

SISTEMA SOLAR PARA USO ALTERNATIVO
COMO SECADERO O INVERNADERO. DISEÑO Y CONSTRUCCION.

Luis Saravia*, Víctor Passamai y Ricardo Echazú

INENCO#, Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177 - 4400 Salta

Introducción

Las experiencias de secado realizadas en el NOA con tabaco y pimiento han mostrado que los sistemas solares de secado tienen perspectivas económicas si pueden ser usados durante un porcentaje elevado del período anual y si se utilizan colectores de bajo costo.

En este trabajo se presenta un sistema que tiende a satisfacer ambos requisitos, pues consiste en un invernadero de plástico diseñado para permitir su utilización durante el verano como secadero de productos agrícolas y durante el invierno con su función habitual. De esta manera la instalación se encuentra en uso productivo durante la mayor parte del año. Al sistema mencionado se le agregan colectores solares fabricados igualmente con plástico, asegurando de este modo un bajo costo inicial.

En esta etapa se realiza un diseño primario del sistema, al que se le dará el nombre de "secadero de uso múltiple", se describirán los aspectos constructivos en detalle y se darán algunos resultados preliminares.

Este trabajo ha sido encarado en conjunto con Grupos de Energía Solar de diversos países latinoamericanos, España y Portugal, dentro del marco del programa "CYTED-D" iniciado en España con el fin de organizar distintos proyectos de investigación y desarrollo, vinculados con las actividades a realizar en conmemoración del Quinto Centenario del Descubrimiento de América. Bajo la idea común de un sistema de secado de uso múltiple, cada país lleva adelante su propio diseño, construcción y programa de ensayos.

Descripción del secadero de uso múltiple

Las figuras 1 y 2 muestran esquemas del sistema en su configuración como secadero e invernadero, respectivamente. Está formado por una carpa de sección semicircular cubierta con plástico y un colector del mismo material instalado sobre el suelo con un ventilador para el movimiento del aire.

Para el trabajo como secadero la carpa se divide en dos secciones, A y B, donde se instalan bandejas dejando un corredor central. En la primera sección se coloca el producto fresco para su secado, con un alto contenido de humedad. El aire que circula por A es evacuado directamente al exterior, sin recircular, debido a esa alta humedad que

* Investigador del CONICET.

Instituto UNSa.- CONICET

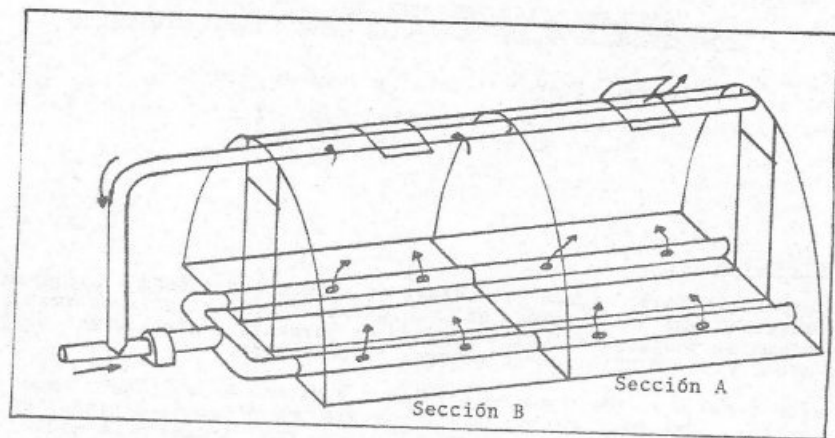


Figura 1: Esquema del secadero con indicación de flujos.

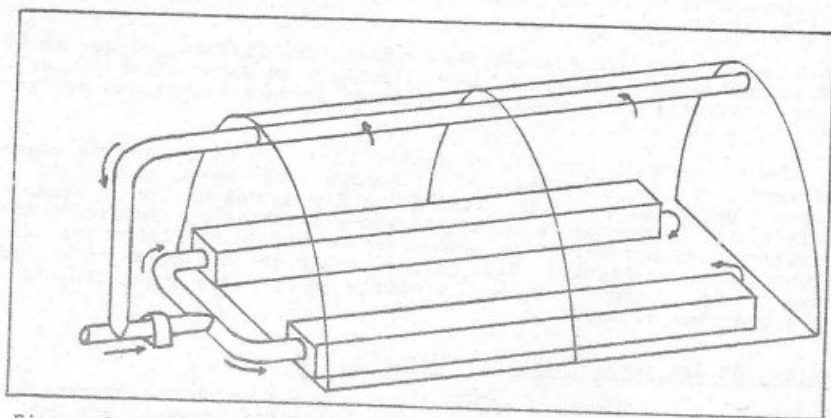


Figura 2: Esquema del invernadero con indicación de los acumuladores y flujos.

adquiere. En la sección B se encuentra el producto que ya fue parcialmente secado y sufre la etapa final de deshidratación. El aire que circula en B extrae poca agua por lo que su humedad relativa de salida es baja y se recircula para aprovechar mejor el calor recogido. Para que el producto pase de una etapa a otra a la mitad del proceso de secado, no se trasladan las bandejas sino que las dos secciones están preparadas para trabajar de una manera u otra en forma alternativa, cambiando compuertas en los caños de circulación de aire.

El aire que deba ingresar al sistema para reemplazar el arrojado al exterior en la sección A entra mediante el ventilador a través de un colector auxiliar que lo precalienta introduciendo un complemento energético además del agregado directamente por la radiación solar a través de las paredes transparentes de la carpa.

La Fig. 3 muestra un esquema de la circulación de aire entre las distintas partes del sistema.

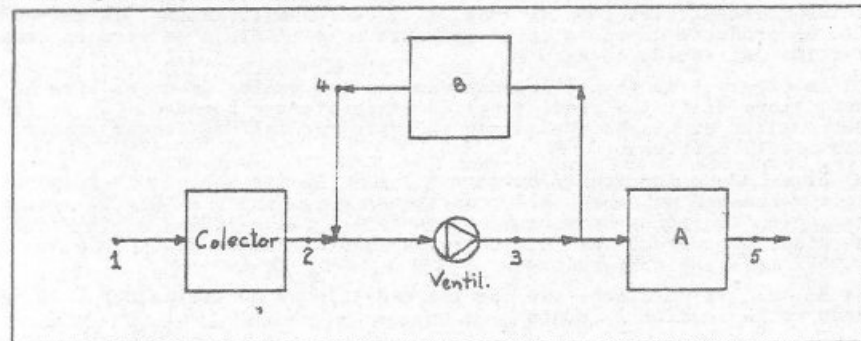


Figura 3: Diagrama de bloques con indicación general de flujos.

La Fig. 2 muestra un esquema en perspectiva de la instalación funcionando como invernadero. En este caso la carpa forma un local único en cuyo suelo se plantan las especies a crecer. Con el fin de controlar la temperatura en la carpa, bajando la temperatura durante el día y evitando que ella caiga en demasía durante la noche, se ha calculado un acumulador fabricado con bloques de hormigón colocados en la parte baja de la carpa. El ventilador recircula el aire, tomado de la parte superior del invernadero, en los acumuladores. También se aprovecha el calor recogido por los colectores, enviándolo a través de los bloques de hormigón. Durante la noche, el ventilador mantiene la recirculación y se va extrayendo el calor del acumulador.

Aspectos constructivos

La carpa se construye con una estructura de caños redondos doblados en forma semicircular con los extremos enterrados en el suelo. El plástico se tira sobre la estructura y se abre una zanja a ambos costados donde se entierra el borde del plástico. Al echar tierra en la zanja el plástico se tensa quedando bien estirado sobre los caños. El prototipo de secadero ha sido colocado en un terreno cercano a la Universidad y por razones de espacio se adoptó un tamaño de 50 m² de superficie, 5 m de ancho por 10 m de largo, con una altura de 2,50 m. Las cañerías de conexión han sido fabricadas con mangueras de 400 micrones de espesor y 30 cm de diámetro, habitualmente utilizadas como mangueras de riego. En las zonas de succión se colocan internamente a

ros de hierro de obra de 4,2 mm de diámetro con el fin de evitar el aplastamiento de las paredes. Este sistema es de muy bajo costo en comparación con cañerías metálicas y tiene una durabilidad aceptable ya que el plástico es de buen espesor.

Se usaron bandejas que fueron construidas para un proyecto de secado de pimienta (1), estando hechas con mallas Sima y un tejido de plástico. Se colocan sobre una estructura armada con madera e hierro.

Diseño preliminar

No es posible encarar un diseño detallado del prototipo a construir utilizando modelos computacionales, ya que se requiere de varios parámetros físicos para cuya determinación se encara la construcción del prototipo. Por lo tanto sólo se realiza un diseño preliminar haciendo uso en forma aproximada de balances globales de masa y energía. Con el fin de encarar la construcción es necesario seleccionar algunos valores básicos tales como el área de colección externa, A_c , la cantidad de producto húmedo a cargar por día M_p y el flujo de aire en cada sección del secadero, \dot{m}_A y \dot{m}_B .

En la figura 3 se identifica con números los puntos donde el aire húmedo tiene distintas condiciones de temperatura y humedad. Con el fin de realizar el diseño preliminar se admitirán las siguientes hipótesis simplificativas:

a) El secadero funcionará durante 6 horas. En ese período la temperatura y humedad ambiente serán constantes e iguales a 20°C y 50%. La radiación también se supondrá constante e igual a 1000 W/m² (21,6 MJ/m² día). La humedad absoluta correspondiente a estos datos será $w_1 = 0,0072$ kg/kg de aire seco.

b) Se buscará un diseño tal que las condiciones de salida del aire húmedo en la sección A (punto 5) sean:

$$T_5 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{v5} = 50 \%$$

$$w_5 = 0,022 \text{ kg/kg}$$

Estas condiciones son razonables ya que por un lado no se suele hacer funcionar la cámara de secado con mayor humedad relativa puesto que hace más lento el proceso de secado y puede dar problemas de crecimiento de hongos. Por otro lado, no es de esperar que se den temperaturas mayores en la cámara ya que ésta no está aislada y produciría muchas pérdidas.

c) Se supondrá que el colector tiene una eficiencia del 30 %, que es el valor obtenido experimentalmente en instalaciones similares.

d) Se supondrá que en las cámaras la radiación incidente se aprovecha en un 70 % ($\tau\alpha$) perdiéndose el resto en el plástico. También se supondrá que el coeficiente convectivo de pérdida térmica en el plástico es $U=12$ W/m²°C, teniendo en cuenta los problemas de condensación parcial en el plástico.

Si M_{H_2O} es la cantidad de agua evaporada por día en las cámaras, se deberá cumplir el siguiente balance de masa:

$$\dot{m}_A (w_5 - w_1) = M_{H_2O} / \Delta t_o$$

donde $\Delta t_o = 6 \times 3600 = 21600$ es el número de segundos en las 6 horas de funcionamiento.

El balance de energía de todo el sistema es aproximadamente:

$$U S (T_5 - T_1) + \dot{m}_A (h_5 - h_1) = \eta I A_c + (\tau\alpha) I A$$

donde A es el área total de la base de la carpa y S es la superficie de plástico de la carpa (50 m² y 78 m², respectivamente).

Se supondrá que:

$$h_5 - h_1 = h_{fg} (w_5 - w_1) + C_p (T_5 - T_1)$$

donde $h_{fg} = 2,4 \times 10^6$ J/kg y $C_p = 1000$ J/kg°C.

Eliminando \dot{m}_A entre las ecuaciones anteriores:

$$U S (T_5 - T_1) + \frac{M_{H_2O}}{\Delta t_o} (h_{fg} + C_p \frac{(T_5 - T_1)}{(w_5 - w_1)}) = \eta I A_c + I A (\tau\alpha)$$

Reemplazando valores de acuerdo a las hipótesis adoptadas:

$$12 \times 78 \times 20 + \frac{M_{H_2O}}{21600} (2,4 \times 10^6 + \frac{10^3 \times 20}{0,0148}) = 0,3 \times 1000 \times A_c + 0,7 \times 100 \times 50$$

$$\text{o sea: } 175,7 M_{H_2O} = 16280 + 300 A_c$$

Esta ecuación define una relación entre dos de los parámetros básicos del problema. Indica que a medida que se aumente el área colectora se podrá secar más producto. Al elegir una de ellas se determina la otra. En el prototipo se tomará un valor $A_c = 20$ m² tratando de respetar el hecho de que el colector sólo cumpla una función auxiliar y sea la cámara la que proporcione el mayor aporte solar. En ese caso resulta:

$$M_{H_2O} = 128,3 \text{ kg}_{H_2O}/\text{día}$$

Conocido M_{H_2O} , el balance de masa determina \dot{m}_A :

$$\dot{m}_A = \frac{M_{H_2O}}{\Delta t_o (w_5 - w_1)} = 0,4 \text{ kg/s}$$

La cantidad de bandejas a instalar dependerá de la velocidad de secado del producto a colocar, lo que se puede dar, por ejemplo, a través del número de días necesarios para completar un secado. Así, suponiendo que le período total de secado es de seis días, habrá que entrar producto por la sección A cada tres días, lo que implica 48 m² de bandejas.

Conocidos M_{H_2O} , \dot{m}_A y A_c , se pueden determinar las condiciones del aire en cada punto del circuito y dibujarse en un diagrama psicrométrico, lo que se ha hecho en la Fig. 4. Las condiciones en 2 se obtienen de la ecuación del colector:

$$T_2 - T_1 = \frac{\eta I A_c}{\dot{m}_A C_p} = \frac{0,3 \times 1000 \times 20}{0,4 \times 1000} = 15 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ o sea: } T_2 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

En 3 se cumplirá, admitiendo que 70 % del agua se evapora en la sección A y 30 % en la B:

$$\dot{m}_A (w_5 - w_3) = \frac{0,7 M_{H_2O}}{\Delta t_o}$$

$$w_3 = 0,022 - \frac{0,7 \times 128,3}{21600 \times 0,4} = 0,0116 \text{ kg/kg}$$

y para la temperatura:

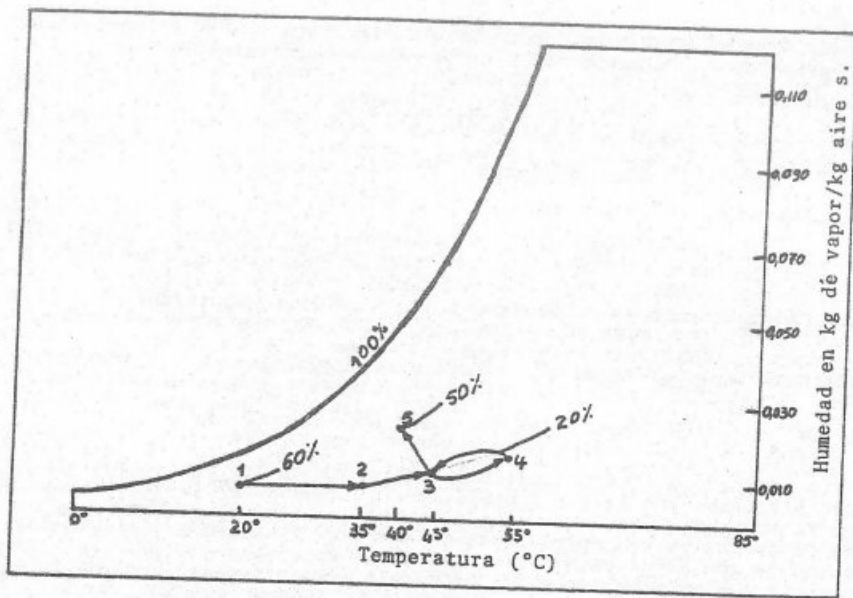


Figura 4: Diagrama psicrométrico. Puntos de interés para el proceso de secado.

$$\dot{m}_A (h_5 - h_3) = () I A / 2 - U S / 2 (T_5 - T_1)$$

$$h_5 - h_3 = (0,7 \times 1000 \times 25 - 12 \times 39 \times (40 - 20)) / 0,4 = 20350 \text{ J/kg}$$

Reemplazando la expresión para las entalpías:

$$2,4 \times 10^6 (0,022 - 0,0116) + 1000 \times (T_1 - T_3) = 20350$$

por lo que: $T_3 = 44,6 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Finalmente, si se toma para \dot{m}_B un valor igual a \dot{m}_A , el punto 4 se obtiene directamente del diagrama psicrométrico, ya que la mezcla de 2 y 4 debe dar 3:

$$w_4 = 0,016 \text{ kg/kg, } T_4 = 54,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Diseño del invernadero

Durante el invierno se usará el colector y ventilador del sistema de secado para calentar un acumulador fabricado con bloques de hormigón de 20 cm de ancho y alto por 40 cm de largo, puestos uno al lado del otro de manera que los orificios centrales formen un conducto por el cual pasa el aire caliente. Los bloques no se cementaron entre sí y se evitan las pérdidas envolviéndolos en un plástico de polietileno negro. Al aire del colector se sumará el aire recirculado del invernadero, tomado de su parte superior. La Fig. 2 muestra la distribución general de flujos de aire para el invernadero con el acumulador.

Cada acumulador tiene una altura de tres bloques de modo que los huecos formen seis ductos por los que circula el aire. La altura total es de 60 cm y va colocado directamente sobre el terreno, con el plástico de por medio. La masa total de bloques es:

$$M = 5500 \text{ kg}$$

lo que equivale a 300 bloques.

Para evaluar si es suficiente calcularemos la energía colectada en julio en Salta (cuando $I = 12 \text{ MJ/m}^2 \text{ día}$, aproximadamente):

$$\text{Energía diaria colectada} = \eta I A = 0,3 \times 12 \times 20 = 72 \text{ MJ/día}$$

Se supone que por recirculación se debe acumular una cantidad similar ya que se circula la misma cantidad de aire y la temperatura es parecida:

$$\text{Energía diaria acumulada} \approx 72 \text{ MJ/día}$$

Si el acumulador pasa de $T_1 = 15^\circ\text{C}$ a $T_2 = 30^\circ\text{C}$ al cargarse, la masa necesaria es:

$$M = \frac{\text{Energía diaria}}{C_p (T_2 - T_1)} = \frac{72 \times 10^6}{1000 \times 15} = 4800 \text{ kg}$$

por lo que la masa de bloques en los dos acumuladores distribuidos es del orden de la necesaria.

En lo que se refiere al coeficiente de transferencia en la superficie del acumulador, se tiene:

$$\text{Energía} = 72 \text{ MJ a entregar en 8 horas}$$

$$\text{Area} = 40 \text{ m}^2$$

$$(T_2 - T_1)_{\text{medio}} \approx 7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

por lo que se necesita un coeficiente de transferencia del calor dado por:

$$h \approx \frac{72 \times 10^6}{40 \times 7 \times 8 \times 3600} = 8,91 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

que se puede conseguir aproximadamente ya que la velocidad del aire en los conductos del acumulador es:

$$v = 0,4 / (0,1 \times 2) = 2 \text{ m/s}$$

Diseño del colector

El colector está cubierto con un plástico de polietileno de 200 micrones de espesor colocándose por debajo de una estructura hecha con malla Sima para evitar el colapso por la succión del ventilador, ya que no se instaló uno a la entrada para que inflase el colector. Una superficie negra cubre el piso para absorber la radiación solar. En este caso se usaron chapas negras dobladas en "V" para aumentar la superficie de contacto, obtenidas de deshecho.

Experiencias preliminares

El plástico transparente usado para la carpa y colectores es de polietileno de origen nacional con agregados para obtener un efecto anti-UV y térmico (supresión de la ventana transparente en el infrarrojo lejano). Se hicieron medidas con un espectrómetro de infrarrojo comprobando la supresión efectiva de la ventana.

Se midió la radiación global sobre plano horizontal, dentro y fuera del invernadero. Los gráficos de las Figs. 5 y 6 muestran los resulta

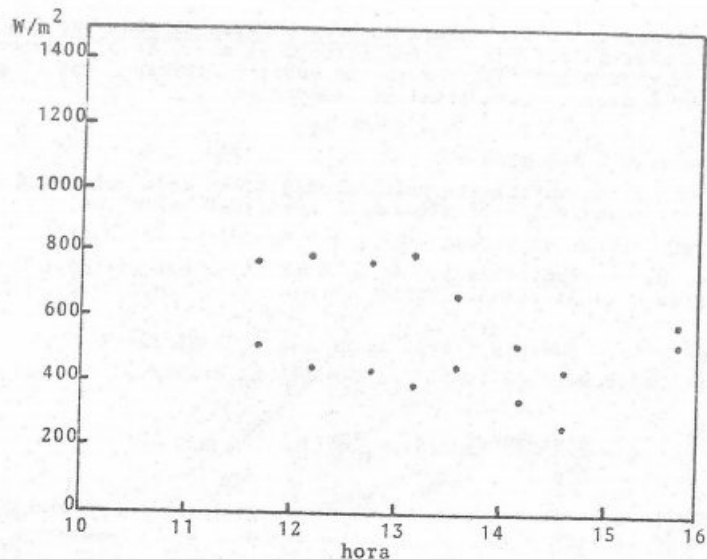


Figura 5: Radiación solar adentro y afuera del invernadero. Día de la medición: 13 de julio de 1987.

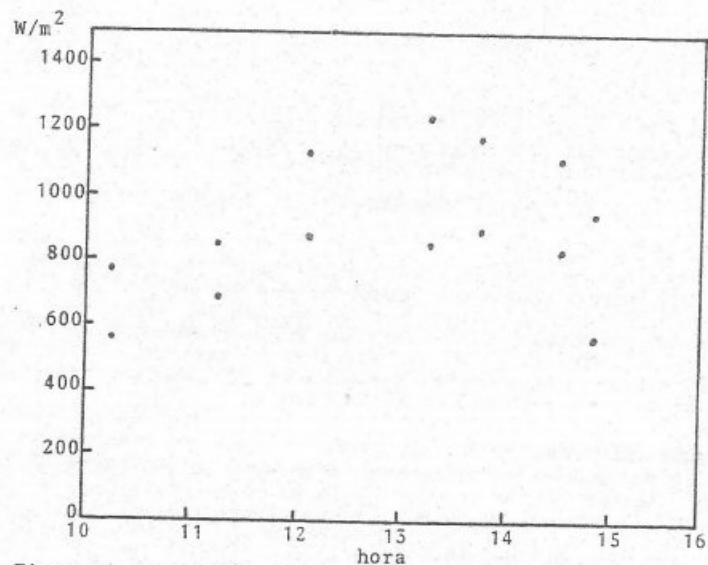


Figura 6: Radiación solar adentro y afuera del invernadero. Fecha: 17 de noviembre de 1987.

dos de estas mediciones con el plástico nuevo y luego de cuatro meses de uso. No se aprecia a la fecha una mayor pérdida de la transparencia.

Construido el colector se realizaron las siguientes mediciones:

- Caudal del aire: $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (medido con anemómetro de hilo caliente de marca "TSI")
- Diferencia de temperatura del aire a la salida y entrada: $18,5 \text{ }^\circ\text{C}$
- Radiación solar global sobre superficie horizontal al mediodía: 1242 W/m^2 .
- Area del colector: $20,6 \text{ m}^2$

Con estos datos la eficiencia instantánea correspondiente es del $26,7 \%$.

Conclusiones

Se plantea un diseño sobre la base de un invernadero de plástico de tipo semicilíndrico. Se supone que este resultará tener un costo muy bajo.

Para el diseño como secadero se han tenido en cuenta los siguientes aspectos básicos:

a) Un colector y ventilador insuflarán aire caliente para completar el calentamiento brindado por la radiación captada por el secadero. El movimiento de aire seco se hará a lo largo del invernadero para evitar estratificaciones debidas a la baja velocidad. El mismo ocurre de abajo a arriba, a través de las bandejas con el material a secar.

b) Durante los últimos días de secado del material el aire sale muy seco ya que se desprende muy poca agua del producto que ya se encuentra casi seco. Aquí se plantea recircular el aire para mejorar la eficiencia térmica. Con ese fin el invernadero se divide en dos cámaras, una con el producto al principio del secado y otra con el producto casi seco. El aire se recircula sólo en la segunda. A medida que se seca el producto se alterna el papel de cada cámara: durante medio período tiene el material húmedo y durante la otra mitad el seco.

c) Dado que las pérdidas por las paredes del invernadero son altas, porque existe una sola capa de plástico, se presume que no se podrán mantener temperaturas tan altas como las que se tienen en túneles con aislación. Por esta razón se supone una temperatura de salida del colector al mediodía de $40 \text{ }^\circ\text{C}$, que es posible aumentar (hasta unos 50°) con colectores sencillos.

Para el diseño como invernadero se ha tenido en cuenta lo siguiente:

a) Se ha aprovechado la instalación del secadero para calentar el invernadero durante la noche. A esos efectos se ubicó un acumulador distribuido por el que pasa el aire caliente de los colectores y el aire caliente recirculado del propio invernadero.

b) Se supone que el ventilador seguirá funcionando por la noche para terminar de extraer el calor del acumulador ya que las pérdidas por convección natural no van a ser suficientes para evacuar el calor.

Referencias

- 1.- Saravia, L. et al.: "Secado de Pimientos: Ensayos Preliminares, Construcción y Ensayo de una Planta Piloto", ASADES, Santa Rosa, La Pampa, 1983.