

SISTEMA HIBRIDO SOLAR-ELECTRICO PARA LA OPTIMIZACION DEL PROCESO DE SECADO A ESCALA INDUSTRIAL EN EL VALLE CALCHAQUÍ

M. Condorí, G. Durán, C. Martínez, R. Echazú, A. Acevedo
Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO)
Universidad Nacional de Salta (UNSa)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Subsecretaría de Agricultura Familiar-Delegación Salta
Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación
Avda. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta, Argentina.
Te: 54-387-4255424, Fax: 54-387-4255489, e-mail: condori@unsa.edu.ar

Recibido: 09/08/12; Aceptado: 04/10/12

RESUMEN: Se presenta la construcción y primeros ensayos de una planta de secado solar destinada a la producción de pimentón. El sistema está compuesto por un túnel opaco a la radiación solar, una cámara de presecado con ganancia directa y un calentamiento auxiliar de 24 kvatios eléctricos. El túnel utiliza un banco de 32 calentadores solares de aire y permite una carga máxima de 6300 kg, mientras que la cámara de presecado una carga de 5670 kg. Se realizaron ensayos de funcionamiento del sistema durante su primer año de uso, con carga de 3500 kg de pimiento. Los resultados muestran un incremento de 35 °C entre la temperatura de entrada y salida de los colectores solares y temperatura de 55°C a la salida de la cámara de secado, con humedad relativa de 20%. El sistema genera energía suficiente para presecar la carga en un par de días soleados y terminar el secado en el túnel en un día de sol.

Palabras clave: Secado solar, Calentadores solares de aire, pimentón.

INTRODUCCIÓN

En el valle Calchaquí los procesos de secado se realizan con sistemas tradicionales de baja eficiencia, como es el caso del secado directo al sol sobre suelo o en tendaleros, que presentan deficiente calidad final del producto seco. La mayoría de las zonas productoras se hallan en situación de difícil acceso a fuentes energéticas convencionales económicas, como gas natural. El empleo de biomasa de origen vegetal no es sustentable debido a la escasa vegetación arbórea y recursos hídricos. Sin embargo, la red de distribución de energía eléctrica se encuentra desarrollada con aceptable penetración.

La deficiente tecnología actual de secado, se practica en condiciones que provocan no sólo el deterioro del color sino también la contaminación con tierra, insectos y desechos de animales. Se favorece también la formación de hongos y pérdidas por quemaduras localizadas. Lo descripto lleva a un producto de baja calidad difícil de ser comercializado por su heterogeneidad, que sumado a que no existe una común unión para incorporación de valor agregado, como ser molienda, envasado, etc., ni para su comercialización, la mayoría de pequeños productores se ven obligados a vender a intermediarios.

Por otra parte, el recurso solar es uno de los más altos a nivel mundial por lo que para desarrollar un sistema industrial de secado, es conveniente el aprovechamiento de la energía solar asociando a una fuente auxiliar de energía eléctrica. Un equipo así brinda continuidad del proceso y también favorece la diversificación de la producción local tendiente a una utilización del sistema durante todo el año. Dado el carácter de monocultivo de la región, este resultado puede ser altamente beneficioso para la economía y el trabajo local.

Un producto emblemático de la región es el pimiento para pimentón. Se han propuesto y aplicado diversos procedimientos para realizar el secado de pimiento utilizando energía solar y mediante sistemas solares híbridos con quemadores de leña. Los antecedentes de investigación locales relevantes incluyen sistemas activos de secado solar, como el construido en Cachi, Salta, (Saravia *et al.* 1983; 1984), y los secadores industriales de Huacalera, Jujuy (Condorí, *et al.* 2007) y San Carlos, Salta (Condorí, *et al.* 2009; 2010).

Existen varios antecedentes de secado de pimiento y ají, especialmente en trabajos de China y la India, pero la mayoría se trata de sistemas de pequeña o mediana escala de producción. Se puede citar los trabajos de Hossaina y *et al.* (2005), Hossaina y Bala (2007). En particular, Hossaina y *et al.* (2005) propone aumentar el área del calentador solar de aire para mejorar la retención de color y Bonout y *et al.* (2011) ensaya un secador alimentado por un calentador solar de aire de doble paso con circulación forzada alimentado por paneles fotovoltaicos.

El objetivo final del presente trabajo está dirigido a la optimización desde el punto de vista del ahorro energético, de los costos de producción y de la mejora de la calidad final del proceso de un sistema de secado de pimiento para pimentón. Se presenta el desarrollo y estudio de un túnel de secado industrial solar indirecto, con aprovechamiento de la energía solar mediante un banco de colectores y el apoyo auxiliar de la energía eléctrica para el calentamiento y la circulación del aire. Además, el túnel tiene asociada una cámara de presecado solar directa a baja temperatura.

METODOS Y MATERIALES

En el caso del pimentón, se ha encontrado que una cámara de presecado asociado a un túnel de secado continuo optimiza el proceso en cuanto a calidad de producto final y el aprovechamiento de la energía disponible. En la primera, se practica un secado controlado a baja temperatura que retiene la calidad de propiedades que valorizan el producto final, como el color, mientras que en la segunda se realiza la extracción del agua ligada a mayor profundidad del producto, un proceso que requiere de mayor energía. Con el ingreso de producto presecado en la segunda cámara se logra culminar el proceso de secado durante un día de sol. Además, se mejora el manejo de las etapas previas del proceso como son la recepción del producto, la clasificación y el pretratamiento requerido. La optimización del funcionamiento entre ambos sistemas de secado, túnel y cámara, reducirá tanto el área de colectores solares como así también la energía eléctrica utilizada. Esta optimización también redundará en la duplicación de la capacidad de carga de la planta y en la reducción de los costos de construcción y mantenimiento, lo que beneficia las posibilidades de transferencia del equipo.

Las etapas del proceso de secado propiamente dicho están conformadas por los siguientes sistemas:

1. banco de colectores solares calentadores de aire,
2. auxiliar de calentamiento mediante resistencias eléctricas aleteadas,
3. ventiladores y acondicionamiento de aire,
4. túnel de secado industrial, opaco, con calentadores solares en techo,
5. cámara de presecado solar,
6. sistema de monitoreo y control del funcionamiento

No se incluye pero se plantea la incorporación de un sistema de acumulación de calor de ser necesario. Se recibe el producto fresco en la planta, donde es seleccionado en cuanto principalmente a la calidad y la etapa de maduración, luego de lo cual es lavado. El producto sin madurar, o con color desperejo, se coloca en la cámara de presecado, donde sufre un secado a baja temperatura, menos de 40 °C, por un par de días. El producto maduro, o con color firme, que sale de la cámara de presecado se coloca en el túnel de secado donde sufre un secado final a mayor temperatura, entre 50 y 60 °C. Una vez seco, el producto se retira del túnel y se pasa a la planta donde se acopia a la espera de completar la etapa de molienda y envasado. En la Fig. 1 se muestra un esquema con la ubicación relativa de los sistemas dentro de la planta de procesamiento:

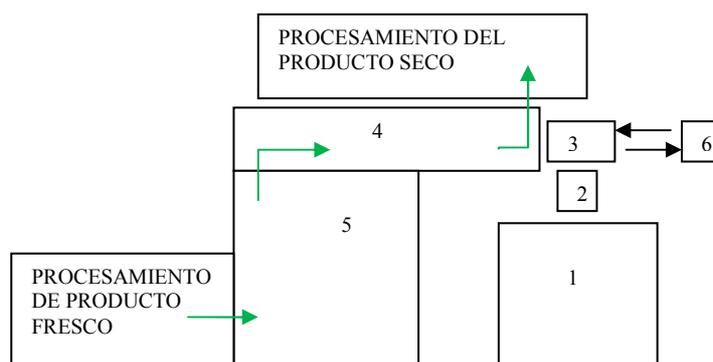


Figura 1: Esquema de la planta de procesamiento de pimiento para pimentón de San Carlos, Salta.

El sistema, cuenta con un túnel de secado opaco a la radiación solar y una cámara de presecado transparente. Un banco de calentadores solares de aire conformado por 32 colectores, provee la energía necesaria para el túnel, que además cuenta con ocho colectores solares integrados a la pared norte y al techo. Estos colectores, de 2,10 m de ancho, son una fuente auxiliar de energía al invernadero, ya que la salida de todos los colectores es recogida a nivel del suelo e ingresada a la cámara de presecado. El sistema se completa con un banco de resistencia, 24 kvatios de potencia total, conectados en serie con el banco de calentadores solares.

La superficie total ocupada por el sistema de secador es 350 m². De ellos, 102 m² corresponden a la cámara y al túnel de secado, 220 m² al banco de colectores, y 29 m² al caño maestro y el tramo de conexión del banco de colectores con la cámara. La circulación del aire es forzada, mediante un ventilador centrífugo de 5,5 HP a 1500 rpm, ubicado entre la salida del banco de colectores y la entrada al túnel de secado. Si bien el ventilador está ligeramente descompensado, con su ubicación se busca que la pérdida de carga del banco de colectores compense las pérdidas de carga por el producto en el túnel de secado.

El ventilador fuerza el ingreso de aire ambiente en cada colector, donde incrementa su temperatura. Luego, el aire ingresa al caño maestro en donde se suma el aporte de todos los colectores, obteniéndose la temperatura y caudal adecuados para el secado en el túnel, entre 50-60 °C. En esta, el movimiento de los carros se realiza a contracorriente del flujo de aire. De esta forma se utiliza de manera continua el sistema produciendo un gradiente de secado. Así, los carros con producto seco se extraen por la puerta lateral, más próxima al ingreso del aire caliente, mientras que se introducen por el otro extremo los carros con producto fresco, desplazando las dos columnas de carros hacia adelante. Finalmente, el aire húmedo sale del túnel de secado por dos ventanas en la puerta de ingreso del producto fresco, desechándose a la atmósfera.

Existen partes del sistema, colectores, carros, etc., que son constructivamente similares a otros descritos en trabajos anteriores, (Condori *et al.*, 2009, 2010), por lo que no se dan mayores detalles sobre estos, haciendo énfasis en este trabajo, en las mejoras introducidas respecto a los sistemas anteriores.

El banco de colectores solares de aire estuvo compuesto por 32 colectores, distribuidos en dos grupos de 16 ubicados a ambos lados del caño maestro. La separación eje a eje entre colectores fue de 1,4 m, para permitir la circulación del personal y evitar el sombreado entre colectores. Sus dimensiones fueron 0,94 m de ancho, 7,32 m de largo y 0,1 m de alto. Son del tipo rebatibles, permitiendo optimizar su pendiente respecto a la altitud solar. Ensayos preliminares realizados sobre un prototipo mostraron que el caudal óptimo de aire por colector es de $350 \text{ m}^3\text{hr}^{-1}$, con una velocidad de flujo de $1,8 \text{ ms}^{-1}$. Con este caudal el colector opera con eficiencia próxima al 50 %, con temperatura de salida en el rango de los $60 \text{ }^\circ\text{C}$ con una radiación solar media diaria mensual de 18 MJm^{-2} (Condorí *et al*, 2006).

El caño maestro fue de aproximadamente 24 m de largo y compuesto por dos tramos de distintas secciones, 0,90 m por 0,30 m y 0,90 m por 0,5 m de alto, respectivamente. El aumento de sección permitió equilibrar la presión por la suma de flujo de aire de cada colector, evitando un aumento brusco en la velocidad del aire y en las pérdidas de carga. La última sección del caño maestro se unió al ventilador mediante un acople de sección rectangular a una circular de 0,28 m de diámetro que coincidió con la boca de entrada del ventilador. Las uniones de los colectores con el caño maestro se realizaron mediante campanas de reducción, de sección rectangular de 0,10 m de alto y 0,94 m de ancho, a una circular de 0,27 m de diámetro. Estas campanas, proporcionaron una unión fácil con el caño maestro, permitiendo el giro de los colectores respecto a su eje.

El aire caliente ingresó a la cámara de secado desde un difusor que conecta con el ventilador. El difusor, construido en chapa y aislado térmicamente, tuvo una sección transversal de salida de $2,6 \text{ m}^2$. El túnel de secado tuvo las siguientes medidas internas 1,8 m de alto, 16,8 m de largo y 3 m de ancho, Fig. 2. Su estructura está construida en caños de 40 mm de lado en los verticales y de 40 mm por 20 mm en los horizontales, fijada al piso mediante tirafondos. El piso de la cámara tiene aislamiento térmico en poliestireno de 5 cm de espesor, con una carpeta de concreto reforzado y terminación en piso cerámico. Se asegura el cierre entre la estructura y el piso mediante burletes de goma. El interior de la estructura está revestido con chapa galvanizada lisa en las paredes y chapa galvanizada ondulada en el techo. Las uniones entre paredes, piso y techo están selladas. Las paredes exteriores sur, este y oeste están revestidas con chapas galvanizadas onduladas, sujetas a la estructura con tornillos. Entre el revestimiento interior y exterior se colocó aislamiento térmico en lana de vidrio de 5 cm con barrera de humedad.



Figura 2. Caras norte y este de la cámara de secado. Se aprecian los colectores solares en techo y pared, y la puerta de entrada de producto fresco. Esquema de sección de la cámara de secado.

La pared norte y el techo fueron revestidos con colectores solares, Fig. 2. Los colectores de la pared norte se ubicaron verticales al piso, y los superiores inclinados un ángulo de 24° respecto a la horizontal. Estos colectores no tienen aislamiento por el fondo, con lo cual parte del calor se recupera en la cámara de secado. También estos colectores proveen una fuente auxiliar de energía para la cámara y para el invernadero de presecado. La salida de cada colector de la pared está conectada con la entrada del colector superior del techo, de forma que el flujo que circula por ambos es el mismo. Así, la pared norte y el techo constituyen ocho colectores independientes de 3,4 m de largo cada uno. Al nivel del piso, pared norte, se coloca un caño para recoger el aporte de estos colectores y llevarlo a la cámara de presecado contigua.

La entrada de carros con producto fresco se realizó por una puerta de dos hojas de 1,50 m de ancho por 1,8 m de alto cada una, con ventanas de 1 m por 0,5 m para salida del aire húmedo. En estas se colocó filtro sintético para evitar la entrada de polvo e insectos. Las puertas fueron construidas con caño estructural, chapa galvanizada lisa y aislamiento de lana de vidrio. La salida de los carros con producto seco fue por una puerta lateral de 1,50 m por 1,8 m ubicada en el extremo sur - oeste del túnel. En el interior de la cámara se colocaron 20 carros distribuidos en 2 filas, que cargan 13 bandejas de $2,1 \text{ m}^2$ de área cada una, con una separación entre bandejas de 12 cm. El alto total de un carro cargado fue de 1,75 m y la separación entre las dos filas de carros y entre las paredes del secador fue de 5 cm, colocando guías de hierro ángulo sujetas al suelo para facilitar el desplazamiento. La densidad de carga fue aproximadamente de 10 kg/m^2 , 270 kg de producto fresco la de cada carro, siendo 6000 kg la carga total de la cámara de secado.

La campaña 2011- 2012 se probaron todos los sistemas funcionando pero con distintas etapas de incorporación. En particular la cámara de presecado se agregó al final de la campaña 2012. Su inclusión permitió duplicar la capacidad de secado de la planta, y mejoró la maduración y velocidad final de secado. Fue construida al lado norte del túnel de secado, con las siguientes dimensiones: 3 m de ancho, 18 m de largo, 1,80 m de alto en la parte más baja y 1,90 m en la más alta. Los materiales utilizados fueron policarbonatos alveolar de 4 mm de espesor y soporte de caño estructural de 50 mm por 30 mm. La cámara tiene ganancia directa de radiación pero también obtiene calor auxiliar del techo del túnel de secado mediante un ventilador que impulsa el aire caliente hacia el invernadero. En el interior del mismo se colocan 2 filas de 9 carros, 18 carros en total, con pimiento fresco. Cada carro permite a la vez tener trece pisos, de 13 cm cada uno, donde se carga el producto fresco. Por carro se cargó 300 Kg de producto teniendo en toda la cámara de secado 5400 Kg de producto fresco.



Figura 3: (A) vista este de las puertas de carga del túnel de secado y de la cámara de presecado. (B) foto del banco de resistencias aleteadas que conforman el banco de calentamiento auxiliar de 24 kvatios.

El sistema auxiliar de calentamiento eléctrico permite garantizar el funcionamiento del secador en ausencia de la radiación solar, a la vez que permitirá reducir la necesidad de acumulación de calor. Si bien este último todavía no se ha construido, es sabido que un sistema solo solar requiere mayor volumen de acumulación y área de colectores que un sistema híbrido. Está conformada por 12 resistencias eléctricas del tipo industrial de 2 kvatios cada una, conformando un banco de 24 kvatios de potencia. Se encienden en forma independiente de a tres resistencias, una por cada fase, por lo que se tienen 4 llaves manuales para el encendido. Posee un sistema de seguridad que impide el encendido de las mismas si no está funcionando el ventilador.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Se realizaron ensayos durante algunos meses de los primeros años de uso. Estos incluyeron el monitoreo de la cámara de secado, del banco de colectores, y de las variables ambientales. Se midieron de forma automática, la temperatura ambiente, la radiación solar global sobre plano horizontal, la velocidad de viento y la humedad relativa del aire a la entrada y a la salida del túnel de secado. Además se midió la temperatura del flujo de aire en distintos puntos: a la entrada y salida de dos colectores, en el inicio, medio y extremo del caño maestro, y a la entrada y salida de la cámara de secado. Se eligieron dos colectores equidistantes respecto al caño maestro, de los cuales a uno se le colocó un filtro de fibra sintética en la boca de entrada y al otro no. En forma manual se midió la velocidad de flujo de aire a la entrada del túnel de secado. Las medidas de temperatura se realizaron mediante termocuplas tipo K, y las de humedad relativa a la entrada y salida de la cámara de secado mediante dos higrómetros HMP45A de Vaisala. Para la medición automática de las variables se utilizó un datalogger Campbell CR23X con una frecuencia de adquisición de datos de 5 minutos.

Las medidas de temperatura ambiente, velocidad de viento y radiación solar global sobre plano horizontal se realizaron con un datalogger Campbell CR1000, con una frecuencia de adquisición de datos de un minuto. La radiación solar global sobre plano horizontal fue medida mediante un pirheliómetro Kip & Zonnen CM3, y los valores de velocidad de viento se midieron con un anemómetro de cazoletas Met One 14A, a una altura de 5 m sobre el suelo. Las medidas de velocidad de flujo de aire a la entrada de la cámara de secado se realizaron con un manómetro ALNOR modelo 8345, manual, con una matriz de 20 puntos que permite medidas simultáneas en un área de 30 cm². La técnica utilizada fue tomar promedios en un intervalo de 10 segundos, formado una grilla de 15 puntos para cubrir la sección transversal del difusor, de 2,6 m².

A continuación se exponen los resultados obtenidos entre abril y mayo de 2010. Durante este periodo, el secador túnel se encontró funcionando en un 70% de su carga total, sin la cámara de presecado que se incorporó recién en la campaña 2012. Debido al gran volumen de datos obtenido, se optó por representarlos mediante diagramas de cajas, para luego describir de forma más detallada los resultados de dos días de secado, el 3 y 4 de mayo.

Resultados abril -mayo

Las Fig. 4 muestran la dispersión en resultados ambientales obtenidos. En la Fig. 4-(A) se puede observar que los valores de temperatura ambiente se encuentran relativamente dispersos, resultado de la amplitud térmica que caracteriza el lugar, observándose una temperatura mínima de -1,9 °C, y una máxima de 31 °C. Al mismo tiempo, el rango entre el primer y tercer cuartil, q₃ y q₁, indica que el 50% de los valores de temperatura ambiente se encuentran en el intervalo de 19 a 7 °C, con una mediana de 12 °C. Estos valores son adecuados a la época, mediados de otoño, y a la zona de los Valles Calchaquíes.

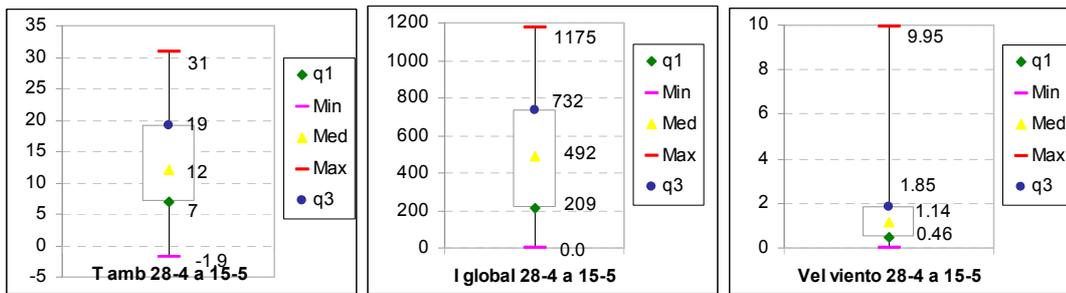


Figura 4-(A) Diagrama de cajas para temperatura ambiente, (B) radiación global, (C) velocidad de viento.

La Fig. 4-(B) corresponde al diagrama de cajas para la radiación global sobre plano horizontal. Se observa una dispersión con máximos de 1175 W/m^2 , mínimos de 0 en horas de la noche, y la mayoría de los datos en el rango de 732 W/m^2 a 209 W/m^2 , con mediana de 492 W/m^2 . Estos resultados muestran las buenas condiciones de la zona, conocida por su alta radiación solar y escasos días de lluvia. En la Fig. 4-(C) se pueden observar los resultados de velocidad de viento. Aunque existen ráfagas de 9.95 m/s se observa una distribución cerrada, con valores en el intervalo de 0.46 a 1.85 m/s , y mediana de 1.14 m/s .

En la Fig. 5 se muestran los resultados de temperatura en los dos colectores monitoreados. En ella se observa que la temperatura de flujo en el colector 1 (con filtro en la entrada de aire) es mayor, tanto a la entrada, como a la salida que los observados en el colector 2 (sin filtro). Así, los máximos obtenidos son $75.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y $69.3 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. Se observa un máximo anómalo en la entrada del colector 1, de $79.4 \text{ }^\circ\text{C}$, correspondiente a un día de mantenimiento, en el que se lo desconectó del caño maestro, permaneciendo sin circulación de aire.

La Fig. 6 describe los resultados medidos de temperatura en el caño maestro. Se observa que la temperatura del flujo de aire desciende a lo largo del caño maestro, debido a pérdidas hacia el ambiente. Sin embargo estas pérdidas no son grandes, la mediana de la temperatura de aire disminuye $2.33 \text{ }^\circ\text{C}$ desde el inicio a la salida del caño maestro, en tanto que la máxima disminuye $3.52 \text{ }^\circ\text{C}$. Se puede inferir que se presentaron variaciones considerables en las distribuciones de temperaturas, con diferencias entre los valores máximos y mínimos del orden de $68 \text{ }^\circ\text{C}$, originadas por las variaciones en temperatura día – noche.

Los resultados obtenidos a la entrada y salida de la cámara de secado se describen en la Fig. 7. En la Fig. 7-(A) se observa que la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de la cámara de secado es pequeña, con medianas de $37.72 \text{ }^\circ\text{C}$ y $37.49 \text{ }^\circ\text{C}$ y valores máximos de $60.48 \text{ }^\circ\text{C}$ y $59.06 \text{ }^\circ\text{C}$ a salida y entrada de la cámara de secado, respectivamente. Al mismo tiempo, los resultados de humedad relativa entre la entrada y salida de la cámara de secado, Fig. 7-(B), muestran que las distribuciones obtenidas tienen medianas de $8.53 \text{ } \%$ y $16.79 \text{ } \%$ y rango intercuartil ($q1 - q3$) de 12.36% y 33.34% a la entrada y salida, respectivamente. La humedad relativa del tercer cuartil fue de aproximadamente $44 \text{ } \%$ mostrando que el aire sale la mayor parte del tiempo sin completar su potencial de secado.

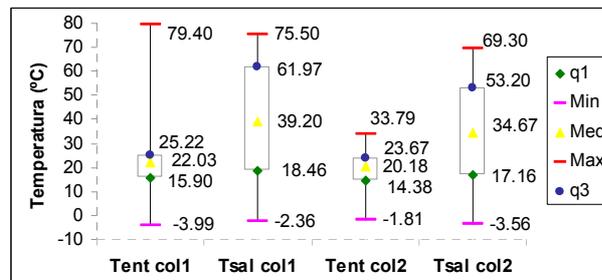


Figura 5: Diagrama de cajas para la temperatura de flujo de aire en dos colectores solares.

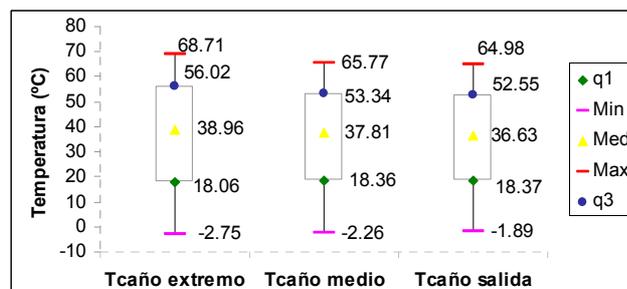


Figura 6: Diagrama de cajas para la temperatura de aire en el caño maestro.

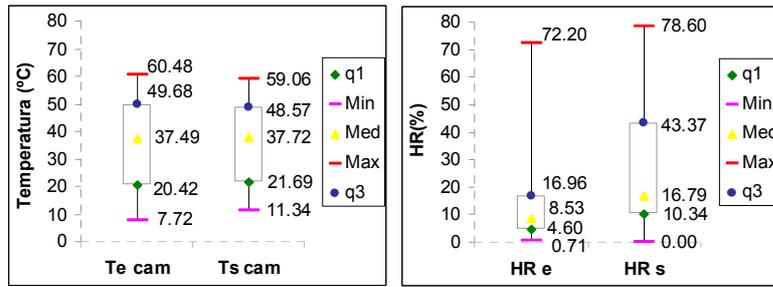


Figura 7-(A) Diagrama de cajas de temperatura en cámara de secado, (B) Diagrama para humedad relativa.

Resultados días 3 y 4 de mayo

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los días, 3 y 4 de mayo. La Fig. 8 muestra los resultados de las medidas de temperatura de aire en los colectores ensayados. Se observan temperaturas similares en la entrada de ambos colectores, mientras que son ligeramente superiores los registrados en el colector 1 (sin filtro de aire). Además, se observan valores máximos en mediodía solar cercanos a 70 °C para el colector 1, y de 65 °C para el colector 2. La diferencia en los resultados puede ser originada por diferentes velocidades del flujo de aire circulante o pérdidas de calor por un cierre deficiente en la cubierta. Por último, en horas de la noche los valores a la entrada y salida de los colectores coinciden, lo que es de esperar, ya que la radiación incidente es nula.

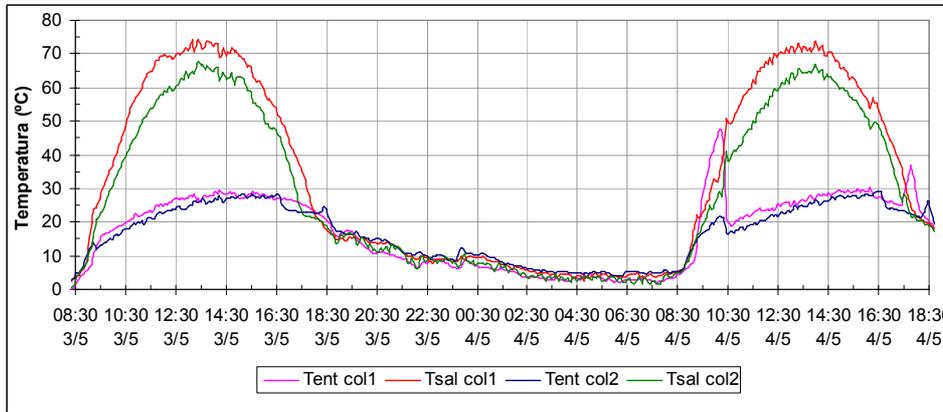


Figura 8: Temperatura de flujo de aire en la entrada y salida de los colectores.

En la Fig. 9 se muestra que la temperatura a lo largo del caño maestro disminuye ligeramente, con una caída máxima de 5 °C al medio día solar. Mejorando la aislación térmica se puede elevar en esa cantidad la temperatura de entrada al túnel de secado. Los resultados de temperatura de flujo a la entrada y salida del túnel de secado se muestran en la Fig. 10, donde la temperatura de la entrada es mayor en 5 °C que la de salida, alcanzando esta a los 60 °C. Por la tarde se observa que la temperatura de salida es mayor que la de entrada probablemente por un efecto de acumulación de calor en el producto.

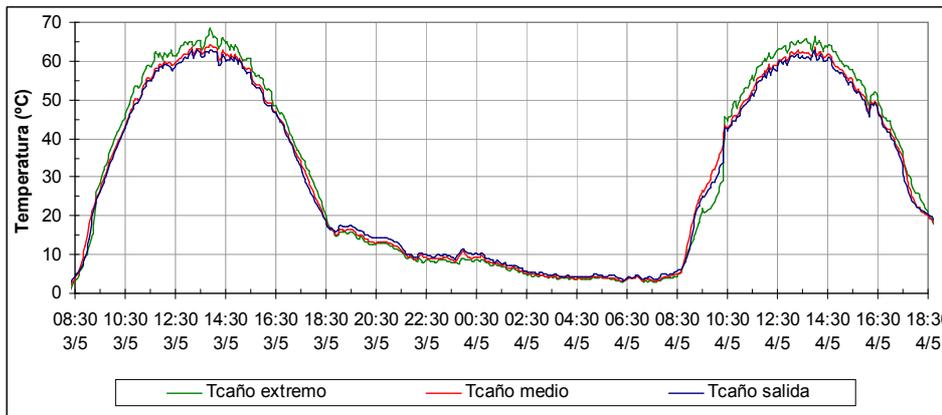


Figura 9: Temperatura de flujo en el caño maestro.

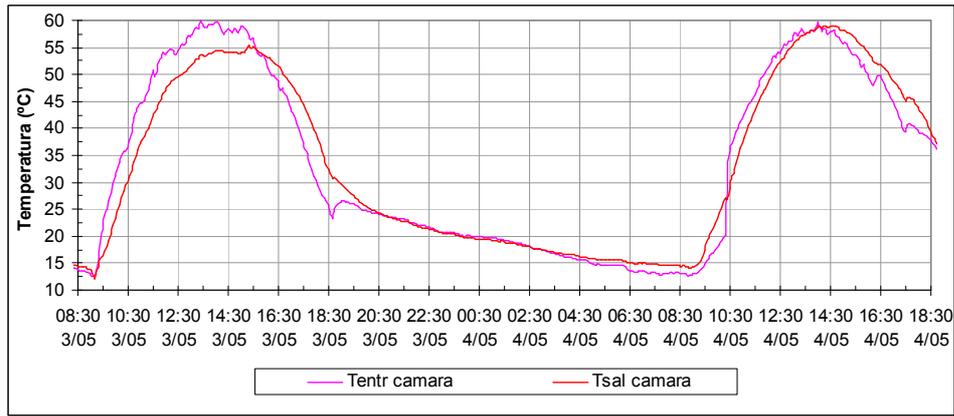


Figura 10: Temperatura de flujo de aire en la cámara de secado.

La Fig. 11 muestra las medidas de humedad relativa a la entrada y salida de la cámara de secado. Los valores a la salida se incrementan en 15% respecto a la entrada. Los bajos valores registrados a la salida, indican que existe la posibilidad de incrementar la carga de producto en cámara. Sin embargo, durante esta cosecha el secador funcionó con carga parcial de 3500 kg, por lo que los resultados a carga completa no son reportados. En estas condiciones la humedad relativa de salida durante la noche no paso del 50 % con temperatura interna de 15 °C, estando en esos momentos el ventilador apagado.

Las medidas de velocidad de flujo de aire a la entrada de la cámara se presentan en las Fig. 12. Los resultados muestran la existencia de una marcada asimetría en la distribución de flujo, con máximos del orden de 1,3 m/s en el extremo superior izquierdo, valor promedio de 0,712 m/s y mínimos de 0,2 m/s. Como consecuencia se presenta un secado desparejo en los dos primeros carros, situación que mejora para los carros posteriores al hacer los primeros de pantalla deflectora.

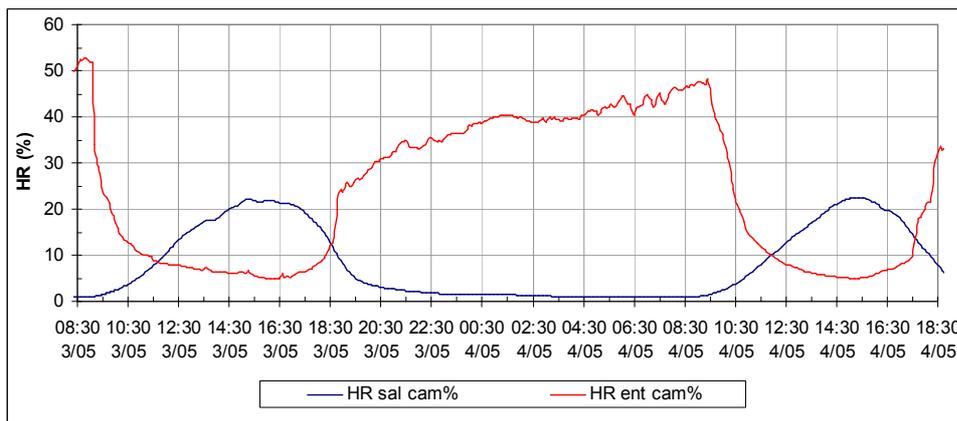
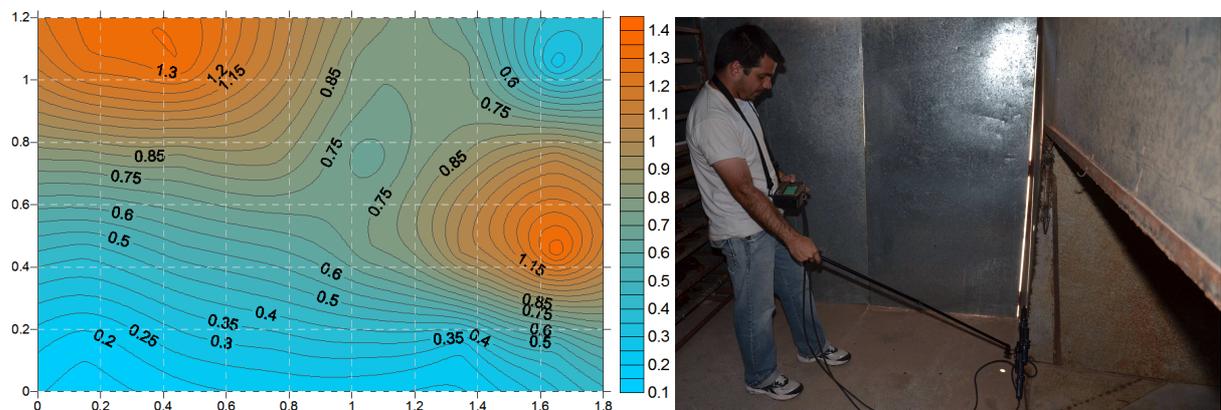


Figura 11: Humedad relativa ambiente en la entrada y salida de la cámara de secado.



Figuras 12-(A) Medidas del perfil de velocidad en la entrada de la cámara de secado, (B) foto del difusor.

En cuanto al tiempo y la calidad del producto final, se puede decir que la carga completa desde que entra a la cámara de presecado y sale del túnel de secado se ha reducido a unos tres días de sol, frente a las 3 semanas que toma el secado en suelo en similares condiciones ambientales. Como único pretratamiento el producto se ha lavado y se ha ingresado a la cámara de

secado en vaina entera, obteniendo un producto final limpio de muy buena calidad de color registrando en todas las muestras medidas valores superiores a los 220 grados astas. También cabe destacar que una vez seco se clasificó el pimiento en dos tipos de calidad, siendo la más baja de un porcentaje muy pequeño a la primera.

CONCLUSIONES

Se presentaron el diseño, construcción y ensayos de un sistema secador solar activo, con circulación de aire forzada, ubicado en la localidad salteña de San Carlos, Argentina. El sistema está compuesto por una cámara de presecado con ganancia directa de radiación solar y un túnel de secado de tipo indirecto, en serie con un sistema de calentamiento eléctrico de 24 kvatios y un banco de 32 colectores solares de aire. En el túnel de secado el producto se encuentra en 20 carros que permiten una carga máxima de 6000 kg de producto fresco. La cámara de presecado puede albergar 18 carros con una capacidad de carga total de 5400 kg. El producto permanece un par de días en la cámara de presecado y luego se termina de secar en el túnel donde recibe un mayor aporte de energía.

Los resultados obtenidos, indican que el sistema posee la energía suficiente para secar la carga total del túnel de secado en un día de sol de días soleados, con la posibilidad de aumentar la carga de producto a más de 6 t o incrementar el área de contacto introduciendo pimiento cortado. Algunos ensayos con este último mostraron pérdida de color o descoloración en los bordes por lo que se requiere de mayores ensayos para determinar la viabilidad de la propuesta.

Una de la hipótesis de trabajo más importante tiene que ver con la sustentabilidad económica del sistema propuesto. Para que esto sea posible, el sistema tiene que ser capaz de permitir el secado de otros productos a lo largo del año y asegurar la calidad y capacidad de secado como para permitir la obtención de un precio diferencial respecto a las técnicas de secado tradicionales. En este caso, el sistema propuesto permite un funcionamiento continuo y una mejora sustancial del tiempo de secado bajando el tiempo de aproximadamente 3 semana para el secado en suelo a 3 días totales.

REFERENCIAS

- Condorí M., Echazú R., Saravia L. (2006) "Secador Solar Industrial para la Quebrada de Humahuaca. Energías Renovables y Medio Ambiente", Vol.19, (1), p.p.25-31, ASADES, Argentina.
- Condorí, M. Durán G., Echazú R., (2007). Análisis del comportamiento de un secador solar industrial de hortalizas en el Norte de Argentina" Libro: Reunión Seminario Risspa - Santiago, Chile..
- Condorí M., Durán G., Vargas D., Echazú R. (2009). Secador solar híbrido. Primeros ensayos". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente.
- Condorí, M. Durán G., Echazú R., Díaz Russo, G. (2010). Secador Industrial Híbrido Solar – Biomasa Para La Producción Continua De Pimiento Deshidratado" Revista Energías Renovables y Medio Ambiente. 2º vol.
- Saravia L., Echazú R., Guerrero F., Gramajo C. (1983). Planta Piloto de Secado Solar de Pimiento: Construcción y Ensayo. Actas de la 8a. Reunión de Trabajo de Energía Solar, La Pampa, p.p. 1-7, Argentina.
- Banout, J., Ehl, P., Havlik, J., Lojka, B., Polesny, Z., Verner, V. (2011). Design and performance evaluation of a Double-pass solar drier for drying of red chilli (*Capsicum annum L.*). Solar Energy 85, 506-515.
- Hossaina, M.A., Woods, J.L., Balac, B.K., (2005). Optimisation of solar tunnel drier for drying of chilli without color loss. Renewable Energy 30, 729-742.
- Hossain, M.A., Bala, B.K., (2007). Drying of hot chilli using solar tunnel drier. Solar Energy 81, 85–92.

ABSTRACT

The construction and preliminary tests with a solar drying plant for paprika production is presented. The system was conformed for a tunnel that is opaque to solar radiation, a pre-drying chamber with direct gain and an auxiliary heating of 24 KW. The energy for the tunnel was supplied for a bank of 32 air solar collector. The tunnel had a maximum load of 6300 kg, while the pre-drying chamber 5670 kg. The operating tests were performed during the first year of use, with 3500 kg of red pepper in the tunnel. The results have shown an increase of 35 ° C between the inlet and outlet temperature of solar collectors and temperature of 55 ° C at the outlet of the drying tunnel with relative humidity of 20%. The system had enough power to pre-dry the load in a couple of sunny days and finished it in the drying tunnel on a sunny day.

Keywords: Solar drying, air solar collector, paprika.