

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE UN SECADOR SOLAR INDUSTRIAL EN HUACALERA, QUEBRADA DE HUMAHUACA, ARGENTINA

Miguel Angel Condori – miguel.angel.condori@gmail.com

Gonzalo Durán – gduran@inenco.net

Ricardo Echazú – ricardo.echazu@gmail.com

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

2. Conversión Térmica de la Energía Solar

Resumen. Se diseñaron y construyeron dos secadores solares industriales del tipo túnel, para operación anual en Huacalera, Quebrada de Humahuaca. Los secadores desarrollados puede ser clasificados como de tipo indirecto respecto a la incidencia del sol sobre el producto, de tipo túnel con flujo forzado contracorriente respecto a la circulación del aire y de escala semi industrial si se considera la capacidad de carga.

La carga total de producto fresco es de 500 kg. por secador. Se ensayaron cargas de zanahoria rallada, cebolla cortada, ajo en cubos y hojas como espinaca, puerro, apio, acelga y perejil, con muy buenos resultados tanto en tiempo de secado como en la calidad final del producto. El tiempo de secado para los productos de hoja está dentro del día, pero en el caso de los tallos o tubérculos se requiere aproximadamente medio día más.

Se censaron de forma simultánea temperatura de flujo de aire en las distintas secciones del secador (colectores, caño maestro y cámara de secado), humedad en la entrada y salida de la cámara de secado, la radiación global sobre plano horizontal y velocidad de viento. Además, se realizó el seguimiento del peso de los productos a secar. El sistema genera suficiente energía como para completar el secado de 500 kg de producto fresco durante un día soleado. Sin embargo, las medidas muestran que no se está utilizando todo el potencial de energía útil que producen los colectores.

Se presenta un análisis de proyecto de energía limpia mediante RETScreen, planteando la sustitución energética de un sistema de secado de igual volumen de producción e idénticas dimensiones al construido. Se supone una sustitución total de un sistema de calefacción eléctrico, mediante un sistema de calentamiento solar. Los resultados obtenidos indican un tiempo de retorno de la un año.

Palabras-clave. Secador solar, Colector solar de aire, Eficiencia energética.

1. INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto PROSOL, se diseñaron y construyeron dos secadores solares industriales del tipo túnel, para operación anual en la Quebrada de Humahuaca. Específicamente, en la comunidad de Huacalera (lat: 23° 26" S y long: 65° 21" O), al norte de la República Argentina. Esta región, atravesada por el trópico de capricornio, está caracterizada por un clima árido, de pequeño o nulo excedente de agua considerándose a la época estival como la de mayor eficiencia para la actividad agraria. La planta de secado, Fig. 1, se encuentra a una altura de 2462 msnm, correspondiéndole 770 hPa de presión atmosférica. Posee una temperatura media anual de 13 °C con grandes amplitudes térmicas. La precipitación media anual es de 121 mm, concentrada entre los meses de diciembre y marzo. Es una región con una alta heliofanía solar durante todo el año, con niveles de radiación entre los más altos del mundo. Es también una zona de fuertes ráfagas de vientos, el promedio anual es de 5 ms⁻¹.



Fig. 1: Planta de deshidratado de Huacalera, Quebrada de Humahuaca.

2. FUNCIONAMIENTO

En la Fig. 2 se muestra un esquema de planta del secador desarrollado. El calentamiento del aire se realiza sólo con energía solar provista por un banco de colectores solares calentadores de aire. El movimiento de aire se produce mediante un ventilador eléctrico. Cada cámara de secado tiene una capacidad de carga de hasta 500 kg de producto fresco, considerando una densidad de carga de 10 kg por metro cuadrado de bandeja. Los requerimientos principales para el diseño de los equipos fueron: a) contar con una producción diaria de productos secos, para optimizar el funcionamiento de la planta, y b) que el producto seco final conserve su higiene y esté libre de contaminación, especialmente de polvo que es arrastrado por los fuertes vientos de la zona.

El se
producto,
se conside
construcci
solar, cole
ASHRAE.

re el
ial si
) y la
ecado
1985;

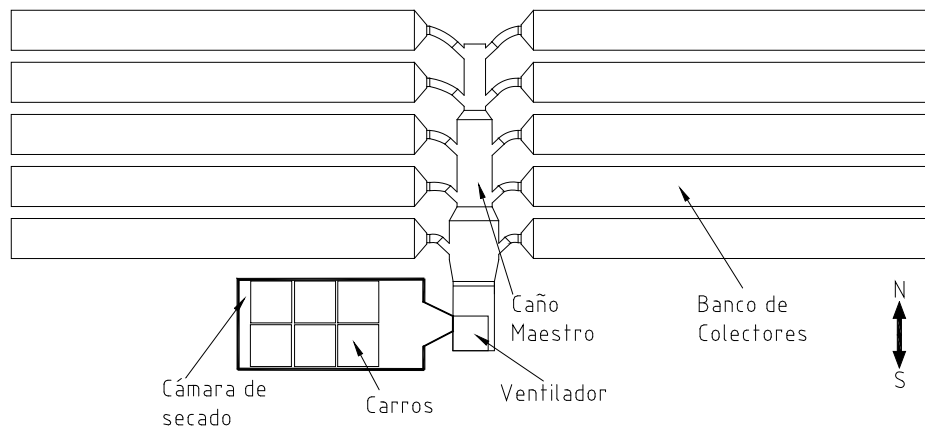


Fig. 2: Esquema de planta del secador donde se destacan sus partes principales

Mediante el ventilador ingresa aire ambiente a los colectores y los recorre aumentando su temperatura. En la boca de entrada de cada colector se coloca un filtro de fibra sintética para hacer una primera limpieza del polvo grueso. El aire caliente que sale de los colectores ingresa al caño maestro donde se recoge todos los aportes. El caño maestro se construye como otro colector con la cara superior translúcida y el interior pintado de negro mate. A la salida del caño maestro, el aire pasa por filtros metálicos donde se limpia de las partículas de polvo pequeñas y luego por el ventilador centrífugo hacia la cámara de secado donde se encuentra, dispuesto en carros, con el producto a deshidratar. Finalmente, sale de la cámara a través de dos ventanas ubicadas en la puerta de ingreso del producto fresco, y se desecha a la atmósfera. Estas ventanas de salida tienen filtros de fibra sintética para evitar el ingreso de polvo a la cámara de secado.

Los colectores y el caño maestro trabajan en depresión debido a la succión del ventilador, mientras que la cámara de secado lo hace con sobre presión. El aire caliente entra por un extremo de la cámara de secado y lo recorre hacia el otro extremo pasando entre las bandejas con producto en los carros. El movimiento de los carros es a contracorriente del aire, lo que produce un gradiente de secado. Durante el día se sacan por una puerta lateral, próxima al ingreso del aire caliente, los carros con productos secos y se introducen por la otra punta los carros con productos frescos desplazando las columnas hacia adelante.

3. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

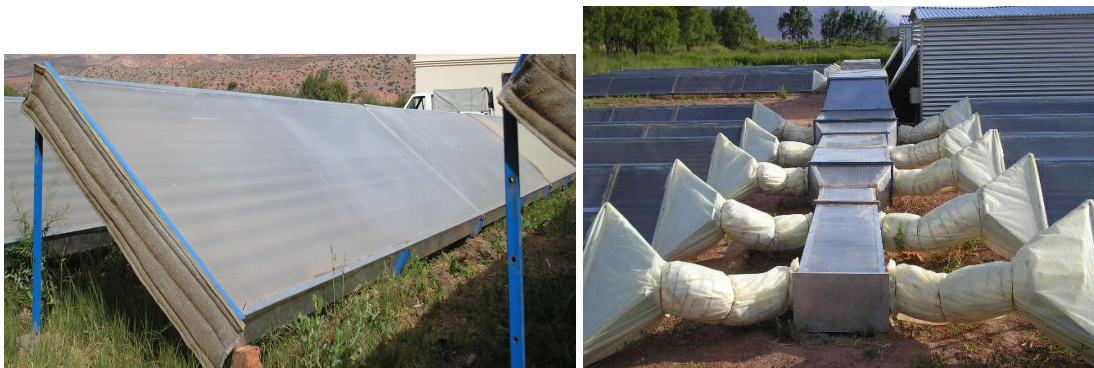
3.1 Colectores y caño maestro

La planta de deshidratado tiene dos secadores idénticos colocados en el eje norte-sur. La superficie total ocupada por cada secador es de 160 m², de los cuales el banco de colectores y el caño maestro utilizan 150 m², y la cámara de secado los 10 m² restantes.

El número total de colectores para cada secador es de 10, distribuidos en dos grupos de 5 ubicados en ambos lados del caño maestro. Se dejan 0,40 m de separación entre colectores para permitir la circulación, evitar el sombreado y para evacuar el agua de lluvia. Los colectores son cajas de chapa galvanizada de 0,94 m de ancho, 9,76 m de largo y 0,1 m de alto, rebatibles, con el absorbedor construido en chapa ondulada pintada en negro mate. En términos medios, por cada colector circula un caudal de aire de 600 m³hr⁻¹ con una velocidad de 1,8 ms⁻¹. Con este flujo el colector opera con una eficiencia aproximada del 50 %, proporcionando una temperatura de salida en el rango de los 30-60 °C con una radiación solar media diaria mensual de 550 Wm⁻².

Cada colector se une al caño maestro mediante una campana de chapa galvanizada que pasa de la sección rectangular del colector, 0,10 m por 0,94 m, a una circular de 0,20 m de diámetro. En este acople se coloca una llave tipo mariposa, para controlar el paso de aire.

La cara exterior del colector está construida en chapa galvanizada lisa plegada en los laterales. La cara interior con aislamiento térmico en lana de vidrio de 5 cm de espesor con lámina aluminizada reforzada. Se han evitado los puentes térmicos entre ambas caras. El absorbedor se construye en chapa galvanizada ondulada pintando de negro mate. Está separado del fondo por 5 cm, existiendo circulación de aire por abajo y por arriba de la chapa absorbedora. La cubierta superior es de policarbonato alveolar transparente de 4 mm de espesor. El cierre entre la cubierta y el cajón se realiza con sellador siliconado y con ángulos de chapa galvanizada sujetos con remache. En la Fig. 5 se muestra un plano de corte del colector



Figs. 3, 4: Foto del colector solar calentador de aire. Vista de las campanas de reducción y acople.

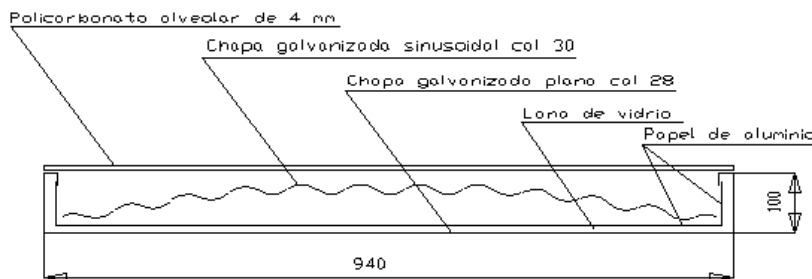


Fig. 5: Plano de corte del colector solar de aire utilizado.

El caño maestro de 7 m de largo, está compuesto por tres secciones de ancho creciente. Así, el aumento de sección permite evitar un aumento brusco en la velocidad del aire, lo cual aumentaría las pérdidas de carga. Cada sección del caño está pensada como un colector auxiliar, y constituida por un cajón rectangular de chapa galvanizada con aislamiento térmico en lana de vidrio. La cara interior se pinta de negro mate y la cara superior es transparente, utilizando policarbonato alveolar de 4 mm de espesor.

3.2 Cámara de Secado y Carros

La cámara de secado es un túnel de medidas internas de 1,85 m de alto, 4,5 m de largo y 2,15 m de ancho, con revestimiento interior y exterior en chapa galvanizada y aislación interna en lana de vidrio de 5 cm. La estructura considera dos puertas de acceso frontal para ingreso del producto a secar y una puerta lateral para salida del producto seco. Las puertas de acceso consisten en dos hojas de 1,07 m por 1,85 m cada una, con una ventana de 0,5 m² en el extremo superior para la salida del aire. Allí se coloca un filtro sintético para evitar la entrada de insectos y de polvo. La puerta lateral tiene idénticas dimensiones a las frontales.

En el interior de la cámara se pueden ubicar 6 carros distribuidos en 2 filas de 3 carros, que pueden transportar 15 bandejas de 1 m² de área cada una, separadas 10 cm entre sí. Las bandejas consisten de un marco de estructura metálica con una base de material perforado para permitir la circulación del aire a través del producto. En un producto como el ají la densidad de carga de las bandejas es de 5,5 kgm⁻² y cada carro carga aproximadamente 84 kg de producto fresco, siendo 500 kg el total para la cámara de secado.



Fig. 6: Cámara de secado y carros para producto.

4. ENSAYO Y MEDICIÓN

El secador se ha ensayado con cargas de zanahoria rallada, cebolla cortada en rebanadas, ajo en cubos y diversas hojas como espinaca, puerro, apio, acelga y perejil, con muy buenos resultados tanto en tiempo de secado como en la calidad final del producto. La planta de deshidratado también elabora sopas deshidratadas a partir de productos autóctonos de los pueblos andinos, tal como sopas de quinoa, kolla llawa (maíz amarillo) y kulli (maíz morado).

El tiempo de secado para los productos de hoja está dentro del día, pero en el caso de los tallos o tubérculos se requiere aproximadamente medio día más. Sin embargo, entre otras mejoras, es posible hacer correcciones en la velocidad del aire en los colectores para que estos operen en máxima eficiencia, por lo que se espera que en todos los casos que el tiempo de secado disminuya.



Figuras 7 y 8: Secador solar de Huacalera, Quebrada de Humahuaca. Vista de colectores, cámara de secado y caño maestro del secador.

La planta de deshidratado se puso en marcha al comienzo del invierno del 2006 y desde entonces se encuentra operando en forma continua. Con el objeto de realizar las mejoras pertinentes, se completaron una serie de ensayos y medidas a fin de determinar su funcionamiento. A continuación se presentan los resultados de las campañas de ensayos y la medición del sistema, como así también el análisis de dichos resultados.

En la Fig. 9 se muestra un esquema de planta del secador, indicando la ubicación de los sensores de medición. Los números corresponden a termocuplas. Se censaron de forma simultánea 14 canales de temperatura, la humedad en la entrada y salida de la cámara de secado, la radiación global sobre plano horizontal y velocidad de viento.

También se midieron perfiles, curvas de nivel, de caudal y temperatura en el interior de la cámara de secado para un área transversal a la dirección de circulación. Además, cuando coincidía con los ensayos, se realizó el seguimiento del peso de los productos que se estaban secando. Todas las medidas fueron comandadas y almacenadas mediante un datalogger Campbell Scientific mod. CR 32X, de 12 canales diferenciales. Debido a que la cantidad de señales a monitorear fue mayor que el número de entradas analógicas del instrumento, se le adoso un multiplexor de estado sólido Campbell Scientific AM25T de 25 señales programado para controlar las medidas de temperatura.

En las medidas de radiación se utilizó un piranómetro Kipp & Zonnen mod CM2 colocado sobre el techo de la cámara de secado, de forma tal de medir radiación incidente sobre un plano horizontal. Para censar velocidad de flujo de aire se utilizó un anemómetro de hilo caliente TSI Veloci Calc mod. 8345. En las medidas de humedad relativa se utilizaron dos sensores HMP45A de Vaisala para medición de temperatura y humedad.

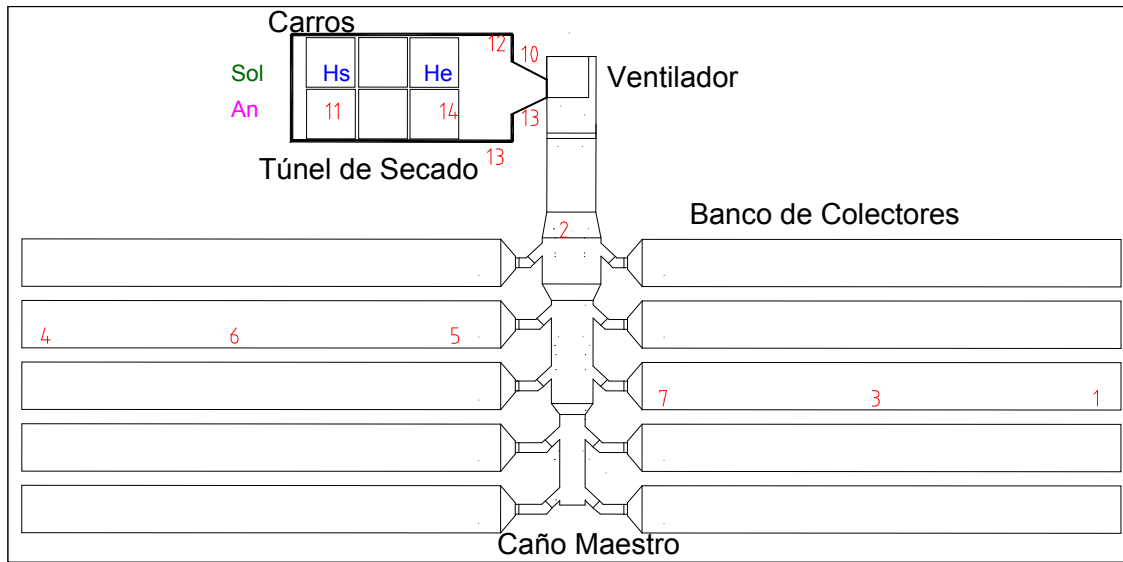


Figura 9: Vista de planta. Los números indican el lugar de las termocuplas en los canales del micrologger.

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

Se midió la temperatura de entrada y salida de flujo en dos colectores, identificados en la Fig. 13 como colector este y oeste respecto al caño maestro, que está ubicado en la dirección norte-sur.

En la Fig. 10 se muestra una serie de cinco días, del 2 al 6 de mayo, de las temperaturas medias en el colector este o izquierdo respecto a la dirección norte-sur, mirando al sur. En el primer día el ventilador no está en funcionamiento, de allí el valor elevado de la temperatura al medio del colector. En los últimos días, de nubosidad variable, se observa que la temperatura de salida del flujo de aire es cercana a los 60 °C. Para describir el funcionamiento de los colectores se elige como día tipo al 3 de mayo, en el que la cámara de secado estaba cargada con acelga.

La Fig. 11 describe los datos de temperatura ambiente y radiación global sobre plano horizontal para ese día. Se observa que la primera alcanza los 28 °C al medio día solar y que la amplitud térmica día-noche es de 24 °C aproximadamente. Los valores de temperatura y amplitud térmica son característicos del invierno en la zona de Puna. Por otra parte la radiación es próxima a los 800 Wm⁻². Se observa que la salida del sol se produce a las 9 horas y la puesta a las 18 horas. Esto se debe a que la planta se encuentra ubicada en la Quebrada de Humahuaca, concretamente en un corredor ubicado entre dos cordones de montañas, uno al este y otro al oeste.

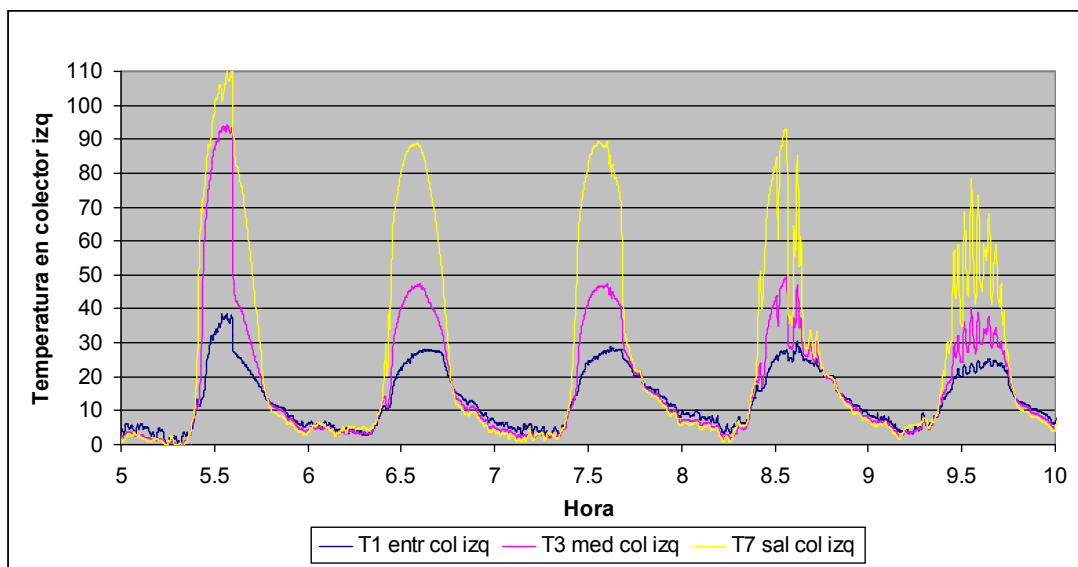


Figura 10: Cinco días consecutivos de medidas en el colector este. El primer día el ventilador está apagado.

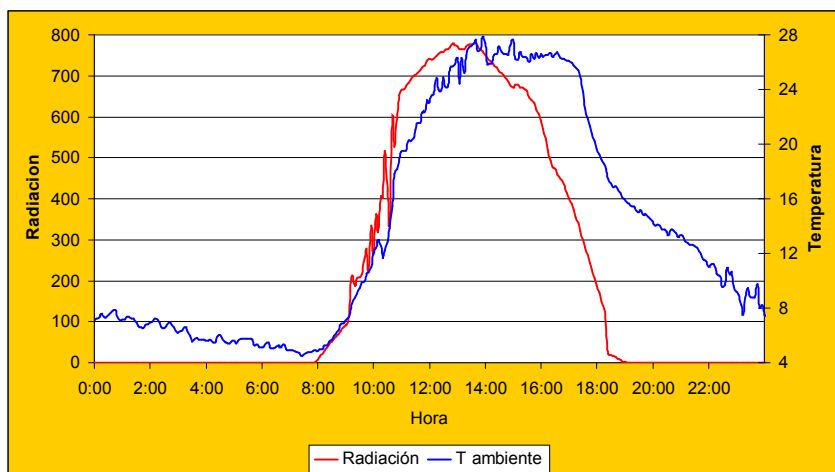


Figura 11: Radiación global sobre plano horizontal y temperatura ambiente medidos el 3 de mayo.

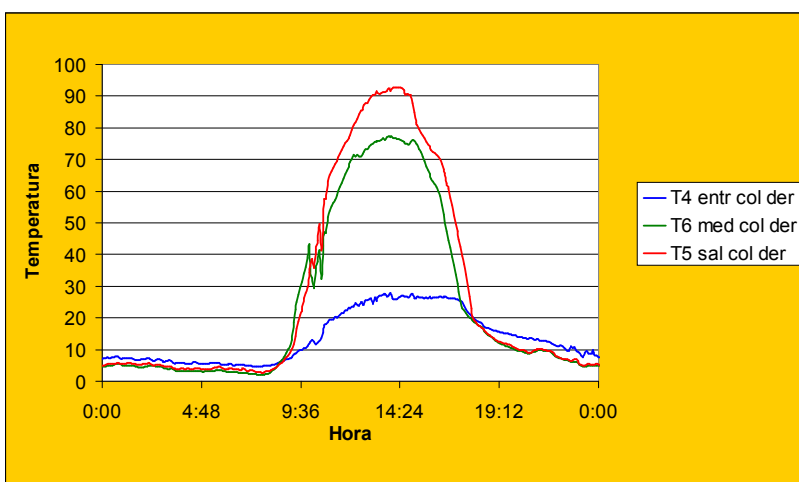


Figura 12: Temperatura del colector oeste a la entrada, al medio día y a la salida, medidas el 3 de mayo.

En la Fig. 12 se muestran las temperaturas de entrada, media y a la salida del colector oeste, medidas en el día tipo. Como el colector permite el paso de flujo de aire por arriba o debajo del absorbedor, la temperatura del aire puede ser medida por debajo o por arriba de la chapa absorbadora. En el caso del colector que se muestra en la Fig.12, la temperatura media, en verde e, la gráfica, corresponde a medidas por encima de la chapa, en una ubicación próxima a la de la placa absorbador por lo que su valor está por encima de la media simétrica entre la entrada y la salida.

En la Fig. 13 se muestran la temperatura ambiente y a la entrada, al medio y a la salida del colector este, para el mismo día. Como se observa, la temperatura ambiente y la de entrada al colector son prácticamente las mismas. En este colector la temperatura al medio es menor la temperatura al medio del colector oeste, debido a que la termocupla se ubicó por debajo de la chapa absorbador. Pero también se debe a que en este colector la llave esclusa se reguló para un flujo de aire casi el doble. El flujo medido fue de $0,06 \text{ kgs}^{-1}$ aproximadamente. No obstante, esta diferencia de casi 30 AC al medio día entre las temperaturas al medio de ambos colectores indicaría que también existen diferentes velocidades de flujo entre lo que pasa por arriba y por debajo de placa absorbador. La temperatura de salida de este colector es también unos grados inferior a la del otro colector debido principalmente al mayor flujo de aire.

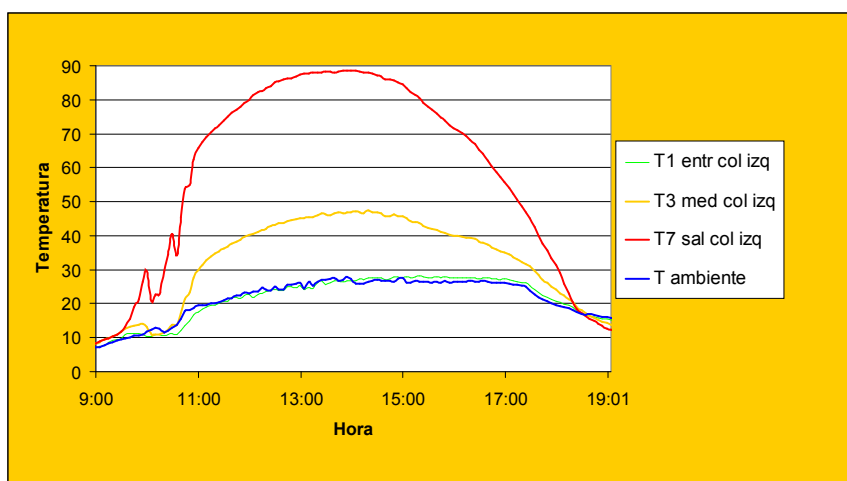


Figura 13: Temperatura del colector este a la entrada, al medio día y a la salida.

En la Fig. 14 se muestra la temperatura de flujo a medida que circula por el secador. Si se consideran los datos correspondientes al medio día solar, el aire ingresa con aproximadamente 28 °C y un flujo de 0,06 kgs⁻¹, calentándose hasta alcanzar los 88 °C aproximadamente, es decir el salto térmico obtenido es de 60 °C. Bajo estas condiciones el calor útil que proporciona el colector es de 3,6 kW. El colector entrega una temperatura superior a los 50 °C, temperatura límite para muchos productos, desde las 10 hrs. hasta las 17:30 hrs, es decir que puede proporcionar temperatura por encima de la requerida por unas 7 horas al día.

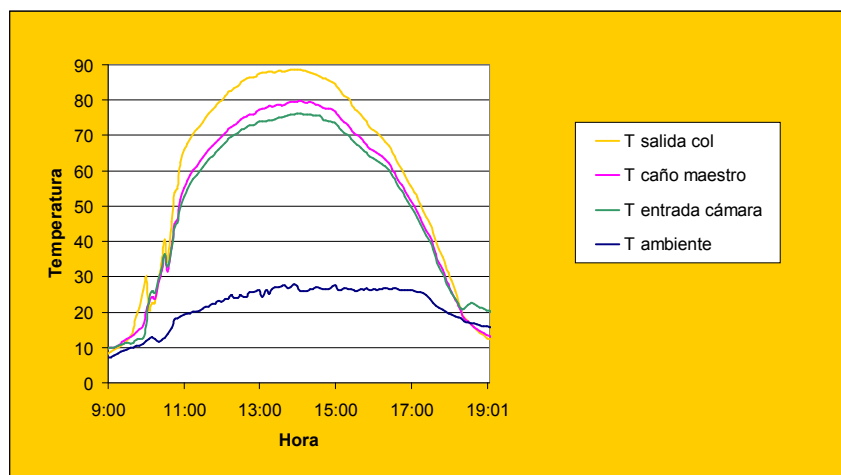


Figura 14: Comparación entre la temperatura ambiente y las temperaturas a la salida del colector, en el caño maestro y a la entrada de la cámara.

Si se consideran los datos entre las 10 y 17 horas, el salto de temperatura es de 30 °C y el calor útil es la mitad. Estos datos indican que es necesario incrementar el flujo de aire para secar 500 kg al día. Al salir del colector se observa que el aire pierde unos 8 °C al pasar por el caño maestro y otros 4 °C al ingresar a la cámara de secado. Esto indica la necesidad de mejorar el aislamiento térmico de estos tramos. Aún así, el aire ingresa en la cámara con algo mas de 75 °C por lo que debe ser enfriado para evitar que queme al producto. Esto se hace mezclando con aire ambiente succionado por el mismo ventilador al abrir la puerta del gabinete donde se encuentra. Otra posibilidad es incorporar otro ventilador para el ingreso de aire ambiente, esto permitiría una forma mas controlada para el mezclado y aumentar el caudal. Con la energía útil con la que se dispone y las horas de funcionamiento por encima de la temperatura límite del producto, es posible secar 500 kg de producto en el día.

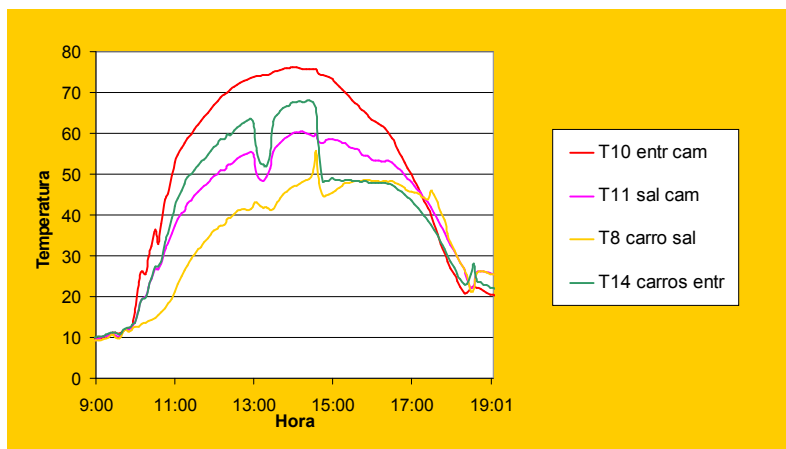


Figura 15: Temperatura en el interior de la cámara de secado.

En la Fig. 15 se muestra el comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara de secado. Las caídas de temperaturas que se observan, especialmente en los carros a la entrada, se deben a que la puerta lateral se abre por los operarios. La caída de temperatura en la cámara es de 15 °C, mientras que la temperatura del aire tomada entre el producto en las bandejas disminuye 25 °C aproximadamente. Esto indica que el aire abandona la cámara de secado sin utilizar todo el potencial. De acuerdo al diagrama psicrométrico, el aire debería abandonar la cámara de secado con una humedad relativa del 70 % y una temperatura próxima a los 30 °C.

Se necesitan modificaciones para que el aire permanezca mayor tiempo en la cámara de secado. Esto se puede conseguir con una salida controlada de aire. Debido a que la separación entre bandejas y entre los carros y las paredes de la cámara es excesiva. Los carros están separados por 5 cm entre ellos y por 10 cm en la parte del techo y el suelo. Se optó por ensayar una modificación para lograr una mejor distribución del aire en el interior de la cámara de secado, la que se describe a continuación.

En la Fig. 16 se muestra las curvas de nivel medidas en la sección transversal a la salida de la cámara de secado, ambas para situación de túnel cargado con acelga manteniendo las puertas cerradas. Se observa en la Fig. de la izquierda, que el flujo se escapa por arriba y por debajo de los carros, las zonas con azul fuerte. En la Fig. de la derecha se muestran los resultados de una mejora sencilla que se introdujo, colocando alrededor del carro pantallas para impedir el paso del aire, de forma que sólo pase por la zona de bandejas. La menor cantidad de zonas claras que se observa está indicando una importante mejora de la distribución del flujo. No obstante todavía se puede optimizar reduciendo la separación entre bandejas, agregando mas bandejas por carro, lo que aumentaría la capacidad de carga y reduciría la temperatura en la cámara de secado.

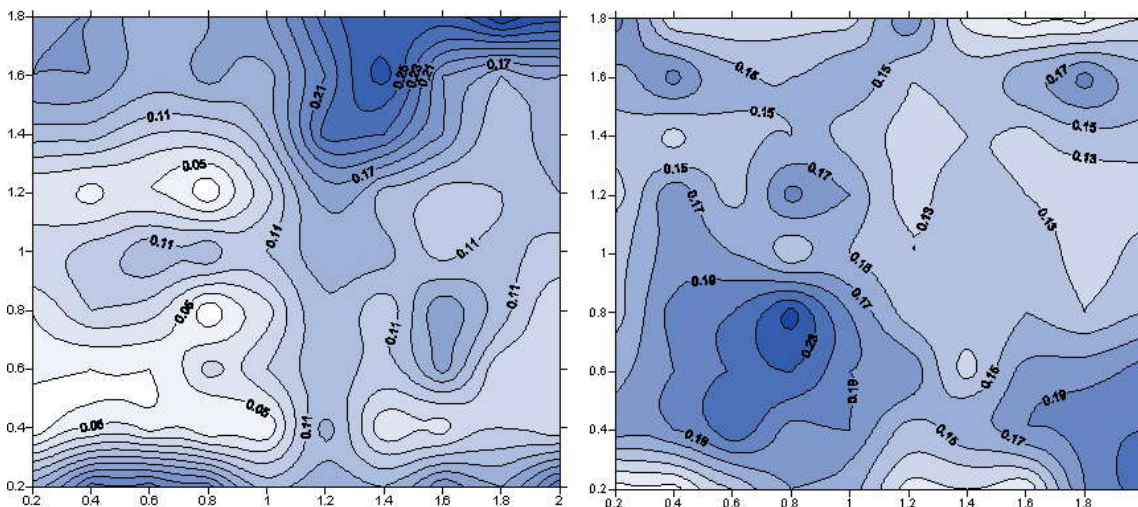


Figura 16: Perfiles de velocidad del aire en el interior de la cámara de secado. Curvas de nivel tomadas en la sección transversal de salida. A la izquierda corresponde a la situación original y a la derecha la situación actual.

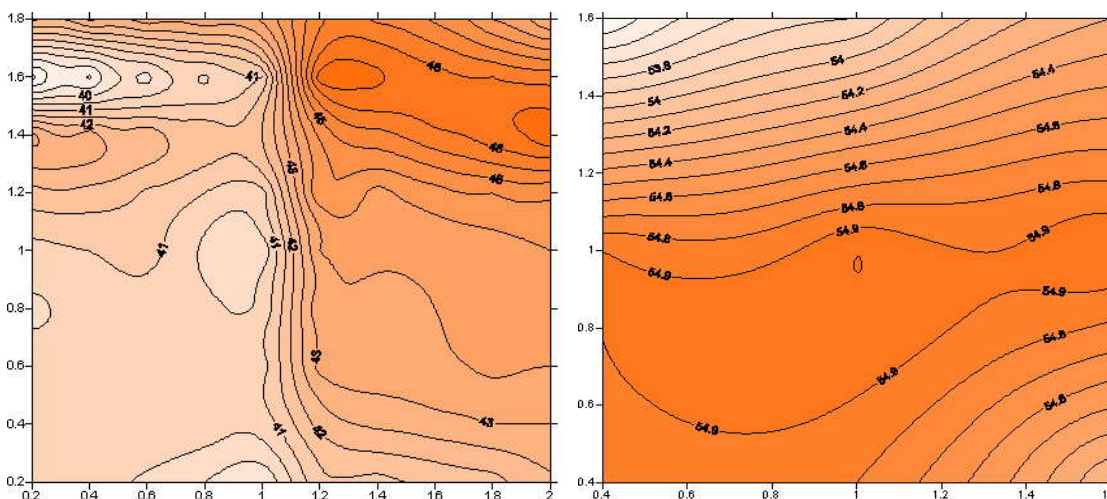


Figura 17: Curvas de nivel de la temperatura del flujo de aire en la cámara de secado. A la izquierda corresponde a la situación original y a la derecha la situación actual.

En la Fig. 17 se muestran las curvas de nivel correspondiente a las temperaturas del ensayo presentado anteriormente. Se observa claramente como la colocación de las barreras entre el contorno de los carros y las paredes de la cámara también mejora la distribución de la temperatura. Mientras que en la Fig. de la izquierda la máxima diferencia entre puntos es de 6 °C y el calor está escapando principalmente por el lado derecho de la cámara. En la Fig. de la derecha se observa que la diferencia de temperatura es del orden de 1 °C, y prácticamente uniforme.

5. COSTOS

En la Fig. 18 se muestran diagramas de los costos de construcción para un solo secador expresado en peso y en dólares. Es decir una unidad consistente de una cámara de secado, seis carros, un caño maestro, un gabinete con filtros y ventilador y un banco de 10 colectores. El costo es de aproximadamente \$ 22000 (US\$ 7139), correspondiendo a precios de materiales y mano de obra obtenidos en la ciudad de Salta, al momento de la construcción.

Del costo total, el mayor porcentaje, casi un 40%, lo constituyen los materiales utilizados en el banco de colectores. Los esfuerzos tendientes a mejorar su eficiencia reducirán el área de colectores y el costo de los mismos. El secador tiene estructuras similares, de chapa, caños y aislamiento térmico, en el caño maestro, la cámara de secado y el banco de colectores. A estas les corresponden el 66% del costo total. Es claro que si se mejora el diseño de estas estructuras optimizando los tamaños para evitar las pérdidas de material, el impacto en el costo final será importante.

Considerando un día y medio el tiempo de secado para 300 kg de producto fresco, con una relación fresco seco de 6 a 1, la producción anualizada para 10 meses de trabajo, puede llegar a los 10.000 kg de producto seco. Considerando además una vida útil para el equipo de 10 años, es decir una depreciación anual de \$ 2200 (US\$ 714), el costo de amortización de la construcción será de \$ 0,22 (US\$ 0,07) por kg seco. Puede ser menor si con las correcciones a implementar se logra secar la carga completa en el día, o aumentar la carga del secador.

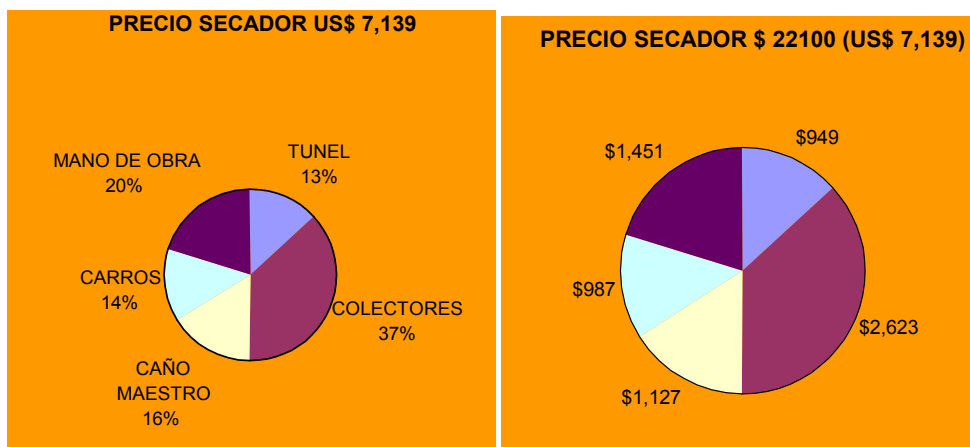


Fig. 18: Cuadro de costos, en montos y porcentajes, para el secador

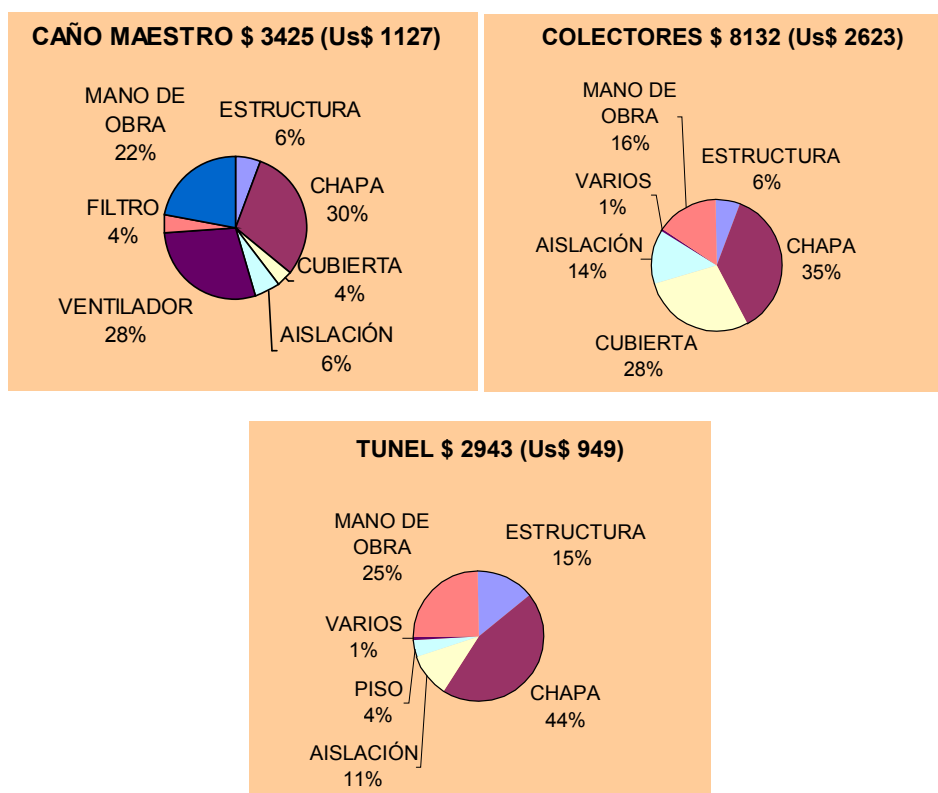


Fig. 19: Análisis de costos por rubros de materiales.

En la Fig. 19 se muestra un detalle de los costos por rubros de materiales utilizados en la cámara, los colectores y el caño maestro. En todos los casos el mayor costo le corresponde a las chapas galvanizadas, siendo la cámara de secado la de mayor proporción de uso, un 44 %. El costo del metro cuadrado de colector es de aproximadamente \$ 100 (US\$ 33), mientras que el de la cámara de secado es de \$ 135 (US\$ 45), considerando las áreas desplegadas de paredes y techos. Una clara posibilidad para reducir costos es un cambio de diseño en el que la cara norte y el techo de la cámara de secado se construyan y utilicen como colectores, con lo que se reduciría el área total de colectores en un 20 % y el costo de la cámara en forma proporcional.

6. PROYECTO DE ENERGIA LIMPIA

A continuación se muestran los resultados del análisis que se obtuvo del funcionamiento de los secadores cuando se los considera como un proyecto de energías limpias. El análisis se realizó mediante el software RESTscreen, y sirve para 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. El software compara el caso base, un secador convencional, contra el caso propuesto que considera la inclusión de energía alternativa.

Como caso propuesto se considera un secador solar con una sola cámara de secado y un banco de 10 colectores. Si bien no había en la planta ningún secador construido anteriormente que utilice energía convencional, se considero a los fines de calcular el ahorro energético un secador de cámara de secado similar pero alimentado con energía eléctrica, ya que la energía eléctrica es la única disponible.

Como costo del sistema solar se considera U\$a 8500 donde se considera una actualización de los costos de mano de obra de emplazamiento, gastos de obras civiles previas y la inclusión de gastos de traslado del equipo.

Del gráfico de flujo de caja acumulado se observa que la inversión se recupera prácticamente en al año de funcionamiento si se considera sólo el ahorro de energía convencional.

Proyecto de calefacción

| Tecnología: Calefactor solar de aire | Unidades | Caso base | Caso propuesto |
|---|-----------|--------------------|--------------------|
| Tipo: | | Secado de cosechas | Secado de cosechas |
| Temperatura interior | °C | 20 | 20 |
| Temperatura del aire - máximo | °C | 50 | 50 |
| Valor R – Techo y pared | m2 - °C/W | 1.2 | 1.2 |
| Velocidad de diseño de flujo de aire | m3/h | 2500 | 2500 |
| Días operación por semana – días de semana | d/sem | 5 | 5 |
| Horas de operación por día – días de semana | h/d | 10 | 10 |

| | | | |
|--|-------|----|----|
| Días de operación por semana – fines de semana | d/sem | 0 | 0 |
| Horas de operación por día – fines de semana | h/d | 10 | 10 |

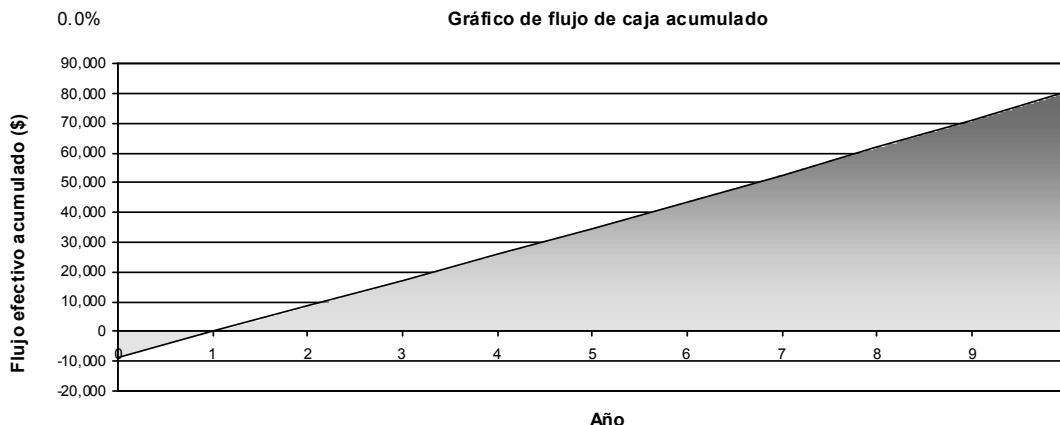
| Porcentaje del mes usado | | | Recurso solar | Rad diaria – horiz | Rad diar - (30°) |
|---|-----------|----------------|---------------|--------------------|------------------|
| Mes | Caso base | Caso propuesto | Mes | kWh/m3/d | kWh/m3/d |
| Enero | 100% | 100% | Enero | 7.13 | 9.21 |
| Febrero | 100% | 100% | Febrero | 6.91 | 8.67 |
| Marzo | 100% | 100% | Marzo | 6.39 | 8.33 |
| Abril | 100% | 100% | Abril | 5.65 | 7.94 |
| Mayo | 100% | 100% | Mayo | 4.88 | 6.61 |
| Junio | 100% | 100% | Junio | 4.49 | 6.39 |
| Julio | 100% | 100% | Julio | 4.74 | 6.68 |
| Agosto | 100% | 100% | Agosto | 5.42 | 7.92 |
| Setiembre | 100% | 100% | Setiembre | 6.54 | 9.03 |
| Octubre | 100% | 100% | Octubre | 7.11 | 9.20 |
| Noviembre | 100% | 100% | Noviembre | 7.55 | 10.07 |
| Diciembre | 100% | 100% | Diciembre | 7.58 | 9.88 |
| | | | Anual | 6.19 | 8.33 |
| Radiación solar anual - horizontal | | | MWh/m3 | 2.26 | |
| Radiación solar anual – inclinado | | | MWh/m3 | 3.04 | |

Calefactor solar de aire Tipo: Vidriado
 Fabricante: INENCO – GIDAI Modelo: Huacalera
 Área bruta por colector solar: 9.2 m²
 Área de captación de colector solar: 9.2 m²
 Coeficiente Fr (tau alfa): 0.6
 Coeficiente Fr UL: 7 (W/m²)/°C
 Número de colectores: 10
 Área de colector solar: 92 m²
 Tarifa de electricidad: 0.089 \$/kWh
 Flujo de ventiladores: 27.2 m³/h/m²
 Flujo del colector solar: 27.2 m³/h/m²
 Temperatura del aire – incremento promedio: 25.3 °C
 Calefactor solar de aire – eficiencia estacional: 45.3%
 Calentamiento entregado: 94.2 MWh

Análisis Financiero
 Parámetros financieros
 Tasa de inflación : 1.0 %
 Tiempo de vida del proyecto: 10 años
Costos iniciales:
 Sistema de calefacción: \$ 8500 100%
 Costos iniciales totales: \$ 8500 100%
Costos anuales / pagos de deuda:
 Costo de combustible – caso propuesto: \$ -1096
Ahorro y renta anuales:
 Costo de combustible – caso base: \$ 7.292
 Total renta y ahorro anuales: \$ 7.292
Viabilidad financiera:
 TIR antes – impuestos – activos: % 100.6
 Pago simple de retorno del capital Año: 1.0
 Repago - capital Año: 1.0

Sistema de calefacción

| | Caso base | Caso prop |
|------------------------|--------------|--------------|
| Combustible | Electricidad | Electricidad |
| Eficiencia estacional | 100% | 100% |
| Consumo anual | 81.9 MW | -12.3 MWh |
| Precio del combustible | 0.089 \$/kWh | |
| Costo del combustible | \$ 7292 | \$ -1096 |



7. CONCLUSIONES

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

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

Otras conclusiones obtenidas del diseño y la construcción de los secadores son las siguientes:

- a) Las cámaras, opacas a la radiación solar, permiten secar una gran variedad de productos vegetales.
- b) El rango de temperatura va de los 30 °C a los 60 °C, con circulación de aire forzada.
- c) La cámara está bien controlada en cuanto a las pérdidas térmicas y a las condiciones de higiene. El aire que ingresa a la cámara está limpio de polvo.
- d) La disposición del producto sobre bandejas y carritos facilita el manejo y el movimiento dentro de la cámara.
- e) Los colectores trabajan orientados respecto a la altitud del sol al medio día solar. Esto permite optimizar la eficiencia de los colectores a lo largo del año.
- f) La duración de los materiales utilizados es diez años, lo que mejora la tasa de retorno de la inversión inicial.
- g) La estructura es firme y resiste adecuadamente la fuerza de los fuertes vientos de la zona.
- h) Un costo de \$ 0,2 por kilo seco permite amortizar el equipo en 10 años de funcionamiento. Cabe la posibilidad de reducir el área de colectores y el costo de construcción en un 20 %.

El mantenimiento del equipo tiene que ver fundamentalmente con la limpieza y la reorientación de los colectores. Con los filtros sintéticos a la entrada de los colectores la necesidad de limpieza se reduce considerablemente, estimándose realizar sólo una limpieza anual. En cuanto a la cubierta transparente, debido a la rigidez del policarbonato, se limpia fácilmente con agua cada día de trabajo del secador.

Los secadores se han operado regularmente, demostrando trabajar satisfactoriamente con los distintos vegetales que se cultivan en la Quebrada de Humahuaca en diferentes épocas del año. El producto seco final es de muy buena calidad y está libre de contaminación de polvo.

8. REFERENCIAS

Mujundar A. (editor). (1987). *Handbook of Industrial Drying*. Marcel Dekker inc., New York.

M. Condorí, R. Echazú, L. Saravia. *Secador solar indirecto con flujo de aire forzado para Huacalera, Quebrada de Humahuaca*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 10, (2), pp. 47-54, ASADES, Argentina, 2006.

R. Echazú, M. Condorí, L. Saravia. *Curvas de Secado experimentales en la planta de deshidratado solar de Huacalera*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 2007. Presentado simultáneamente en esta reunión.

Abstract. *The design and built of two industrial solar dryers tunnel for annual operation Huacalera, Quebrada de Humahuaca are presented. The total load of fresh produce is 500 kg. by dryer. The dryer was tested with loads of grated carrot, chopped onion, diced garlic and various leaves like spinach, leeks, celery, chard and parsley, with very good results in both drying time and the quality of the product. The drying time for sheet products is within a day, but in the case of the stem or tuber requires about half a day.*

Were measured simultaneously airflow temperature in the different sections of the dryer (collectors, and flow duct and drying chamber), relative moisture in the entry and exit of the drying chamber, the horizontal global radiation and wind speed. We also performed follow-up weight of the products that were drying up. The system generates enough energy to complete drying a load of 500 kg fresh product on a sunny day. However, the measures show that the dryers are not using completely the thermal energy available on the solar collectors.

The use of this dryers have occurred regularly, showing work successfully with different plants grown in the Quebrada de Humahuaca in different seasons. The final dry product is of very good quality and free from dust contamination.

An analysis of clean energy project using RETScreen, raising the energy substitution of a drying system as production volume and identical dimensions to the built is presented. The results indicate a return time of the year.