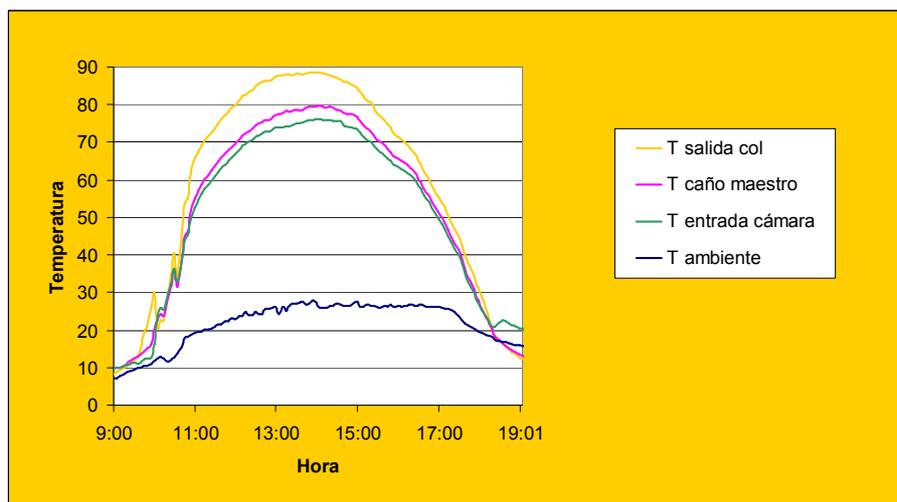


Figura 10: Comparación entre la temperatura ambiente y las temperaturas a la salida del colector, en el caño maestro y a la entrada de la cámara.

En la figura 10 se muestra la temperatura de las distintas partes por las que atraviesa el flujo de aire desde que entra al colector hasta que sale de la cámara de secado. Si se consideran los datos correspondientes al medio día solar el aire ingresa con aproximadamente $28 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura y con un flujo de $0,06 \text{ kgs}^{-1}$, y se calienta hasta alcanzar los $88 \text{ }^\circ\text{C}$. Es decir que el salto térmico que se obtiene es de $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Bajo estas condiciones el calor útil proporcionado por el colector es de $3,6 \text{ kW}$. El colector registra temperaturas superiores a los $50 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de secado óptima para muchos productos, desde las 10:30 hrs hasta las 17:30 hrs. Es decir que puede proporcionar temperatura por encima de la requerida por unas 7 horas al día. Si se

consideran los datos correspondientes a las 10 y a las 17 horas, el salto de temperatura es de 30 °C y el calor útil la mitad, indicando la necesidad de incrementar el flujo de aire para secar 500 kg al día. Se observa que el aire pierde unos 8 °C al pasar por el caño maestro y otros 4 °C al ingresar a la cámara de secado. Esto indica la necesidad de mejorar el aislamiento térmico de estos tramos. No obstante, el aire ingresa en la cámara con algo mas de 75 °C por lo que debe ser enfriado para evitar que se queme el producto. Por ahora se mezcla con aire ambiente succionado por el mismo ventilador al abrir la puerta del gabinete donde se encuentra. Otra posibilidad es incorporar un ventilador para el ingreso de aire ambiente, que permitiría un mejor control de mezclado y aumentar el caudal. También, se puede cambiar el ventilador por uno de mayor potencia, con lo cual descendería la temperatura de los colectores. Es claro que con la energía útil con la que se dispone y las horas de funcionamiento por encima de la temperatura límite del producto, el secar en el día 500 kg de producto es factible.

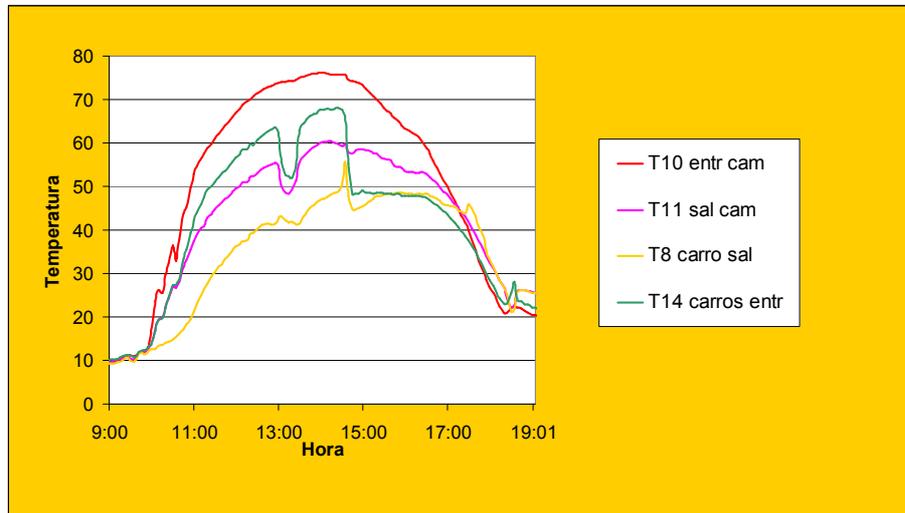


Figura 11: Temperatura en el interior de la cámara de secado.

En la figura 11 se muestra el comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara de secado. Las caídas de temperaturas que se observan, especialmente en los carros a la entrada, se deben a que la puerta lateral es abierta durante el día por los operarios. La caída de temperatura en la cámara es de 15 °C, mientras que la temperatura del aire entre el producto en las bandejas disminuye 25 °C aproximadamente. Esto indica que el aire abandona la cámara de secado sin utilizar todo el potencial. De acuerdo al diagrama psicrométrico, el aire puede abandonar la cámara de secado con una humedad relativa del 70 % y una temperatura próxima a los 30 °C. Se necesitan modificaciones para que el aire permanezca mayor tiempo en la cámara de secado, esto se puede conseguir con una salida controlada de aire. Los carros están separadas por 5 cm entre ellos y por 10 cm del techo y el suelo. Debido a que estas separaciones son excesivas, se optó por ensayar una modificación para lograr una mejor distribución del aire en el interior de la cámara de secado, la que se describe a continuación.

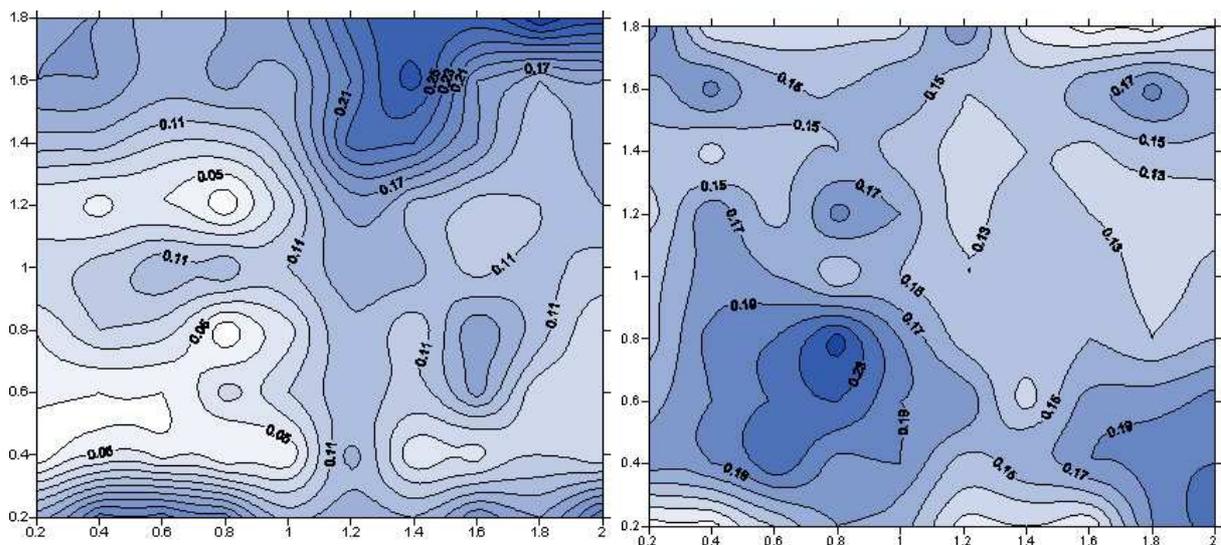


Figura 12: Perfiles de velocidad del aire en el interior de la cámara de secado. Curvas de nivel tomadas en la sección transversal de salida. A la izquierda las medidas corresponden a la situación actual y a la derecha la situación modificada.

En la figura 12 se muestra las curvas de nivel medidas en la sección transversal a la salida de la cámara de secado, ambas para situación de túnel cargado con acelga manteniendo las puertas cerradas. Se observa en la figura de la izquierda, que el flujo se escapa por arriba y por debajo de los carros, las zonas con azul fuerte. En la figura de la derecha se muestran los

resultados de una mejora sencilla que se introdujo, colocando alrededor del carro pantallas para impedir el paso del aire, de forma que sólo pase por la zona de bandejas. La menor cantidad de zonas claras que se observa está indicando una importante mejora de la distribución del flujo. No obstante todavía se puede optimizar reduciendo la separación entre bandejas, agregando mas bandejas por carro, lo que aumentaría la capacidad de carga y reduciría también la temperatura en la cámara de secado.

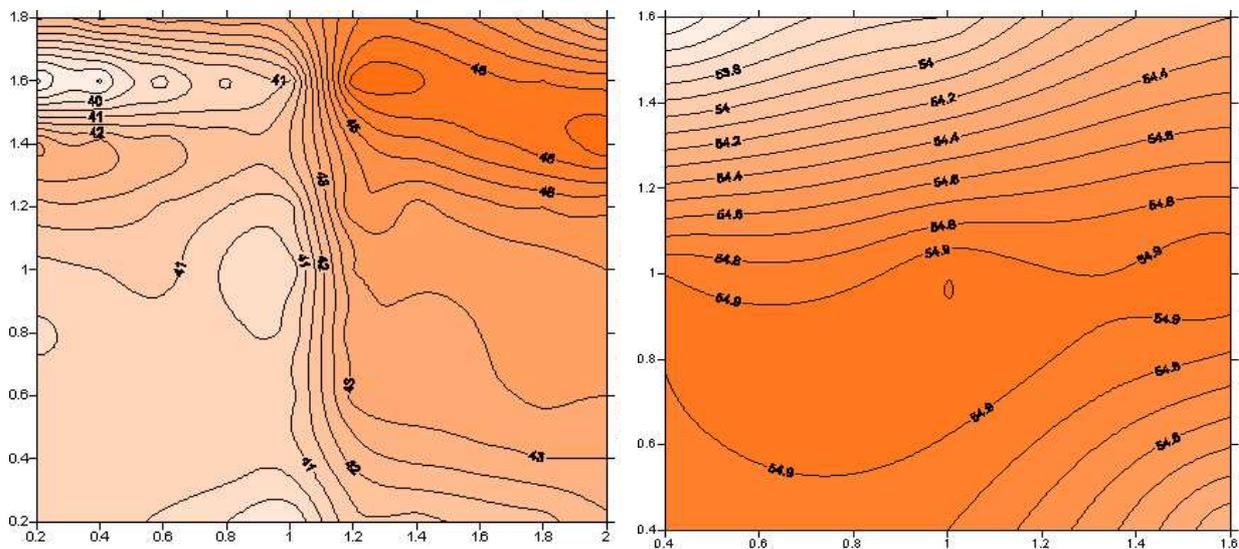


Figura 13: Curvas de nivel de la temperatura del flujo de aire en la cámara de secado.

En la figura 13 se muestran las curvas de nivel correspondiente a las temperaturas del ensayo anterior. Se observa claramente como la colocación de las barreras entre el contorno de los carros y las paredes de la cámara también mejora la distribución de temperatura. Mientras que en la figura de la izquierda la máxima diferencia entre puntos es de 6 °C y el calor está escapando principalmente por el lado derecho de la cámara. En la figura de la derecha se observa que la diferencia de temperatura es del orden de 1 °C, y prácticamente uniforme.

CONCLUSIONES

Se presentan las mediciones realizadas a un secador industrial que opera en la zona de la Quebrada de Humahuaca. El sistema genera suficiente energía como para completar el secado de una carga de 500 kg de producto fresco durante un día soleado. Sin embargo, las medidas muestran que no se está utilizando todo el potencial de energía que producen los colectores. Se necesitan correcciones para mejorar la distribución del aire en la cámara de secado. Estas pueden ser pantallas plásticas para obligar la circulación a través de las bandejas. También se puede reducir la separación entre bandejas lo que además aumentaría la capacidad de carga de la cámara. Se deben evitar las pérdidas térmicas existentes en las uniones de los colectores y el caño maestro, mejorando el aislamiento térmico. El rango de temperatura de trabajo de los colectores garantiza un funcionamiento con temperaturas por encima de 50 °C por unas 7 horas de sol, para los días de invierno que se ensayaron, por lo que se pueden esperar mayores temperaturas en verano. Esto es una consecuencia de que los colectores pueden ser orientados a la radiación directa. Estas altas temperaturas son peligrosas para el producto, por lo que se requieren modificaciones en la potencia de los ventiladores y la incorporación de una mezcla controlada con aire ambiente.

Estas modificaciones permitirán optimizar el funcionamiento del equipo que ya produce buenos resultados. Los secadores se han operado con distintos vegetales de la zona y están siendo ensayados con distintas y crecientes cantidades de cargas, demostrando trabajar satisfactoriamente.

REFERENCIAS

- Mujundar A. (editor). (1987). *Handbook of Industrial Drying*. Marcel Dekker inc., New York.
- M. Condorí, R. Echazú, L. Saravia. *Secador solar indirecto con flujo de aire forzado para Huacalera, Quebrada de Humahuaca*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 10, (2), pp. 47-54, ASADES, Argentina, 2006.
- R. Echazú, M. Condorí, L. Saravia. *Curvas de Secado experimentales en la planta de deshidratado solar de Huacalera*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 2007. En prensa.

ABSTRACT

A measure set performed in a tunnel solar drier is presented. The forced airflow drier has a load capacity of 500 kg of fresh product and it is working in a dehydration plant of agricultural products in Huacalera, north of Argentina. Measurement of temperature, humidity, solar radiation and air velocity in different part of de system are presented. Temperature and airflow level curves are obtained under different conditions in the drying chamber.

Keywords: solar drying, air solar collector, thermal behavior, measurement