

SECADOR SOLAR HÍBRIDO. PRIMEROS ENSAYOS

M. Condori, G. Durán, D. Vargas y R. Echazú
INENCO – Instituto UNSa. – CONICET
Universidad Nacional de Salta (UNSa)
Av. Bolivia 5150 – A4408FVY Salta, República Argentina
FAX 54 387 4255489 – e-mail: miguel.angel.condori@gmail.com

RESUMEN: Se presentan resultados preliminares correspondientes a la puesta en marcha y a los primeros ensayos de un secador solar tipo túnel de circulación forzada, que utiliza un quemador de leña como fuente de energía auxiliar. El equipo, ubicado en San Carlos, provincia de Salta, está destinado a la producción de pimiento seco para pimentón y las experiencias que se describen se realizaron con el objeto de poner a punto su funcionamiento. El sistema de secado fue ensayado durante un mes, realizándose ciclos completos de secado con energía solar y combinados con el quemador de biomasa. Durante los mismos se midieron las variables de interés en la operación del sistema.

Palabras Clave: secador solar, colector solar de aire, eficiencia energética, secador híbrido.

INTRODUCCIÓN

En el Noroeste Argentino, la mayor parte de la producción de pimiento para pimentón es secada al aire libre en canchas con lo que se obtiene un producto de baja calidad. Puesto que este cultivo es uno de los más difundidos en la zona, se ha buscado incorporar mayor tecnología en la cadena de producción para obtener mejores rendimientos y calidad del producto final, incluida la etapa de secado, de modo de mejorar el precio final del producto.

Entre los métodos propuestos para mejorar el proceso de secado, se destaca el uso de sistemas activos de aprovechamiento de energía solar térmica, que con costos moderados y tecnología accesible han demostrado su eficiencia. Debe mencionarse también que su aplicación no tiene consecuencias ambientales desfavorables.

El INENCO, Instituto de Investigación en Energías No Convencionales, dependiente de la Universidad Nacional de Salta, desde principio de los '80, trabaja en secado solar. Tal es el caso, de los secadores solares que se construyeron en Cachi, provincia de Salta y en Santa María, provincia de Catamarca (Saravia et al, 1983; Saravia et al, 1984). Más recientemente, por medio de PROSOL, una empresa de deshidratado solar y comercialización de verduras y hortalizas cultivadas, se han instalado sistemas de secado solar industrial en Huacalera, provincia de Jujuy, ADESO (2008) y se encuentran en construcción uno en San Carlos, provincia de Salta y otro en Villa de Las Rosas, provincia de Córdoba.

Sin embargo, para aplicaciones industriales se hace necesario asegurar las condiciones diarias de secado lo cual no es fácil de realizar con sistemas que aprovechan sólo la energía solar. Una posibilidad es la incorporación de un sistema de acumulación de calor para recuperarlo luego durante la noche y otra es el uso de una fuente auxiliar de energía alternativa a la solar.

En un trabajo anterior, (Condori et. al., 2008), se presentó el diseño y los detalles constructivos de un secador solar híbrido para dos toneladas de carga de producto fresco de pimiento para pimentón, con el que se reemplaza el secador con quemador de leña y lecho de piedra de 500 m², con el que la empresa ADITAL de Vargas y Asociados venía operando desde hace más de 10 años. El diseño realizado, mejoraba el sistema de colección de radiación solar, ya que reemplazaba un colector de lecho fijo de piedra sobre plano horizontal por un banco de colectores con giro sobre su eje longitudinal, que puede realizar un seguimiento diario de la altitud del sol, aumentando la intensidad de radiación que incide sobre el área de colectores. Este hecho sumado al uso de mejores materiales, supone ventajas e incrementos en la eficiencia instantánea de los colectores de acuerdo a las simulaciones de diseño.

También, con la sustitución de la cámara de secado por una de chapa mejor aislada térmicamente y las mejoras constructivas que se introdujeron en el horno de quemado y en el intercambiador de calor, para ser utilizado como fuente auxiliar, se espera disminuir los metros cúbicos de leña utilizados habitualmente. En este trabajo se describen y se exponen resultados preliminares obtenidos de las experiencias realizadas con el secador con carga.

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

En esta sección se realiza sólo una breve descripción del secador solar ensayado, ya que una descripción detallada se puede encontrar en un trabajo anterior (Condori et. al., 2008). Se hace énfasis en los avances constructivos y en el sistema auxiliar de calor que se incorporó en la etapa final de la construcción.

El campo de colectores solares tiene una superficie colectora de aproximadamente 200 m² y la cámara de secado un volumen de 50 m³. El aire circula en un solo paso, impulsado por un ventilador tangencial de 3 k vatios (4 HP). El quemador de leña conjuntamente con el intercambiador de calor se instaló en serie entre el campo de colectores y la cámara.

En la figura 1 se muestra en primer plano el campo de colectores con el ducto de recolección del aire caliente y al fondo a la derecha la cámara de secado. El sistema de calentamiento auxiliar se coloca en serie entre los dos. La fotografía corresponde a una etapa constructiva preliminar del sistema de energía auxiliar, por lo que se observa intercalado en la cañería de acceso al túnel, el intercambiador de calor del tipo bancos de tubos. La figura 4, contiene una foto en la que se puede observar terminada la construcción del horno en ladrillos recubriendo el intercambiador.



Figura 1: Campo de colectores, ductos, intercambiador de calor y cámara de secado

En la figura 2, se observa el ventilador tangencial conectado al caño maestro del campo de colectores, entrada del ventilador, y a la salida del ventilador la conexión al intercambiador de calor mediante un caño rectangular. En la fotografía no se muestra la aislación térmica, ya que la misma fue tomada con anterioridad a la colocación de la misma.

La figura 3, muestra la parte inferior de los colectores y el sistema de rotación sobre el eje longitudinal de los mismos que permite orientarlos, con cierta facilidad, respecto a la altitud del sol.



Figura 2: Ventilador y acople del caño maestro



Figura 3: Detalle del montaje basculante de los colectores

El quemador de leña se muestra en la figura 4. Este tiene una boca de acceso de 0,6 m x 0,6 m y termina en una chimenea de 0,9 m x 0,3 m de área interna y 3 m de alto. Cuenta con una exclusiva tipo cinta para regular el paso del humo y por ende, en parte, la combustión del horno. Por encima de la cámara de combustión se construyó un intercambiador de calor, del tipo banco de tubos alternados, con caño de hierro redondo de 0,10 m de diámetro con una configuración de 4 x 3 caños. Por el interior de los caños circula el aire proveniente de los colectores hacia la cámara de secado. Este tipo de conexión en línea permite que el quemador funcione como complemento de la energía producida por vía solar.

EL SISTEMA DE MEDICIÓN

Las experiencias de medición se realizaron durante el mes de marzo de 2009, que corresponde al último periodo de la cosecha del pimiento para pimentón. Durante estas experiencias se midió en forma automática temperatura y humedad del aire tanto en el ambiente como en distintos puntos del sistema de secado. También se recogieron en forma automatizada los valores de radiación solar sobre plano horizontal y sobre plano de un colector y la velocidad de viento. En forma manual se midió la velocidad del flujo de aire en el interior de la cámara de secado y a la entrada del ventilador. También se siguió con una balanza, en forma manual, la pérdida de peso de una muestra del producto a secar. Aquí se muestran los resultados de la medición de un día en particular que coincide con uno en que se midieron todas las variables descriptas y el secador trabajó a plena carga.



Figura 4: Quemador de leña con banco de tubos incorporado

El Equipo de Medición

Se midió la evolución de las temperaturas del sistema, durante un ciclo de secado con termocuplas tipo K conectadas a un Data Logger de 16 bits marca Campbell modelo CR 23 x programado para tomar datos cada 300 segundos.

En la figura 5, se muestra la ubicación de los sensores sobre el plano del colector. Los números 1 al 7 representan los sensores de temperatura, los números 8 y 9 las sondas de humedad de la cámara y los números del 10 al 13, a la radiación solar, velocidad de viento, temperatura y humedad ambiente.

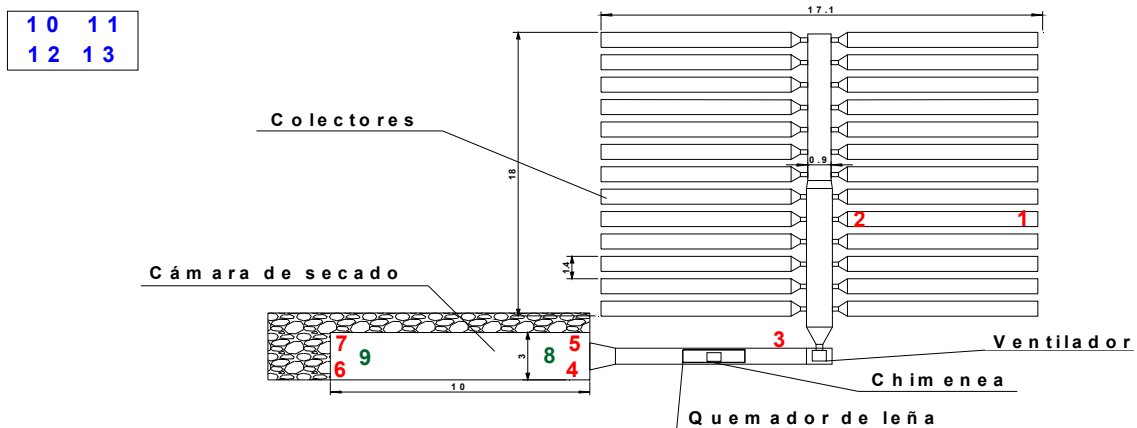


Figura 5: Ubicación de los sensores

La radiación solar global se midió sobre el plano horizontal y sobre el plano de los colectores, con dos pirheliómetros Kipp Zonnen CM 3 conectados al Data Logger Campbell.

La velocidad de viento se midió con un anemómetro del tipo cazoleta MET ONE 14 A. Para medir velocidad de flujo de aire dentro de la cámara y en el ducto de salida del ventilador 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} . La técnica utilizada para medir el flujo de aire fue tomar en distintos puntos de una sección transversal y promediar el valor, repitiendo las medidas varias veces.

Para las medidas de humedad relativa de la cámara se utilizaron dos sensores HMP45A de Vaisala conectadas al Data Logger.

Además se contó con otro Data Logger, de 8 entradas analógicas y 13 bits de resolución, el modelo CR 1000 de Campbell con el que se midieron las variables climáticas correspondientes a las condiciones ambientales a una altura de 3 m del piso de colectores. Esto es radiación solar total, humedad relativa, temperatura, velocidad y dirección de viento.

Las temperaturas relacionadas con el trabajo del horno quemador de biomasa, generalmente mayores a 500 °C, se midieron con una pistola termómetro infrarrojo Infra Pro de Oklon y se tomaron imágenes termográficas con una cámara infrarroja HORIBA que tiene rango de medición de temperatura hasta 1000 °C y utiliza un sistema detector conformado por una matriz de 64 sensores de radiación infrarroja.

RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se muestran los datos recogidos durante el día 21 de marzo. Si bien el secador permite el funcionamiento continuo, este día tiene la particularidad de corresponder al primer día de carga de una tanda de secado y el funcionamiento de los ventiladores comenzó después del medio día solar, tiempo que le requirió al productor preparar el producto y cargar la cámara de secado con las bandejas.

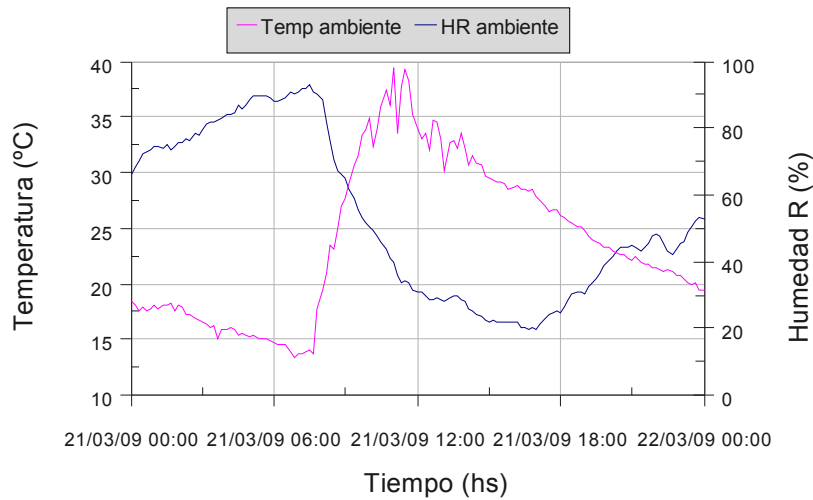


Figura 6: Evolución de la temperatura y humedad del aire ambiente.

En la figura 6, se muestran las mediciones correspondientes a la temperatura y humedad relativa ambiente del día de medición y el consecutivo. Si bien el día tiene problemas de nubosidad hacia la tarde, como se observa en la figura 7, se confirman las condiciones excepcionales del clima del lugar para secar, y que es una característica de los Valles Calchaquí. La medición corresponde al primer día de otoño y se obtienen temperaturas máximas cercanas a los 38 °C, el promedio mensual está alrededor de los 20 °C, lo que indica la gran amplitud térmica de la zona. Las humedades relativas registradas están entre el 20 % y el 40 % prácticamente para todo el día solar.

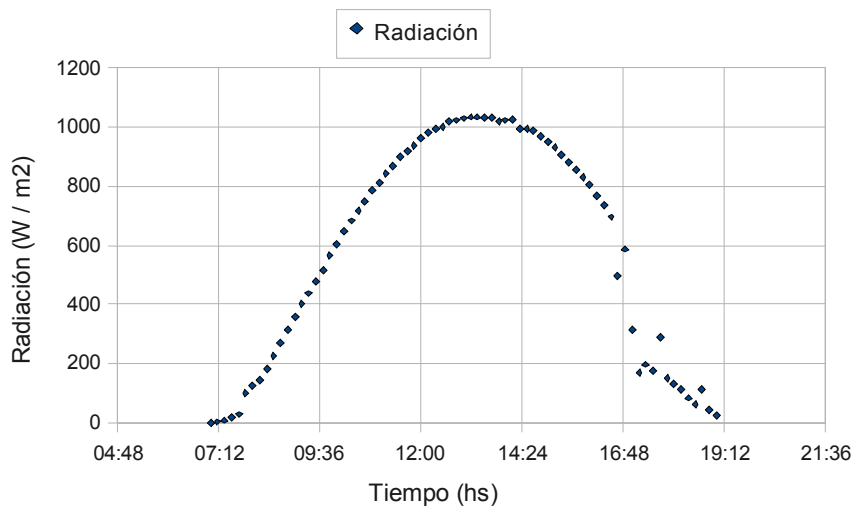


Figura 7: Evolución de la radiación solar el 21 de marzo en el plano de los colectores

La figura 7 muestra los valores de radiación solar medidos sobre el plano del colector para ese día. Se observa que al medio día solar se obtienen una radiación instantánea de aproximadamente 1000 Wm⁻², siendo de 21 MJm⁻² la radiación solar media sobre plano horizontal de acuerdo a datos estadísticos. Si bien hay problemas de nubosidad por la tarde, la heliofania relativa media es del 62 % para ese mes, se observa que son aproximadamente 12 las horas aprovechables de sol.

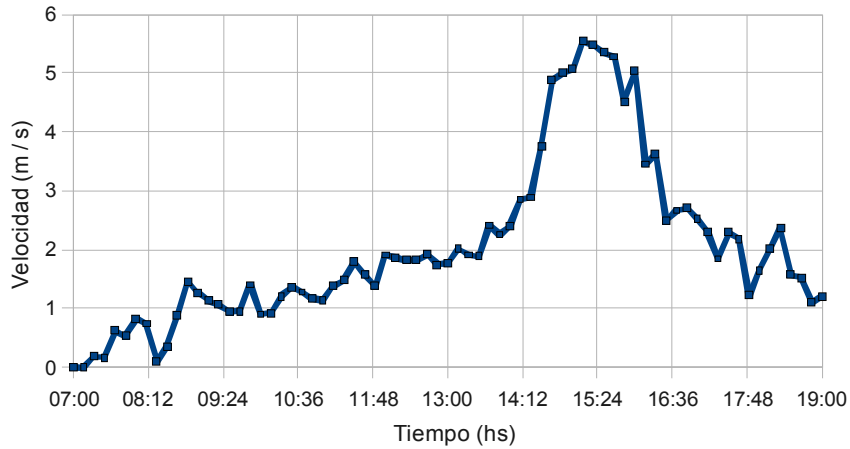


Figura 8: Velocidad del viento.

La figura 8 muestra la velocidad de viento para el mismo día. La dirección predominante es noreste-suroeste y se observan intensidades entre 5 y $5,5 \text{ ms}^{-1}$, entre las 15 y las 16 hrs, siendo la media aproximadamente de 2 ms^{-1} .

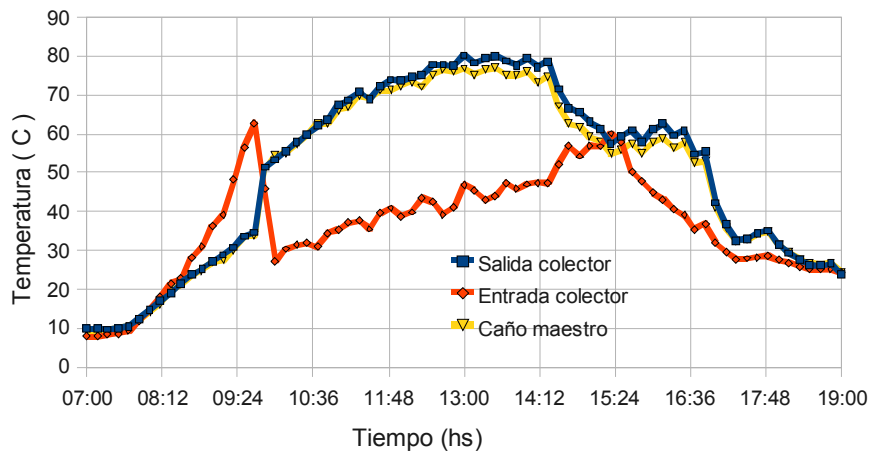


Figura 9: Evolución de la temperatura del aire en un colector

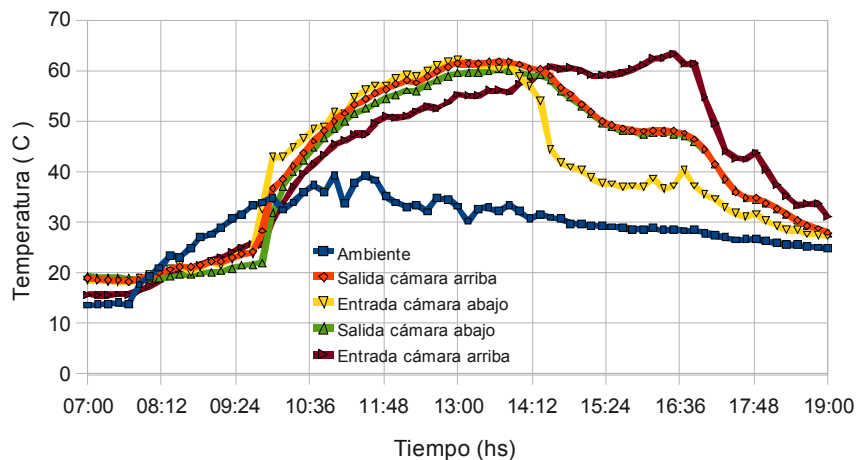


Figura 10: Evolución de la temperatura del aire en la cámara de secado

La figura 9 muestra la temperatura de entrada, salida de los colectores y la temperatura del caño maestro después de haber recogido el aporte de todos los colectores. Si bien, la temperatura de los colectores está cercana a los $80 \text{ }^\circ\text{C}$ al medio día solar, en ese instante no está funcionando el ventilador el cual se enciende a las 14 hrs aproximadamente, ubicándose entonces la temperatura alrededor de los $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Sin embargo, por simetría del día, se puede decir que los colectores

proporcionan temperaturas por encima de los 40 °C por unas 8 horas de funcionamiento, de las aproximadamente 12 horas de radiación solar. A pesar de que el caño maestro no se encuentra aislado la disminución de temperatura es sólo de unos 3 °C aproximadamente, posiblemente debido a que también está recibiendo aporte de energía solar en su superficie.

La figura 10 muestra el comportamiento de las temperaturas medidas en la cámara de secado. La temperatura de entrada se incrementa en forma continua de 20 °C hasta 62 °C, a las 16 hrs, indicando la existencia de una circulación natural de aire desde el banco de colectores a la cámara, ya que como se dijo el ventilador no está encendido. También se puede decir que el aire en la cámara se encuentra entre los 40 °C y 60 °C por 8 horas de funcionamiento. Estas temperaturas son adecuadas para evitar la formación de aflatoxinas asociadas con hongos en el pimiento fresco y los tiempos también son los adecuados para reducir su contenido de humedad por debajo del 50 %. De las curvas de temperatura que corresponden a la entrada de la cámara, la de la parte baja se ha tomado próxima a las bandejas con producto y la otra, bien sobre la boca de entrada de aire. Se observan disminución de temperatura de 60 a 40 °C, siendo un indicativo del enfriamiento evaporativo que se produce. El Salto de temperatura que se obtiene respecto a la temperatura ambiente es de aproximadamente 30 °C.

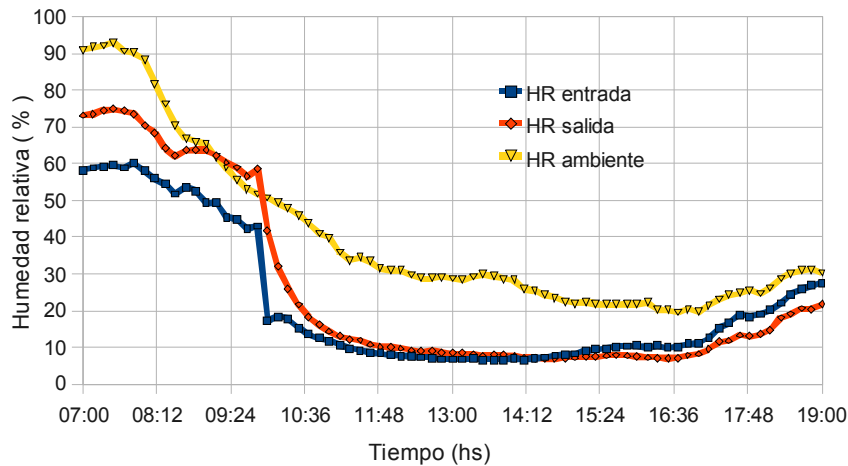


Figura 11: Humedad relativa ambiente y de la cámara de secado

La figura 11 muestra los valores medidos de humedad relativa para ese día. Las curvas corresponden a la humedad ambiente y a dos tomadas en el interior de la cámara a la entrada y a la salida. Se observa que cuando se enciende el ventilador los valores de humedad relativa en la cámara bajan al 10 %, pero no se observa un aumento apreciable debido a la incorporación de masa de agua. Esto está indicando un aprovechamiento deficitario del potencial de secado del aire y la posibilidad de aumentar la carga de la cámara de secado.

En la figura 12 se muestran los perfiles de temperatura en 2D obtenidos a partir de la medición manual para distintos puntos de la sección transversal de la cámara mientras la cámara se encontraba cargada con producto. El eje de las ordenadas corresponde al alto de la cámara, 1,80 m y el eje de las abscisas al ancho de la misma, 3 m. Un perfil corresponde a la entrada de la cámara de secado, ingreso del aire caliente de los colectores, y el otro a la salida de la misma. Si bien las medidas no son simultáneas, se considera que las condiciones de funcionamiento no variaron demasiado entre toma y toma.

A la entrada de la cámara, izquierda, se observa cierta asimetría de la distribución del aire de entrada siendo necesaria la colocación de deflectores para uniformizar la misma y evitar el secado desparejo de los primeros carros. En cambio a la salida de la cámara, derecha, la distribución de temperatura no tiene diferencias mayores a los 2 °C, lo que sugiere que los carros con producto actúan como mallas produciendo un flujo uniformemente mezclado.

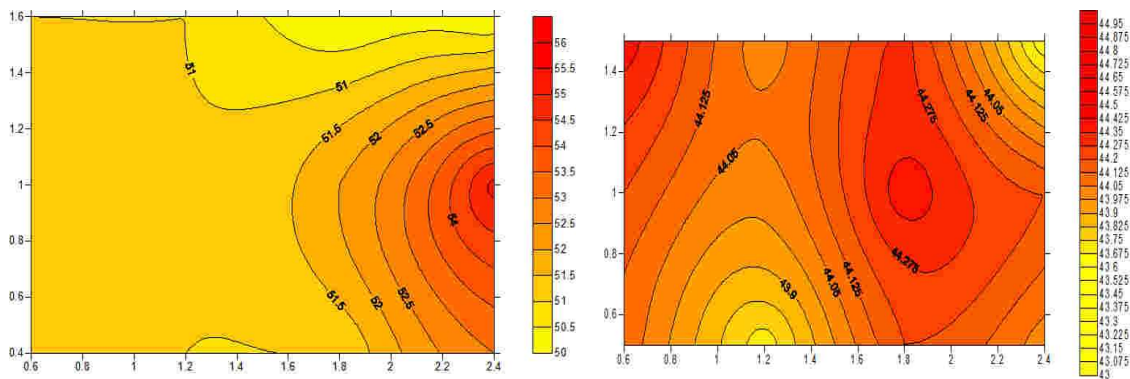


Figura 12: Perfiles de temperatura 2D a la entrada (izquierda) y salida de la cámara (derecha)

La figura 13 muestra los perfiles correspondientes a la velocidad del aire. En el caso de la entrada del aire la asimetría se produce en las partes bajas lo que indica una menor circulación de aire por esas zonas, el rango de variación de velocidad está entre 1,25 y 0,2 m^{-1} . En el caso de la salida de la cámara se sigue observando la mayor uniformidad, el rango de variación de la velocidad está entre 0,175 y 0,06 ms^{-1} , debido como se dijo, al efecto del paso del aire a través de los carros.

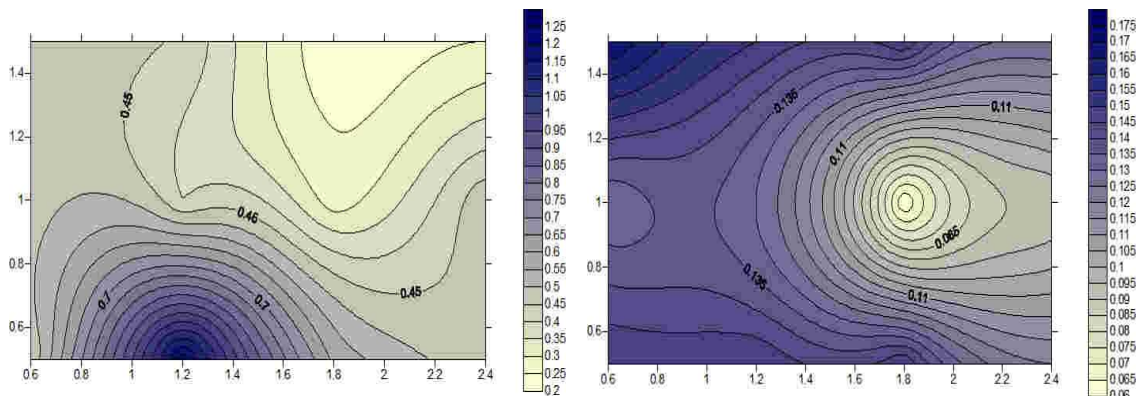


Figura 13: Perfiles de velocidad del aire en 2D a la entrada (izquierda) y salida de la cámara (derecha)

En la figura 14 se muestra la curva de pérdida de peso, izquierda, obtenida para el pimentón de la fotografía, derecha. Este seguimiento fue realizado por el mismo productor con una balanza electrónica en forma manual. El producto fue considerado seco según la experiencia y el criterio del productor. Se alcanzó la condición de seco en aproximadamente 2,5 días de sol (30 horas). Debe considerarse que el proceso de desecado se comenzó después del medio día solar.

Se enviaron muestras del pimentón seco en vaina al laboratorio de Química Orgánica, Facultad de Ciencias Exactas, de la Universidad Nacional de Salta, para la determinación del color mediante el método ASTA 20.1. Los resultados informados fueron de 180 unidades ASTA. Cabe destacar que según el código alimentario argentino clasifica como pimentón de calidad Extra, al que tiene un valor mínimo de 120. Si bien no es el único requisito que se requiere para determinar la calidad, es conocido que el valor del pimentón está determinado en el mercado fundamentalmente por su color.

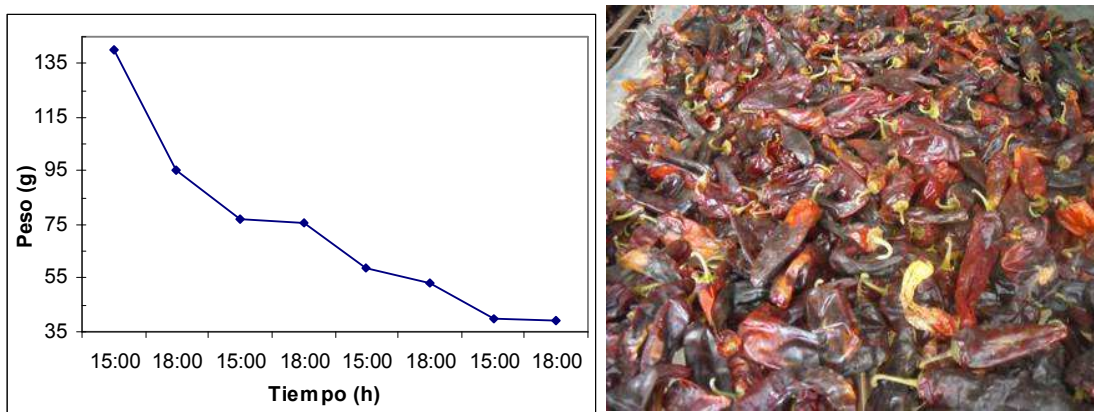


Figura 14: Curva de secado (izquierda) y producto seco (derecha)

Las medidas que se ha descrito hasta aquí corresponden al sistema de secado funcionando solo con energía solar. También en otros días, de acuerdo a las necesidades del productor, se hizo funcionar el secador con el horno de quemado de leña después de las 19 hrs y hasta las 21 hrs y se lo encendió desde las 7 hrs hasta las 9 hrs del día siguiente. Estas experiencias no fueron convenientemente registradas, ya que la construcción del quemador se completó con posterioridad a la campaña de medida que aquí se muestra. Sin embargo de acuerdo a la información suministrada por el productor los tiempos de secado se reducen aproximadamente a la mitad respecto del secado únicamente solar. Además, el consumo de leña que era de alrededor de 1,5 m^3 de chañar y tala, por día, se reduce en un tercio aproximadamente.

Se realizó una medida puntual, con la cámara de secado sin carga, para determinar algunos parámetros de funcionamiento del quemador y del intercambiador. Durante este ensayo se quemó hasta que se consumió completamente una pequeña cantidad de leña, después de las 19 hrs, con el ventilador funcionando. En la figura 15 se muestra una termografía del horno de quemado durante la experiencia, donde se observa el valor de 523 $^{\circ}C$ de temperatura. Se quemaron 2 kg de leña, ramas y desechos, obteniendo valores de temperatura del horno alrededor de los 550 $^{\circ}C$, una temperatura de salida de humo por chimenea entre 70 y 80 $^{\circ}C$. Por otra parte el aire de entrada a los intercambiadores se eleva de 30 $^{\circ}C$ a 50 $^{\circ}C$.

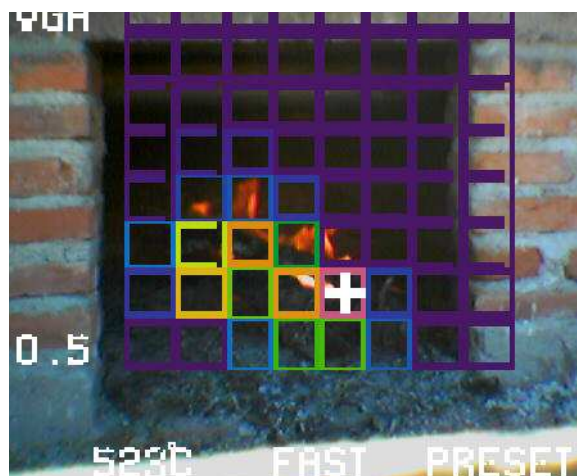


Figura 15: Termografía del horno

CONCLUSIONES

Se han realizado mediciones sistemáticas de las un sistema de secado solar del tipo industrial que se utiliza para el secado de pimienta para pimentón. Si bien los resultados son preliminares en el sentido que se necesitan periodos más largos de mediciones durante varias campañas de secado, no obstante se pueden extraer las siguientes conclusiones.

El sistema ha mostrado ser capaz de producir un producto limpio de muy buena calidad. Medidas de color en grados ASTA del producto seco han arrojado valores 50 % mayores a los requeridos para la calidad extra.

Si bien, de acuerdo al diseño inicial la carga actual de la cámara de secado es de un poco más de 2 toneladas, los valores bajos de humedad relativa y las altas temperaturas que todavía se obtienen a la salida de la cámara, figuras 10 y 11, indican que existe potencial de secado del aire no utilizado convenientemente, por lo que se puede aumentar la capacidad de carga de la cámara conservando el área de captación solar. En este sentido ya se trabaja en la ampliación de la misma.

De acuerdo a los perfiles de temperatura y velocidad de aire tomados al comienzo de la cámara de secado, figuras 12 y 13 izquierda, Se hace necesario la incorporación de deflectores del aire a la entrada de la cámara que ayuden a uniformizar tanto la temperatura como la distribución del aire que incide sobre los primeros carros, y uniformizar el secado entre bandejas. Sin embargo, se considera que el agregado de más filas de carros, con la geometría y separación actual, tiene el efecto de uniformizar la distribución del aire hacia los carros de atrás.

Los registros de temperatura que se pueden obtener en la cámara durante el primer día de secado, valores superiores a 40 °C durante 8 horas, son adecuados para asegurar la reducción del 50% de agua contenida en el producto, figura 14. En el caso del sistema funcionando solo con energía solar el tiempo de secado requerido para la extracción del primer carro fue alrededor de los dos días y medio de sol. De las medidas puntuales realizadas con el horno de quemado los resultados indican un buen funcionamiento del intercambiador de calor ya que reduce la temperatura de combustión a 80 °C aproximadamente.

REFERENCIAS

- ADESO, (2008) www.adeso.org.ar
- Condori 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.
- Condori M., Duran G., Echazú R., Saravia L. (2007). Ensayo y Medición de un Secador Industrial tipo Túnel en el Norte Argentino. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 11, (2), pp. 37-44, ASADES, Argentina.
- Condori M., Echazú R., Duran G., Saravia L. (2008) "Secador Solar Híbrido. Diseño y Construcción" Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 12, p.p. 2-37
- 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.
- Saravia L., Passamai V., Echazú R. (1984), Secado Solar de Pimiento: Resultados Experimentales y su Simulación. Actas de la 9a. Reunión de Trabajo de Energía Solar, San Juan, p.p. 1-7, Argentina.

ABSTRACT

Preliminary results corresponding to the start and the first tests of a solar dryer type tunnel of forced airflow are presented. It uses a burner of fuel wood as auxiliary energy source. This equipment located in San Carlos, Salta, is destined for the production of dry pepper for paprika and the experiences described were realized to complete the system operation. The drying system was tried during a month, in full cycles of drying, with solar energy and combined with the biomass burned. In the same the variables of interest for the system operation were measured.

Keywords: solar dryer, air solar collector, energetic efficient, hybrid dryer.