

SECADOR SOLAR HÍBRIDO PARA LA PRODUCCIÓN CONTINUA A ESCALA INDUSTRIAL DE PIMIENTO PARA PIMENTÓN

Gonzalo José Durán - gduran@inenco.net
Miguel Angel Condori – miguel.angel.condori@gmail.com
Ricardo Echazú – ricardo.echazú@gmail.com
Gabriel Díaz Russo

INENCO, Instituto de Investigación en Energía No Convencional. Universidad Nacional de Salta, U.N.Sa

2. Conversión Térmica de la Energía Solar

Resumen. Se presenta el diseño, detalles constructivos, y ensayos realizados en un secador solar de escala industrial. El equipo, ubicado en San Carlos, provincia de Salta, Argentina, está destinado a la producción de pimiento seco para pimentón. Cuenta con circulación forzada de aire y calentamiento auxiliar mediante un quemador de leña. Los aspectos constructivos y de diseño representan una mejora tecnológica respecto de un secador solar con absorbedor fijo de lecho de piedras anteriormente desarrollado. Se introducen mejoras en el sistema de distribución de aire requiriéndose un ventilador centrífugo de baja potencia. Las mejoras en la eficiencia térmica del sistema llevan a una mayor velocidad de secado durante el día con la consecuente disminución del uso de energía convencional.

El sistema de secado fue ensayado durante el mes de marzo de 2009, de forma completamente solar, y durante los meses de abril a junio de 2010 utilizando de forma conjunta el quemador de leña y el banco de colectores solares de aire. Durante los ensayos se midieron las variables de interés en la operación del sistema, que incluyen temperatura ambiente, temperatura de flujo de aire, humedad relativa ambiente y radiación solar sobre plano horizontal. Además se presenta un estudio de factibilidad realizado mediante el software RETSCREEN, en el que se plantea la sustitución parcial del sistema tradicional de quemado de leña por el sistema de calentamiento de aire mediante colectores solares

Palabras-clave: secador solar, colector solar de aire, eficiencia energética, sistema híbrido, quemador de leña

1. INTRODUCCIÓN

La producción de pimiento para pimentón es uno de las actividades productivas más difundidas en la zona del Norte Argentino. Casi toda la producción nacional de pimiento para pimentón está concentrada en la zona: en el Valle de Santa María, en la provincia de Catamarca y en los valles Calchaquí y Lerma, en la provincia de Salta, especialmente en las localidades de Cachi, Molinos, Cafayate, San Carlos y Angastaco. En los últimos años también se incorporaron productores de Guachipas, Valle de Lerma, provincia de Salta.

Sin embargo el cultivo de pimiento para pimentón es todavía una actividad económica de subsistencia realizada por pequeños minifundistas sin recursos tecnológicos, por lo que la mayor parte de la producción es secada al aire libre en canchas de tierra, con lo que se obtiene un producto de baja calidad.

El INENCO, Instituto de Investigación en Energías No Convencionales, trabaja en secado solar desde principio de los '80. Mediante diversos proyectos, 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. Pueden mencionarse los antecedentes presentes 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, (Condori, 2006) y en San Carlos, provincia de Salta (ADESO, 2009), además de una planta de secado de aromáticas, en Villa de Las Rosas, provincia de Córdoba.

El uso de sistemas de aprovechamiento de energía solar térmica, con costos moderados de construcción, y tecnología accesible demostró su eficiencia en secado del tipo doméstico o de pequeña escala de producción. 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 estrategia para afrontar esta desventaja es la incorporación de un sistema de acumulación de calor durante el día, para ser entregado en horas de la noche y otra es el uso de una fuente auxiliar de energía alternativa a la solar.

Este sistema solar reemplaza al secador con quemador de leña y lecho fijo de piedra de 50 m de largo y 500 m² de área, que venía operando desde hace más de 10 años la empresa ADITAL, dedicada a la producción de pimiento para pimentón, en la localidad de San Carlos, Salta. El nuevo diseño utiliza un banco de paneles calentadores de aire, que pueden girar completamente alrededor de un eje longitudinal, realizando el seguimiento de la altitud del sol de acuerdo a la época del año. Además, el uso de mejor aislación produjo un incremento en la eficiencia instantánea de los colectores respecto al colector plano de lecho fijo, con la consecuente reducción del área de colección solar.

El diseño de la nueva cámara de secado, y las mejoras constructivas introducidas en el horno de quemado y en el intercambiador de calor permitieron disminuir el consumo de leña utilizado habitualmente.

En este trabajo se presenta el diseño, detalles constructivos y ensayos realizados en un secador solar inicialmente diseñado para dos toneladas de carga de producto fresco. En estos ensayos se describe el funcionamiento del sistema mediante calentamiento solar, junto al aporte auxiliar de energía por quema de biomasa. Además se presenta un análisis

del secador híbrido, mediante RETSCREEN, software de análisis de factibilidad de proyectos de energía limpia.

2. SECADOR DE PIMIENTO MEJORADO. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

En los últimos años se trabajó con nuevos diseños de calentadores solares de aire de alta eficiencia para secadores solares industriales. En particular se realizó el diseño y la construcción de dos secadores solares activos, de media tonelada de carga cada uno, ubicados en la comunidad de Huacalera (Lat.: 23° 26" S y long: 65° 21" O), Quebrada de Humahuaca, Jujuy, Argentina; donde funciona una planta de deshidratado de hortalizas.

En estos equipos el calentamiento del aire se realiza sólo con energía solar provista por el banco de colectores de aire, siendo la cámara de secado, opaca a la radiación solar incidente (Condorí, 2006, 2007).

Sobre la base de la experiencia con estos trabajos y la implementación de un programa de simulación del sistema, se diseñó y se construyó un secador solar activo híbrido para el secado de pimiento para pimentón, de dos toneladas de capacidad de carga, donde el calentamiento de aire se puede realizar tanto por vía solar como por medio de un quemador de biomasa.

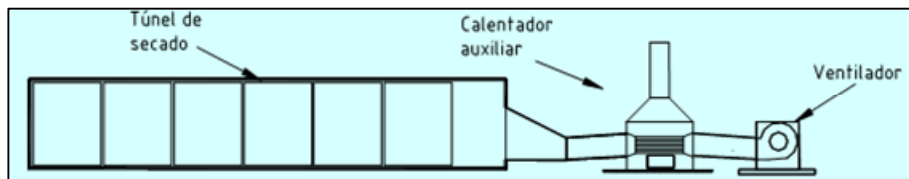


Figura 1: Vista de planta del Secador Solar Híbrido de pimiento para pimentón de San Carlos, Salta. Lateral sur

El movimiento de aire se realiza mediante un ventilador centrífugo eléctrico. Este ingresa un determinado flujo de aire ambiente a cada colector, aumentando su temperatura. El aire caliente que sale de los colectores ingresa al caño maestro, obteniéndose la temperatura adecuada para el proceso de secado en la cámara. La velocidad del flujo de aire en el caño maestro no es muy elevada por lo que se puede producir sedimentación por gravedad de cualquier resto de polvo que pase la primera barrera, ayudando así a la limpieza del aire que ingresa a la cámara.

El aire caliente que sale del caño maestro pasa por el ventilador hacia la cámara de secado. En el interior se encontrará con el producto a deshidratar dispuesto en bandejas. Finalmente, el aire húmedo sale de la cámara de secado por dos ventanas ubicadas en la puerta de ingreso, desde donde es desechando a la atmósfera.

El caño maestro de colección se une al ventilador mediante un acople metálico que pasa de cuadrado a redondo. El ventilador es centrífugo tangencial, de 3kW (4 HP), con acople a transmisión. Se conecta la salida del ventilador a un intercambiador de calor y la salida de este a una conexión tipo difusor. Este difusor se conecta a su vez al túnel de secado y permitirá que el aire que ingresa a la cámara de secado incida con mayor uniformidad sobre los carros con producto, a fin de lograr un secado parejo entre las bandejas.

Los colectores y el caño maestro trabajan en depresión, mientras que la cámara de secado lo hace en sobre presión. El aire caliente entra por un extremo de la cámara de secado y lo recorre hacia el otro pasando entre las bandejas con producto, colocadas sobre carros. El movimiento de los carros es a contracorriente del aire lo que produce un gradiente de secado en la dirección del flujo. Así, el funcionamiento en un día normal de trabajo consiste en sacar por la puerta lateral de la cámara, próxima al ingreso del aire caliente, los carros con producto seco, mientras se introducen por la puerta principal los carros con producto fresco.



Figura 2: Fotografía del secador. Vista lateral este - oeste, con colectores dirigidos al norte.

El banco de colectores trabaja en serie con un quemador de leña, regulando el funcionamiento día-noche. Durante

un día de buena radiación sólo se implementa el funcionamiento del banco de colectores. Durante la noche o en días de escasa radiación, cuando se necesita elevar la temperatura de salida de los colectores, se utiliza el quemador de leña.

La superficie total ocupada por el secador es de aproximadamente 345 m², de los cuales el banco de colectores y el caño maestro utilizan 306 m². De estos, 195 m² los ocupan los colectores, mientras que el resto incluye las conexiones y el área de paso. A la cámara de secado y al quemador de biomasa les corresponden los 39 m² restantes.

2.1 Banco de Colectores

El número total de colectores es de 26, distribuidos en dos grupos de 13 que se colocan a ambos lados del caño maestro. La separación de eje a eje entre colectores, que se obtuvo por el estudio de sombras, es de 1,4 m, quedando casi 0,40 m entre colectores para permitir la circulación, evitar el sombreado entre ellos y para evacuar el agua de lluvia.

Los colectores son cajas de chapa galvanizada de 0,94 m de ancho, 7,5 m de largo y 0,1 m de alto. De acuerdo a ensayos con un prototipo construido, en condiciones óptimas circula por cada colector un caudal de aire de 600 m³hr⁻¹ con una velocidad de 1,8 ms⁻¹. Simulaciones realizadas, validadas con la experiencia, indican que con este flujo el colector opera con una eficiencia aproximada del 50 % y temperatura de salida de 50 °C con una radiación solar media diaria mensual de 500 Wm⁻².

Para mejorar la incidencia de radiación se incorporó un sistema de seguimiento diario de la altura solar que permite que los colectores sean rebatibles. Así, el ángulo de la pendiente del colector con la horizontal puede variarse con la altitud del sol a lo largo del día para mejorar la eficiencia de captación solar (ver Fig 4).

2.2 Caño Maestro

El extremo de cada colector se une al caño maestro mediante una campana que reduce las pérdidas de carga, permitiendo el uso de ventiladores de menor potencia. En el extremo redondo de la campana de reducción se coloca una llave tipo mariposa para controlar el flujo de aire. Esta llave permitirá que cada colector trabaje con un flujo de aire adecuado a fin de mantener la eficiencia del sistema.

El caño maestro de 18 m de largo, está compuesto por dos tramos de secciones de 0,90 m por 1 m y 0,30 m por 0,5 m. El aumento de sección permite equilibrar la presión por la suma de flujos de cada colector, evitando así un aumento brusco en la velocidad del aire y las pérdidas de carga asociadas. La última sección del caño maestro se une al ventilador mediante un acople de sección 1 m por 0,50 de lado, a una circular de 0,25 m de diámetro que coincide con la entrada del ventilador. En la Fig. 3 se observa el ventilador tangencial conectado al caño maestro y a la salida del ventilador. No se muestra la aislación térmica, ya que la misma fue tomada con anterioridad a su colocación.



Figura 3,4: Ventilador y acople. Sistema de rotación de los colectores, campana de reducción y acople al caño maestro.

2.3 Quemador de Leña



Figura 5: Detalle del intercambiador de calor y banco de colectores.

El quemador de leña 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 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.

La Fig. 5 muestra una fotografía de la etapa de construcción del sistema de calentamiento auxiliar donde se aprecia la disposición del banco de colectores y el intercambiador de calor respecto a la cámara de secado.

2.4 Cámara de Secado

El aire caliente ingresará a la cámara de secado atravesando un difusor. La entrada del difusor es una sección rectangular de igual sección que la boca de salida del banco de tubos, terminando en una sección de 2 m².

El túnel de secado tiene por medidas internas: 1,85 m de alto, 10 m de largo y 3 m de ancho. La estructura del túnel está construida en caño de 40 mm de lado en los verticales y de 40 mm por 20 mm en los horizontales, fijándose al piso mediante tornillos tirafondos. El piso tiene aislamiento térmico con placas de poliestireno de 5 cm de espesor, por encima de éstas se coloca malla sima y se construye una carpeta de concreto reforzado alisado. Se asegura un buen cierre entre la estructura y el piso colocando burletes de goma.

El interior del secador está revestido con chapa galvanizada lisa en las paredes y con chapa galvanizada ondulada en el techo. Todas las uniones entre chapas están selladas y unidas a la estructura con remaches. El exterior está revestido con chapas galvanizadas onduladas y sujetas a la estructura con tornillos. Entre el revestimiento interior y exterior se coloca aislamiento térmico en lana de vidrio de 5 cm con barrera para la humedad en papel plastificado.

La estructura considera dos puertas de acceso y una lateral de salida para los carros. Las puertas de acceso consisten en dos hojas de 1,50 m por 1,85 m cada una, con una ventana de 0,5 m² para la salida del aire, cubierta con un filtro sintético que evita la entrada de insectos y de polvo. La salida de los carros se hace por la puerta lateral del túnel.

A uno de los lados del túnel de secado, que coincide con la puerta lateral de descarga, se construye un piso de cemento de 1,2 m de ancho, para permitir la circulación de los carritos.

En el interior de la cámara se ubican 12 carros distribuidos en 2 filas, que transportan 15 bandejas de 1,5 m² de área cada una. El carro es una estructura metálica con ruedas, de altura total 1,80 m incluidas las ruedas. La construcción de los carros se realiza con caño estructural y hierro ángulo, y se colocan las bandejas con 10 cm de separación entre sí. La separación entre las dos filas de carros ellos y entre estos y las paredes de la cámara es de 5 cm.



Figura 6: Cámara de secado.

Las bandejas consisten de un marco de estructura metálica con una base de malla plástica tipo media sombra para permitir la circulación del aire a través del producto. La densidad de carga de las bandejas es de 9 kgm⁻² y cada carro carga aproximadamente 200 kg de producto fresco, siendo 2400 kg el total para la cámara de secado.

3. ENSAYOS REALIZADOS. MARZO DE 2009

3.1 Ensayos del secador con calentamiento solar. Marzo 2009

Durante el mes de marzo de 2009 fueron realizados los primeros ensayos del sistema, funcionando solo mediante calentamiento solar. 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. Por último, se siguió con una balanza la pérdida de peso de una muestra del producto.

3.2 El Equipo de Medición

Se midió la evolución del sistema, durante un ciclo de secado con termocuplas tipo K conectadas a un Datalogger Campbell CR 23 x programado para tomar datos cada 5 minutos. En la Fig. 7 se muestra un esquema de ubicación de los sensores. Los números 1 a 7 representan las termocuplas, 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.

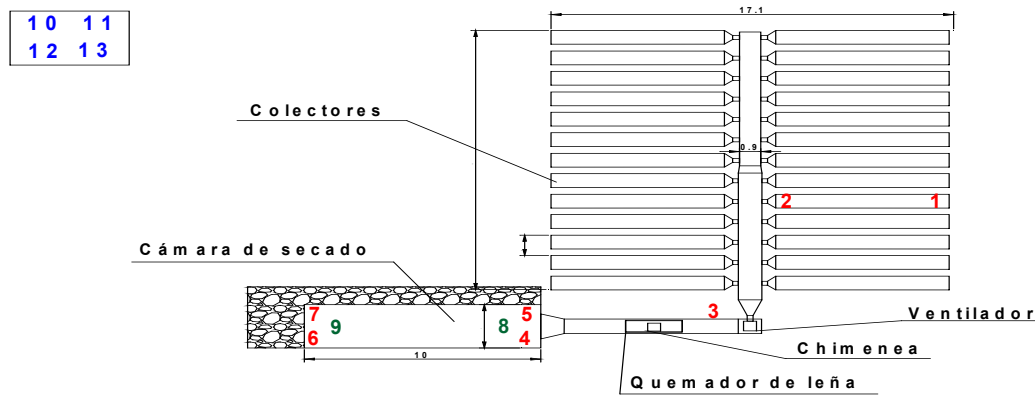


Figura 7: Ubicación de los sensores utilizados en la campaña de medidas realizadas en Marzo de 2009.

La radiación solar global se midió sobre plano horizontal y sobre el plano de los colectores, con dos pirheliómetros Kipp Zonnen CM 3. Con un anemómetro del tipo cazoleta MET ONE 14 A se midió velocidad de viento. Para medir velocidad de flujo de aire dentro de la cámara de secado se utilizó un anemómetro de hilo caliente TSI Veloci Calc mod. 8345. En las medidas de humedad relativa de la cámara se utilizaron dos sensores HMP45A de Vaisala.

Además se contó con otro Datalogger, CR1000 Campbell para medir las variables climáticas correspondientes a las condiciones ambientes, esto es, radiación solar total, humedad relativa, temperatura, velocidad y dirección de viento.

4. RESULTADOS OBTENIDOS. MARZO DE 2009.

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.

En la Fig. 8, 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 Fig. 9, se confirman las condiciones excepcionales del clima del lugar para secar. La medición corresponde al primer día de otoño, obteniéndose temperaturas máximas cercanas a los 38 °C, siendo el promedio mensual de 20 °C. Las humedades relativas registradas están entre el 20 % y el 40 % prácticamente para todo el día solar.

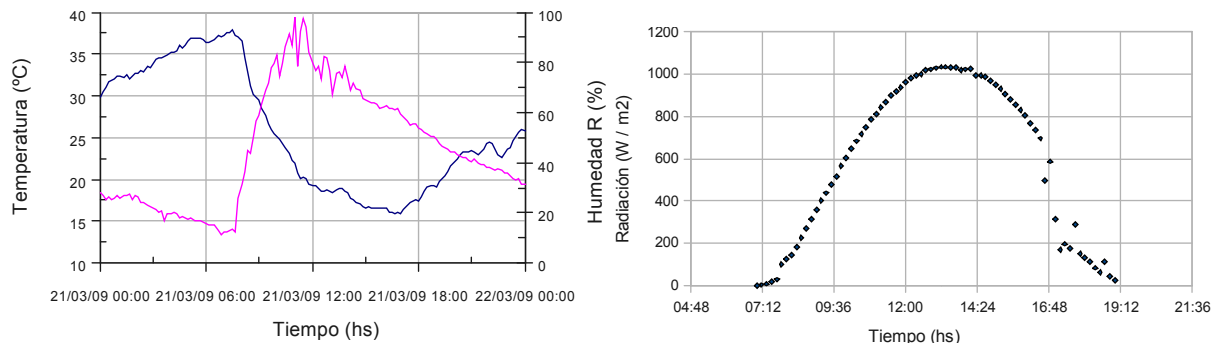


Figura 8: Evolución de la temperatura y humedad ambiente. Figura 9: Radiación solar en el plano de los colectores.

La Fig. 10 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. La Fig. 11 muestra la velocidad de viento para el mismo día. La dirección predominante es noreste-suroeste y se observan intensidades entre 5 y 5,5 ms⁻¹, entre las 15 y las 16 hrs, siendo la media aproximadamente de 2 ms⁻¹.

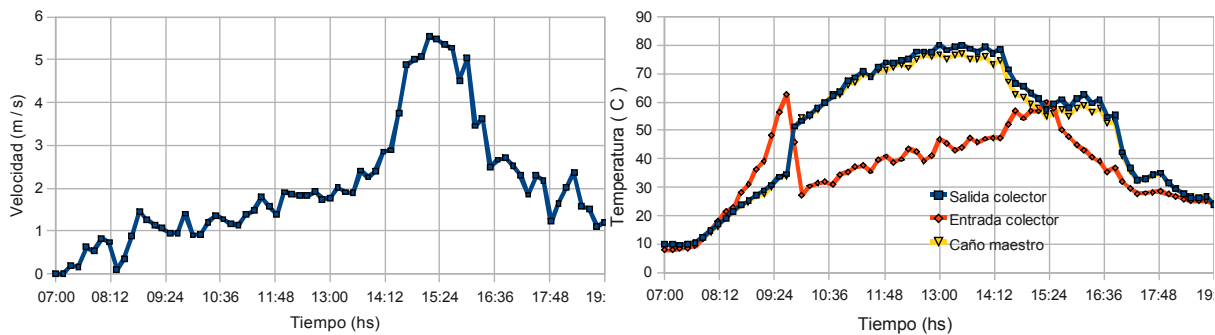


Figura 10: Velocidad del viento. Figura 11: Evolución de la temperatura del aire en un colector.

La Fig. 11 muestra la temperatura de entrada, salida de los colectores y la temperatura del caño maestro. Si bien, la temperatura de los colectores es cercana a los 80 °C al mediodía 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 °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, debido a que también está recibiendo aporte de energía solar en su superficie.

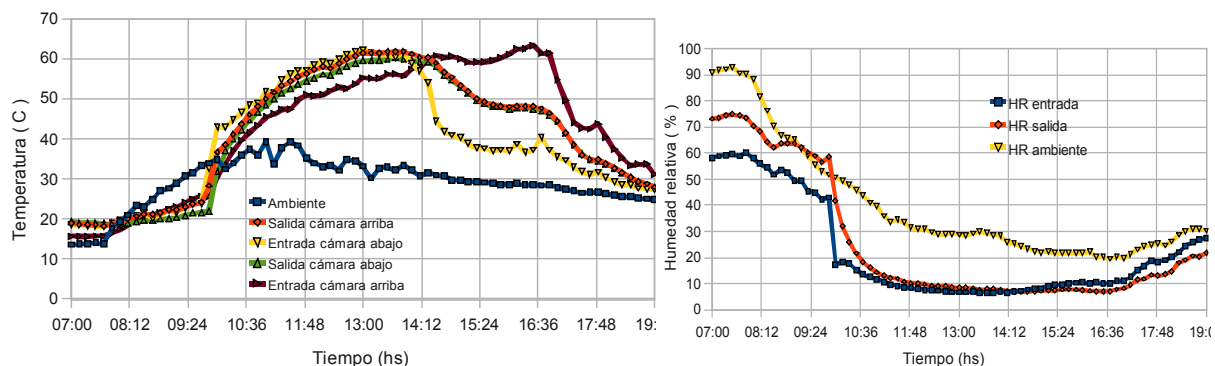


Figura 12: Temperatura de aire en cámara de secado. Figura 13: Humedad relativa en cámara de secado y ambiente.

La Fig. 12 muestra 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. Estas temperaturas son adecuadas para evitar la formación de aflatoxinas asociadas con hongos en el pimiento fresco. 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, debido al enfriamiento evaporativo producido. El salto de temperatura que se obtiene respecto a la temperatura ambiente es de 30 °C.

La Fig. 13 muestra los valores medidos de humedad relativa ambiente, y a la entrada y salida de la cámara para ese día. 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.

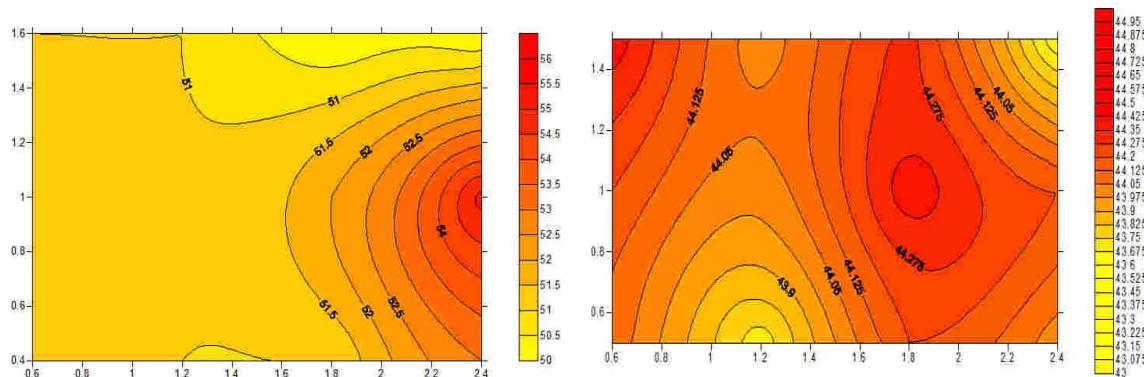


Figura 14: Perfiles de temperatura 2D a la entrada (izquierda) y salida de la cámara (derecha)

En la Fig. 14 se muestran los perfiles de temperatura 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 a la cámara de secado, 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.

La Fig. 15 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 indicando una menor circulación de aire. El rango de variación de velocidad está entre 1,25 y 0,2 m¹. 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 al efecto del paso del aire a través de los carros.

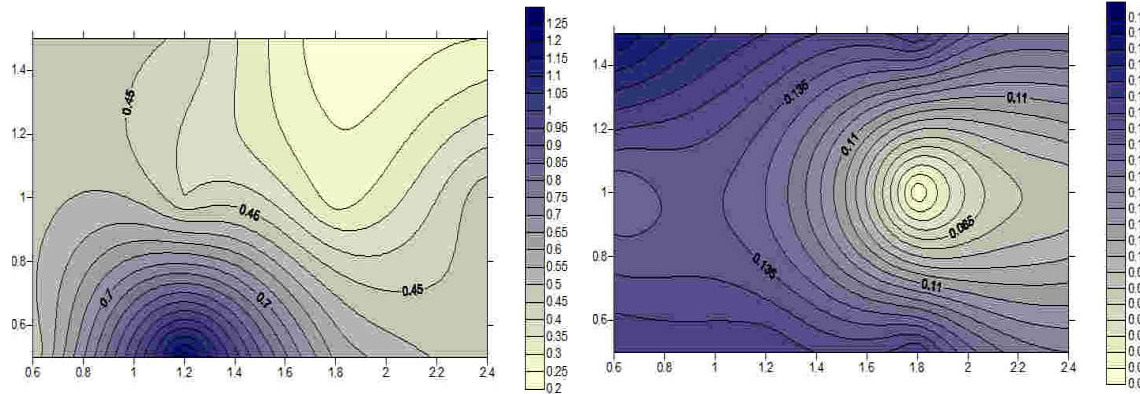


Figura 15: Perfiles de velocidad del aire en 2D a la entrada (izquierda) y salida de la cámara (derecha)

En la Fig. 16 se muestra la curva de pérdida de peso 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).

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. 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.

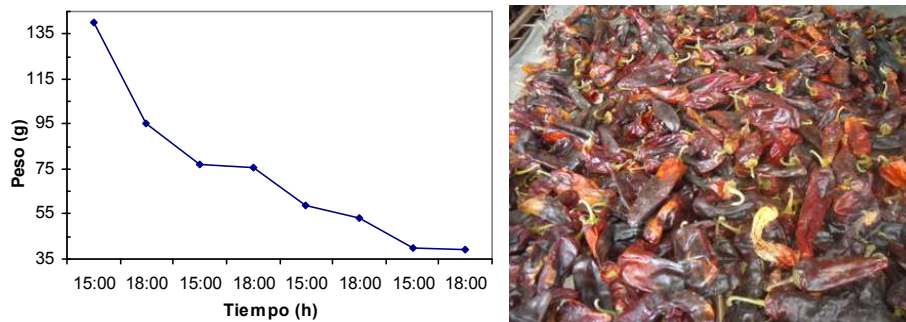


Figura 16, 17: Curva de secado y producto seco.

5. ENSAYOS REALIZADOS. MARZO A JUNIO DE 2010.

5.1 Ensayos del secador en funcionamiento híbrido. Marzo a Junio 2010:

Las experiencias se realizaron durante los meses de marzo a junio de 2010. En esta campaña se estudió el comportamiento del secador en condiciones variables de funcionamiento, ya sea en funcionamiento solar, o de forma híbrida con calentamiento solar y quemado de leña. La carga de producto varió desde carga total, durante las primeras semanas de marzo, hasta carga mínima, en las últimas semanas de mayo.

5.2 El Equipo de Medición:

Se utilizó un datalogger Campbell CR1000, programado con una frecuencia de muestreo de 10 minutos y un multiplexor Campbell AM25T. Se realizaron medidas de temperatura ambiente y temperatura de flujo de aire en los colectores, caño maestro, quemador de leña, chimenea, y en el interior de la cámara de secado. Para ello se utilizaron termocuplas tipo K, convenientemente calibradas. Fueron censados valores de humedad relativa ambiente en el interior de la cámara de secado, mediante sensores Vaisala HP 45D, y radiación global sobre superficie horizontal, con un piranómetro Kipp y Zonnen CM3.

6. RESULTADO OBTENIDOS. MARZO A JUNIO DE 2010.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos durante la operación del secador en un lapso de tres días, desde el 18 al 21 de mayo. La Fig. 18 muestra la evolución de la temperatura ambiente y radiación global sobre plano horizontal. Los resultados observados son acordes a la zona y época del año. Se observa un descenso de la temperatura ambiente en el último día de la serie, 21 de mayo, como consecuencia de un cambio en las condiciones ambientales.

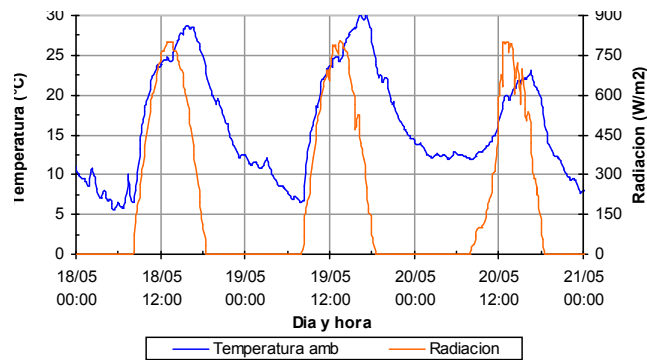


Figura 18: Evolución de la temperatura ambiente y radiación solar

La Fig. 19 describe la variación de la temperatura del aire a través del caño maestro y a la salida del ventilador. Se observa una diferencia de temperatura entre la entrada y salida del caño maestro cercana a los 10 °C al mediodía solar. Esta pérdida de calor está relacionada con la acción del viento y es originada por la falta de aislamiento en esta sección.

Se observa también el comportamiento nocturno del sistema con calentamiento auxiliar, ya que puede apreciarse un incremento en temperatura cercano a los 10 °C a la salida del ventilador. Este incremento de temperatura se produce a partir de la hora 19, cuando se enciende la leña y es apreciable hasta la salida del sol, a hora 7. Además, para la misma posición, se aprecia un incremento de la temperatura en horas de la noche. Este fenómeno es originado por el intercambio radiativo a cielo abierto, mayor que en el resto de las superficies expuestas.

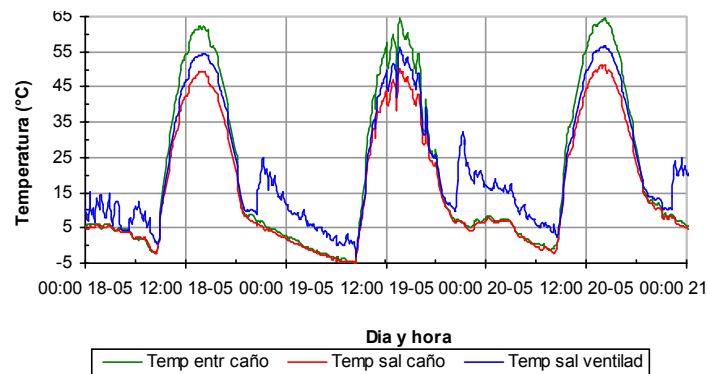


Figura 19: Temperatura de flujo de aire a través del caño maestro y a la salida del ventilador.

La Fig. 20 detalla las temperaturas de flujo de aire obtenidas a la salida de dos colectores, ubicados en la segunda fila a ambos lados del caño maestro. En ellos se observa incrementos de temperatura de 30 °C respecto al ambiente, en el mediodía solar. Se observa que en horas de la noche, cuando es apagado el ventilador, la temperatura del flujo descende hasta 10 °C respecto del ambiente, debido al intercambio radiativo entre el colector y el cielo. Ya que los colectores pueden girarse completamente, este fenómeno puede evitarse colocando los colectores mirando al suelo.

De acuerdo a la Fig. 21, a lo largo del día la humedad relativa ambiente a la entrada de la cámara es baja, de 2%, aproximadamente. Sin embargo, la presencia del producto incrementa la humedad relativa del aire en valores cercanos

al 20%. Estos valores permiten inferir que el aporte de energía del sistema de calefacción cubre la demanda presente. Además, como el flujo de aire a la salida de la cámara tiene una humedad relativa baja, se puede plantear un incremento en la carga de producto a secar. Por ello se está realizando una ampliación de la cámara de secado, que permitiría duplicar la carga de producto, llegando a 4 Tn de pimiento fresco. Por último, puede mencionarse un incremento de la humedad relativa en horas de la noche, originado por la acción del clima nocturno, más húmedo.

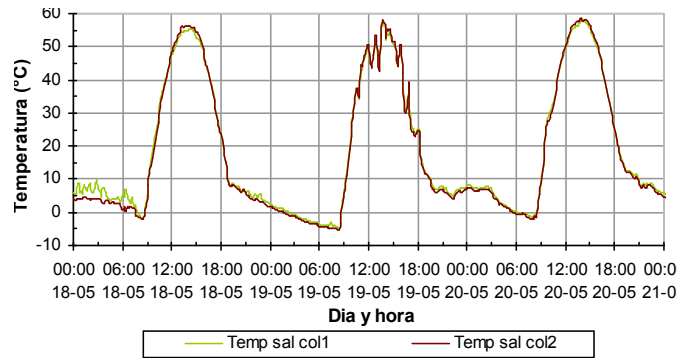


Figura 20: Temperatura de flujo de aire a la salida de los colectores solares.

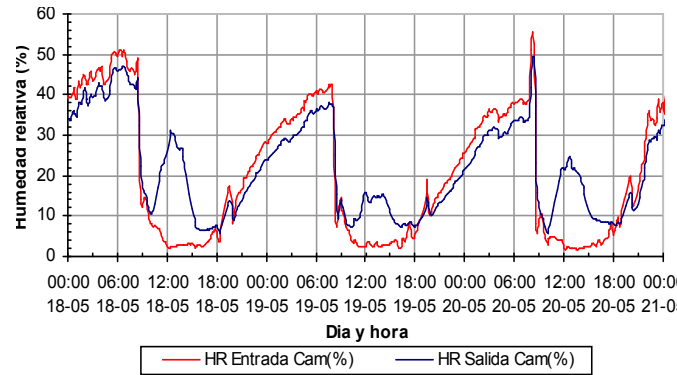


Figura 21: Humedad relativa ambiente a la entrada y salida de la cámara de secado.

La Fig. 22 describe la evolución de la temperatura del flujo en el interior de la cámara de secado, y la temperatura de producto. La escasa diferencia entre las temperaturas de flujo en la entrada y la salida de la cámara refuerza el análisis realizado en el párrafo anterior, por lo que se supone viable un aumento de carga a secar.

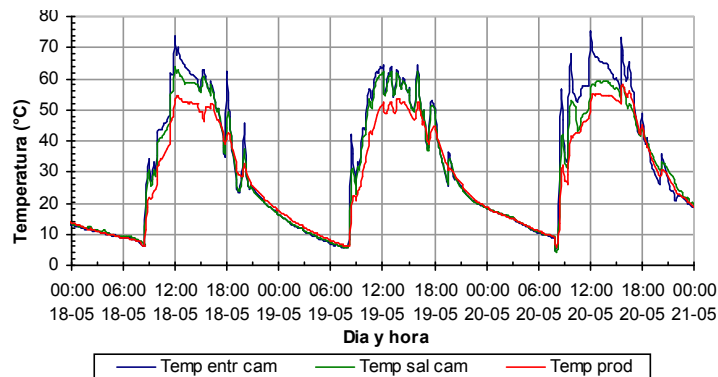


Figura 22: Temperatura de flujo de aire en el interior de la cámara de secado y temperatura de producto a secar.

Las figuras 23 y 24 detallan los valores de temperatura censados en el quemador, en el intercambiador y la temperatura de los gases de combustión, medidos a la salida de la chimenea, correspondientes al día 24 de abril.

Los valores medidos en el quemador y chimenea presentan un comportamiento oscilante. Como el máximo valor que registran las termocuplas utilizadas es de 200 °C, las temperaturas superiores a este valor no son registradas por el datalogger, que las interpreta como valores no numéricos, reflejados en la gráfica como 0 °C.

Sin embargo los valores de temperatura registrados en la Fig. 24, permiten asegurar que la temperatura de los

gases de escape es relativamente alta respecto a los valores medidos en el intercambiador. Promediando los valores de temperatura en la franja horaria de 20 a 21:40 se obtienen los siguientes resultados:

- Temperatura promedio de flujo de aire en intercambiador: 27.94 °C
- Temperatura promedio de gases de escape en la chimenea: 105.58 °C
- Temperatura promedio registrada en el quemador: 163.65 °C

Esto lleva a suponer que el intercambiador construido no aprovecha de forma totalmente la energía liberada en la combustión de la leña, con lo cual pueden considerarse posibles mejoras al horno, agregándole tubos al intercambiador, o aprovechando mediante recirculación la energía disponible en los gases de combustión.

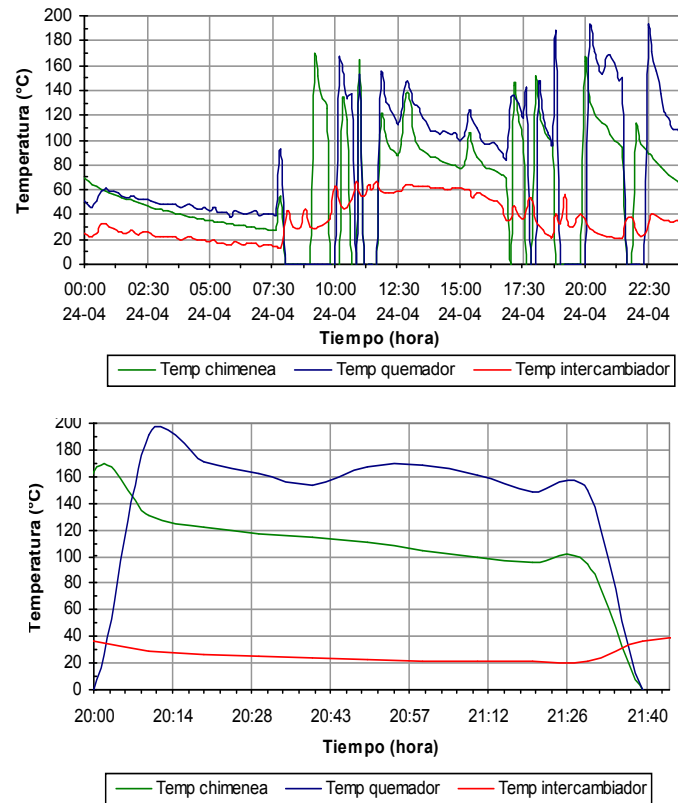


Figura 23, 24: Temperatura de flujo en el intercambiador, temperatura en quemador y temperatura de gases de combustión a lo largo del día 24 de abril de 2010, y desde 20 a 22 h. del mismo día.

6. ANALISIS DEL SISTEMA DEL SECADOR SOLAR HÍBRIDO MEDIANTE RETSCREEN

RETScreen es el Software de Análisis de Proyectos de Energía Limpia producido por el Ministerio de Recursos Naturales de Canadá. Este software es utilizado como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones y valoración de proyectos basados en energías renovables. La versatilidad de RETScreen le permite evaluar la producción de energía y ahorros, costos de ciclo de vida, reducción de emisiones, aspectos financieros y de riesgo de varios tipos de tecnologías de energía eficiente y renovables.

Se analizó con RETScreen un proyecto de generación de calor mediante colectores solares de aire destinado al secado de cosechas. Se supuso un área de colección de 180 m², y las condiciones ambientales correspondientes a la localidad de San Carlos, Salta, Argentina. En el escenario propuesto se plantea el análisis de un sistema de colectores solares de aire como sustitución de un sistema de secado por quemado de leña. Se consideran las dimensiones del sistema solar, su costo, en dólares y las características de funcionamiento del quemador de leña, en base a las mediciones realizadas.

Como la actividad productiva es de tipo estacional, en el proyecto analizado se supone un volumen de producción similar al real, esto es, carga de Diciembre a Marzo, para luego ir decreciendo la producción, hasta la llegada de las primeras heladas, que usualmente ocurren en Mayo. Se considerará además un uso continuo del secador, con un funcionamiento un promedio de catorce horas al día, siete días a la semana, incluidos sábado y domingo.

En el análisis del sistema de calefacción se considera la sustitución de un quemador de leña, con una eficiencia estimada de 30%, por un sistema híbrido solar-quemador de leña, con una eficiencia estimada del 50% correspondiente a cada sistema. Se supuso que la leña utilizada tiene densidad aproximada de 500 kg/m³, a un costo de \$100 el m³.

De esta forma, la inversión inicial realizada en función del sistema de calentamiento solar queda cubierta a lo largo del cuarto año de uso, como se observa del gráfico de flujo de caja acumulado. Se puede mencionar que el sistema solar

se podría amortizar en un tiempo menor si el uso del mismo sería continuo durante todo el año.

6.1 Resumen de resultados obtenidos mediante RETScreen:

Proyecto de calefacción

| | | |
|--|--|--|
| Tecnología: Calefactor solar de aire | - | Aplicación: Secado de cosechas. |
| Caso base: Demanda de calor: 136 MWh | Caso propuesto: Demanda de calor: 136 MWh | |
| Temperatura interior: 20 °C | Temperatura interior: 20 °C | |
| Temperatura del aire – máximo: 20 °C | Temperatura del aire – máximo: 20 °C | |
| Valor – R – techo y paredes: 2,1 m ² - °C/W | Valor – R – techo y paredes: 2,1 m ² - °C/W | |
| Velocidad de diseño de flujo de aire: 6200 m ² /h | Velocidad de diseño de flujo de aire: 6200 m ² /h | |
| Días de operación - días de semana: 5,0 d/sem | Días de operación - días de semana: 5,0 d/sem | |
| Horas de op por día - días de semana: 14 h/d | Horas de op por día - días de semana: 14 h/d | |
| Días de operación - fines de semana: 2,0 d/sem | Días de operación - fines de semana: 2,0 d/sem | |
| Horas de op por día - fines de semana: 14 h/d | Horas de op por día - fines de semana: 14 h/d | |

Uso del recurso solar

Ubicación: San Carlos, Salta, Argentina

| Mes | Rad horiz | Rad inclinado | Porcentaje del mes usado | |
|---------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------|
| | kWh/m ² /d | kWh/m ² /d | Caso Base | Caso Prop |
| Enero | 5,83 | 4,90 | 100% | 100% |
| Febrero | 5,58 | 5,03 | 100% | 100% |
| Marzo | 5,26 | 5,22 | 90% | 90% |
| Abril | 4,84 | 5,48 | 40% | 40% |
| Mayo | 4,36 | 5,55 | 10% | 10% |
| Junio | 4,19 | 5,85 | 0% | 0% |
| Julio | 4,33 | 5,86 | 0% | 0% |
| Agosto | 4,97 | 6,03 | 0% | 0% |
| Seti | 5,81 | 6,12 | 0% | 0% |
| Oct | 5,92 | 5,49 | 0% | 0% |
| Nov | 6,12 | 5,21 | 10% | 10% |
| Dic | 6,17 | 5,06 | 80% | 80% |

Colectores solares de aire - Tipo: Vidriado

Objetivo del diseño: Incremento de temperatura

Fabricante: INENCO – GIDAI **Modelo:** ADITAL

Absortancia del colector solar: 0,72

Factor de desempeño: 1,00

Área bruta por colector solar: 7,05 m²

Área de captación de colector solar: 7,05 m²

Coefficiente Fr (tau alfa): 0,70

Coefficiente Fr UL: 6,00 (W/m²)/°C

Número de colectores: 26

Área del colector solar: 183,30 m²

Área del colector solar: 200 m²

Tarifa de electricidad: 0,172 \$/kWh

Calentamiento entregado: 88,7 MWh

Costo total: 15.000 U\$\$

Sistema de calefacción – Quemador de leña

Tipo de combustible: Biomasa

Eficiencia estacional: Caso base: 35%. Caso prop: 50%

Consumo comb anual: Caso base: 72,4 Tn. Caso propuesto: 18,3 Tn.

Precio combustible: Caso base: 62 U\$\$/Tn. Caso propuesto: 62 U\$\$/Tn.

Costo del combustible: Caso base: 4.487 U\$\$ Caso propuesto: 1.136 U\$\$

Análisis Financiero

Costo total del Sistema de calefacción U\$\$15,000

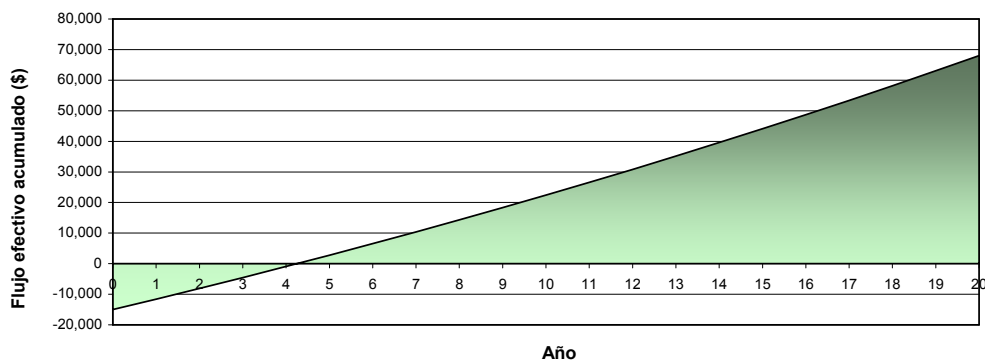


Figura 25: Flujo de caja resultante de la sustitución del sistema de quemado de leña, por un híbrido solar – biomasa.

7. CONCLUSIONES

Se presentaron el diseño, construcción y ensayos de un secador solar híbrido para dos toneladas de carga de producto fresco de pimiento para pimentón. Este secador representa una mejora de un secador con colector de lecho de piedra con el que una empresa de San Carlos, Salta, viene operando desde hace más de 10 años.

Las mejoras en el sistema de colección de radiación solar, sumadas al uso de mejores materiales, incrementan la eficiencia instantánea de los colectores hasta el 50 %, al mediodía solar.

La disminución de la longitud de los colectores, el uso de superficies suaves y un flujo de aire ajustado al mínimo requerido permiten reducir también la potencia y el número de ventiladores utilizado, a uno solo de 4 HP.

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.

Se presentan los resultados de ensayos realizados en el secador, en funcionamiento solar, obtenidos durante la cosecha 2009. Los ensayos incluyen medidas de temperatura de flujo de aire en el banco de colectores, caño maestro, quemador y cámara de secado, además de registrarse valores de humedad relativa ambiente en el interior de la cámara de secado, y radiación solar global sobre plano horizontal

Si bien, en el diseño inicial la carga de la cámara de secado es de un poco más de 2 toneladas, los valores bajos de humedad relativa y las altas temperaturas que se obtienen a la salida de la cámara, figuras 21 y 22, 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, esperando llevar la carga de producto a cuatro toneladas, para la cosecha 2011.

Los registros de temperatura obtenidas en la cámara durante el primer día de secado, muestran valores superiores a 40 °C durante 8 horas, y son adecuados para asegurar la reducción del 50% de agua contenida en el producto. 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.

Los ensayos realizados durante la cosecha 2009, permitieron plantear mejoras al secador, incrementando la carga de producto fresco de dos a tres toneladas, a secarse en un tiempo estimado de tres días.

Sin embargo, los resultados obtenidos en los ensayos realizados durante la cosecha 2010 permiten asegurar que el sistema de calentamiento es capaz de secar una carga mayor que la actual.

Fue estudiado el sistema auxiliar de calentamiento por quemado de leña. Para ello se censaron valores de temperatura en el intercambiador, quemador y chimenea. Aunque el funcionamiento del quemador es correcto, los resultados obtenidos indican que el intercambiador puede ser mejorado, aumentando el área de intercambio.

Se realizó un estudio de factibilidad mediante RETSCREEN, considerando la sustitución del quemador de leña, por parte del sistema solar de calentamiento por colectores de aire. En este análisis se planteó la sustitución energética del quemador de leña, por parte del sistema de calentamiento solar. Así, el flujo de caja resultante muestra un tiempo de recuperación de las inversiones necesarias de cuatro años. Si bien este tiempo es relativamente extenso, debe tenerse en cuenta el uso estacional del sistema. En caso de lograr diversificar la producción, el secador podría ser utilizado durante todo el año, de forma tal que este tiempo se vería disminuido.

Sin embargo, los resultados obtenidos permiten asegurar que el uso del secado solar permite una notable reducción del consumo de leña, de tal forma que el precio final del kilogramo de producto seco disminuye notoriamente.

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., 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.

Condorí 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.

RETScreen International: <http://www.retscreen.net/es/home.php>

Abstract. We present the design, construction, and tests carried out in industrial-scale solar dryer. The dryer, located in San Carlos, province of Salta, Argentina, is used in the production of dry pepper. It has forced air and auxiliary heating with a wood burner. The design and construction aspects introduced represents a technological improvement in respect of a solar dryer absorber fixed bed of stones previously developed. Improvements are introduced in the air distribution system requiring a low-power ventilator. Improvements in thermal efficiency of the system lead to higher drying rate during the day with the consequent decrease in the use of conventional energy.

The drying system was tested during the month of March 2009, and during the months of April-June 2010 jointly using the wood burner and the bank of solar air collectors. During the tests were measured variables of interest including temperature, airflow temperature, relative humidity and solar radiation on horizontal plane. It also presents a feasibility study conducted by the RETScreen software, which raises the partial replacement of traditional wood burnt by the air heating system with solar collectors.