

USO DE INVERNADERO COMO SECADEROS  
SOLARES: DISEÑO Y CALCULO TERMICO

A. Iriarte\*, S.B. de Biagi y V. García  
INENCO, Unidad de Investigación Catamarca\*\*  
Facultad de Ciencias Agrarias - UNCa.  
4700 - Catamarca

J. Sequi y C. Rodríguez  
Secretaría de Ciencia y Tecnología  
4700 - Catamarca

RESUMEN

La necesidad de rentabilizar los procesos de secado de productos agrícolas utilizando energía solar, hace imprescindible repartir los costos de infraestructura con otro tipo de actividades complementarias.

En ese sentido, en el NOA, en los últimos años se han desarrollado a nivel experimental una serie de prototipos de invernaderos - secaderos para el estudio de las condiciones de trabajo necesarias para que los mismos cumplan con las características que garanticen la rentabilidad del proceso.

En el presente trabajo se analiza teóricamente el comportamiento térmico de un invernadero de dimensiones equivalente a los que actualmente se encuentran en producción como si el mismo fuera un colector solar plano. Se realiza un ajuste de los parámetros convectivos en base a los valores medidos de temperatura ambiente, radiación, caudal másico, y temperatura promedio del fluido en el interior del módulo. Se calcula la eficiencia y el calor disponible. En base a los resultados obtenidos se determinan las características térmicas para el secado de uva tipo "Sultanina".

INTRODUCCION

En los últimos años, los problemas derivados de la rentabilidad del proceso de secado de los productos agrícolas a escala industrial y semi industrial ha sido la preocupación de los grupos de trabajo que se han abocado al estudio del tema. Sin embargo en su gran mayoría la intensificación del estudio y desarrollo se ha mantenido a nivel de modelo a escala experimental con escasa o nula transferencia de tecnología al sector productivo. Si bien en casi todas las experiencias se contó con la participación de productores, las mismas no fueron más que ensayos de adaptación de prototipos de tamaño reducido.

Un aspecto importante a tener en cuenta particularmente en la provincia de Catamarca, es que en su gran mayoría y especialmente en el secado de uva, la actividad no se desarrolla con caracterís-

\* Miembro de carrera del CONICET

\*\* Convenio UNCa. - UNSa. - CONICET

Parcialmente financiado por SECYT

Parcialmente financiado por SEDECYT - UNCa.

tica agroindustrial, sino como una actividad de "descarte" y por grupos sociales de muy escasos recursos calificándola como una actividad de subsistencia.

En consecuencia la falta de "convivencia" con los productos, la baja rentabilidad de los productos desecados y los grupos sociales de potenciales usuarios, obligaron a replantear el enfoque del problema.

En primer lugar, aportar soluciones tecnológicas para eficientizar, a bajo costo, la producción de producto desecados para los productores de escaso recursos y de esta forma permitirles mejorar su nivel de vida<sup>(1)</sup>.

Esta alternativa permite que los mismos a medida que obtienen mayor rentabilidad mejoren la calidad de secado y continúen su "mejora" tecnológica.

Por otro lado, si se quiere "producir" productos deshidratado por vía solar de alta calidad es necesario en primer lugar disminuir los costos del secado, esto es, infraestructura y operación, por cuanto son elevados para los niveles de rentabilidad de los productos.

Es de notar que simultáneamente a la depresión económica permanente que sufre la actividad del secado de productos agrícolas, se advierte, principalmente en el NOA, que en los últimos años se ha incrementado notablemente los emprendimientos agrícolas cuya principal actividad, es la producción frutihortícola bajo cubierta, esto es la utilización de invernaderos para la producción de cultivos controlados y especialmente no tradicionales. Este tipo de alternativa resulta particularmente atractiva.

Es claro que se trata de sistemas rentables de producción agrícola, de una gran inversión inicial en infraestructura y que además dispone de cuatro meses (Diciembre - Marzo) con su infraestructura ociosa.

Del análisis de ambas actividades, se advierte que son complementarias, resultando que una expansión del emprendimiento productivo a una agroindustria en los meses donde la infraestructura de los invernaderos se utiliza para el secado de productos agrícolas, puede favorecer la economía del sistema.

La experiencia a nivel de prototipo indica que esta idea tiene buenas perspectivas económicas y puede alcanzar un nivel adecuado de transferencia al medio rural y especialmente a los productores de cultivos bajo cubierta, quienes aumentarían en forma importante la rentabilidad de sus instalaciones.

La etapa que aún no ha sido explorada y es fundamental, es el desarrollo de alternativas de integración a nivel de experiencias con tamaño real, esto es, invernaderos en producción que son adaptados para su uso en el proceso de secado.

El sistema propuesto consiste en considerar dos componentes básicos, el colector invernadero y el gabinete o recinto de secado. Este puede tener diferentes formas de integración, esto es:

a) Gabinete incorporado al invernadero tipo túnel

- b) Gabinete incorporado al invernadero tipo simple cámara
- c) Gabinete incorporado al invernadero tipo doble cámara
- d) Gabinete externo al invernadero.

En lo que se refiere al colector invernadero existen diversas formas de transformación de un invernadero en colector solar térmico<sup>(2)</sup>, distinguiéndose básicamente dos de ellas, una con la incorporación de una superficie negra que se extiende en el interior haciendo las veces de placa colectora, mientras la estructura plástica hace las veces de cubierta y ducto de circulación del aire; la otra es usar mangas de plástico negro distribuidas en el interior del invernadero, sirviendo como ductos de aire y utilizando la estructura de cubierta como aislación térmica y cubierta del colector.

En el presente trabajo se realiza una análisis teórico del invernadero como si el mismo se tratara de un colector plano del aire convencional, según las ecuaciones sugeridas por Hottel - Whiller - Bliss<sup>(3)</sup>, estudiando su comportamiento con las ecuaciones básicas de balance térmico y transferencia de calor, con el fin de encontrar un método sencillo que permita obtener suficiente información para el dimensionamiento del secadero. A través de las ecuaciones es posible realizar el balance energético y obtener la ganancia de energía del invernadero colector solar permitiendo calcular la temperatura de trabajo.

Para realizar el estudio teórico-experimental se considera un módulo de tamaño productivo ubicado en la Estación Experimental del INTA - Catamarca, donde se miden los parámetros necesarios: temperatura media del aire interior, caudal másico de aire, temperatura ambiente y radiación que permiten obtener fácilmente las características térmicas del invernadero - colector mediante la simulación numérica de las ecuaciones de balance.

Cabe señalar, que éste método permite evaluar el comportamiento del sistema disponiendo de datos promedios, fáciles de obtener.

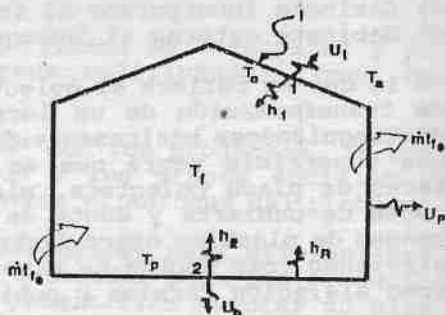
## ANÁLISIS TÉRMICO

Consideremos un invernadero, como el de la fig. 1 por cuyo interior circula un flujo de aire impulsado por un forzador. El invernadero está ubicado con su eje en dirección este-oeste, de forma tal que una de las caras laterales queda orientada al Norte.

La cubierta es de plástico transparente del tipo larga duración térmica (LDT) de 150 micrones de una transmisividad de  $\tau = 0,75$ , placa absorbidora cuya absorvancia se asume de  $\alpha = 0,80$ . El aire ingresa por el extremo oeste y circula paralelo al eje, saliendo por el Este.

La radiación solar que ingresa al invernadero es absorbida por el piso a una temperatura  $T_p$ . Esta energía es transferida por convección al aire circundante a través de un coeficiente  $h_2$  y por conducción  $U_b$  a la tierra. Asimismo intercambia radiación con el techo a través de  $h_r$ .

Por otro lado, el fluido transfiere energía a la cubierta ( $h_1$ ) y pierde al ambiente a través de coeficiente combinado  $U_t$  (arriba) y  $U_p$  por los laterales. En este extremo se considera que la influencia mayor es el que corresponde al coeficiente del viento:



Con el objeto de analizar el proceso desde el punto de vista energético, realizamos los balances sobre cada componente:

Sobre cubierta (techo)

Figura N° 1

$$U_t(T_a - T_c) + h_r(T_p - T_c) + h_1(T_f - T_c) = 0 \quad (1)$$

Sobre piso

$$S_f + U_b(T_a - T_p) + h_2(T_f - T_p) + h_r(T_c - T_p) = 0 \quad (2)$$

En el fluido  $q_u = h_1(T_c - T_f) + h_2(T_p - T_f)$

Resolviendo las ecuaciones anteriores podemos expresar que en función de  $U_t$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_r$ ,  $T_f$  y  $T_a$ , por lo tanto;  $q_u = F'[S - U_L(T_f - T_a)]$

en donde: 
$$F' = \frac{h_r h_1 + h_2 U_t + h_2 h_r + h_1 h_2}{(U_t + h_r + h_1)(U_b + h_2 + h_r) - h_r^2}$$

y 
$$U_L = \frac{(U_t + U_b)(h_2 h_r + h_r h_1) + U_b U_t (h_2 + h_1)}{h_2 U_t + h_2 h_r + h_2 h_1 + h_1 h_r} + U_p$$

en donde  $U_p$  es el coeficiente de pérdida por las paredes laterales, le asignamos mayor peso por la acción del viento. De ahí que;

$$U_p = \frac{A_{lat}}{A_{colec}} h_w$$

Los coeficientes de transferencia de calor por convección,  $h_1$  y  $h_2$  se obtienen de la relación:  $h = \frac{k}{L} C(GrPr)^n$

en donde  $C$  y  $n$  son coeficientes experimentales.

Gr: número de Grashof; Pr: número de Prandtl.

Para superficie inclinada  $C = 0,12$  y  $n = 1/3$

Para superficie horizontal  $C = 0,14$  y  $n = 1/3$

El coeficiente de pérdida hacia arriba  $U_t$  se calcula a partir de

$$U_t = \left( \frac{1}{h_{r,c-a} + h_w} \right)^{-1}$$

donde;  $h_{r,c-a} = \epsilon_c \sigma (T_c^2 + T_s^2) (T_c + T_s)$ .

donde  $T_s$  es la temperatura de cielo, definida por;  $T_s = 0.00552 T_a^{1.5}$ ;  $T_c$ ,  $T_s$  y  $T_a$  se toman en Kelvin,

Para calcular el coeficiente de transferencia por radiación entre la placa y la cubierta se utilizó la ecuación.

$$h_r = \frac{\sigma (T_p^2 + T_c^2) (T_p + T_c)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1}$$

$T_p$  y  $T_c$  se expresan en Kelvin.

Teniendo en cuenta que los valores medidos son:  $T_{f,i}$ ,  $T_a$ ,  $\dot{m}$ ,  $s$  y  $\alpha_r$ , mientras que  $T_p$  y  $T_c$  son estimados, es necesario realizar un proceso iterativo.

Para calcular la temperatura de placa utilizamos la ecuación;

$$T_{p,m} = T_{f,i} + \frac{Q_u/A_c}{U_L F_R} (1 - F_R) \quad \text{con } T_{f1} = T_a$$

Y mediante el balance térmico sobre la cubierta;

$$U_t (T_c - T_a) = U_L (T_p - T_a)$$

se puede calcular  $T_{cm}$  en función  $T_{pm}$  como sigue;

$$T_{c,m} = T_a + \frac{U_L}{U_t} (T_{p,m} - T_a)$$

De esta manera, es decir considerando el invernadero como un colector solar plano, podemos determinar usando fórmulas conocidas, los distintos parámetros de trabajo.

#### ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el estudio teórico se ha considerado un módulo de un invernadero tamaño productivo de 20 m de largo, 16 m de ancho y una altura de 3.5 m, con una superficie plana - colectora de 320 m<sup>2</sup>.

La cubierta es de plástico transparente del tipo: "larga duración térmica" - LDT - de 150 micrones de espesor, con un polietileno negro de 200 micrones recubriendo el piso, que cumple la función de placa absorbadora. Se asume un valor medio del producto transmitancia - absorbancia de 0.6.

En la figura N° 2, se muestra la variación en función del tiempo de



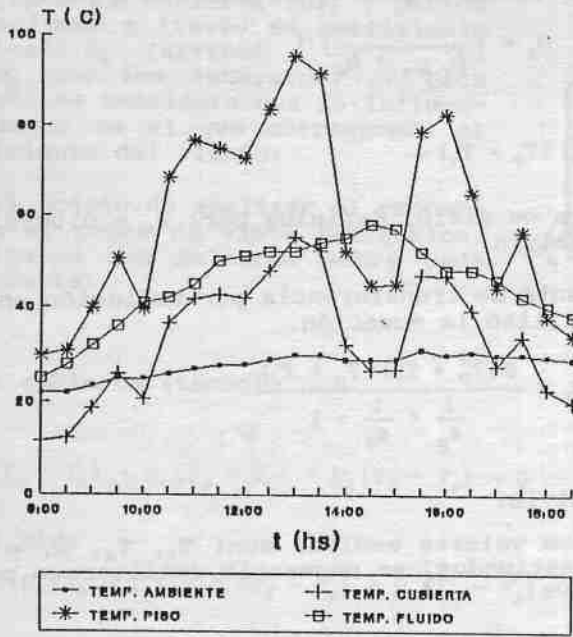


Figura N° 2

prendidos entre 9.30 - 10 hs; 11 - 12 hs; 13 - 15 hs y 16 - 17 hs., a pesar de que no hay disminución de radiación o de la temperatura ambiente significativas. Sin embargo, se advierte que durante los intervalos señalados, la temperatura media del fluido medido en diferentes puntos del interior del invernadero, no aumenta o disminuye acorde a la variación horaria de la radiación. Del análisis de las condiciones externas, se advierte que durante los intervalos en cues-

parámetros medidos como la temperatura media del fluido y la temperatura ambiente, en contraste con los valores calculados por el modelo simulado como son temperatura de placa y de cubierta. Asimismo, en la figura N° 3, se observa la eficiencia horaria y el calor útil disponible en función del tiempo, en contraste con la radiación total incidencia horaria sobre superficie horizontal.

En ambos casos, se advierte caídas muy bruscas de los datos calculados por el modelo en los intervalos com

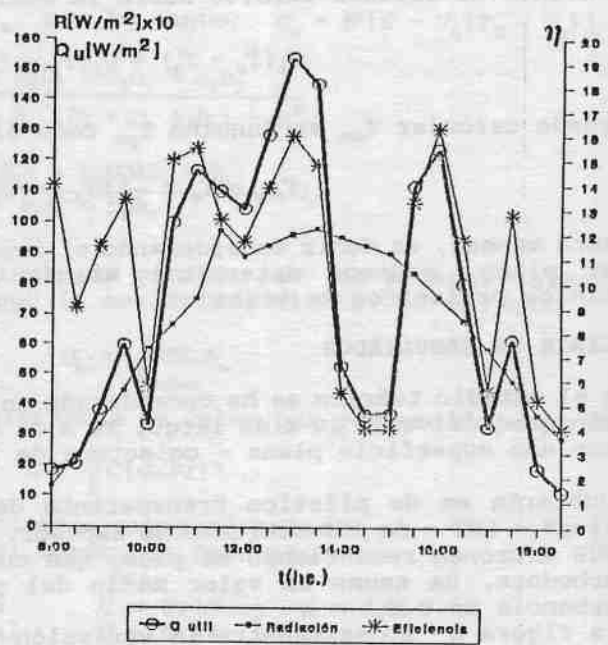


Figura N° 3

ción, estuvieron presentes fuertes ráfagas de viento que sacuden los plásticos y provocan una pérdida importante de calor que se manifiesta con una disminución de la temperatura del aire en el interior del invernadero. En consecuencia, como en el modelo no se ha tenido en cuenta ésta situación, el balance energético para poder cerrar, baja la temperatura de placa, cubierta y aumenta el coeficiente de pérdida

En la Tabla N° I, se detalla los valores características promedio y globales del invernadero - colector. Asimismo, se muestran los parámetros calculados, en base a los datos obtenidos, para el dimensionamiento del secadero.

TABLA N° I

| INVERNADERO - COLECTOR                       |                                       |
|--|---------------------------------------|
| Radiación global incidente.                  | 26.16 Mj/m <sup>2</sup> día           |
| Energía total incidente.                     | 8.371,20 Mj/día                       |
| Transmitancia - Absorvancia - Cubierta.      | 0,60                                  |
| Caudal másico de aire en colector.           | 0,65 kg/seg                           |
| Coefficiente de pérdida - Cubierta.          | 27,07 W/m <sup>2</sup> °C             |
| Coefficiente global de pérdida.              | 16,39 W/m <sup>2</sup> °C             |
| Factor de eficiencia - Colector.             | 0,62                                  |
| Factor de remoción del calor.                | 0,125                                 |
| Energía útil - disponible.                   | 918.104 Mj/día                        |
| Temperatura media - fluido.                  | 45,00 °C                              |
| Temperatura media - Placa.                   | 58,70 °C                              |
| Temperatura media - Cubierta.                | 33,17 °C                              |
| INVERNADERO - SECADERO                       |                                       |
| <b>Producto: UVA SIN SEMILLA - SULTANINA</b> |                                       |
| Calor global de vaporización.                | 12,3 Mj/kg H <sub>2</sub> O extraída. |
| Peso inicial/final de la carga.              | 300/66 kg                             |
| Fracción de pérdida.                         | 0,78                                  |
| Humedad final base seca.                     | 0,47                                  |
| Caudal másico de aire en secadero.           | 0,65 kg/seg                           |
| Energía aportada (solar).                    | 2.878,2 Mj.                           |
| Energía aportada (auxiliar).                 | - - -                                 |
| Energía total necesaria.                     | 2.878,2 Mj                            |
| Temperatura media de entrada.                | 45 °C                                 |
| Duración efectiva de secado.                 | 32 hs - 10,5 hs/día                   |
| Nivel de recirculación.                      | 0%                                    |

Analizando los resultados obtenidos, las mayores pérdidas de calor están en los laterales asociadas con el viento. Las otras pérdidas significativas son las debidas a la convección, dada la geometría de los invernaderos que exponen grandes superficies al intercambio térmico.

En general el modelo puede considerarse satisfactorio y sencillo para ponerlo en práctica, cumple con el objetivo de que es una herramienta rápida para evaluar el comportamiento del invernadero como colector. Será necesario ajustar parámetros para preveer las variaciones por ráfagas de viento, las cuales se estiman muy fuertes. Es de destacar

que comparando los rendimientos obtenidos con los de un colector solar plano, se puede observar que son bastante menores.

#### NOMENCLATURA

|              |  |                                     |
|--------------|--|-------------------------------------|
| $h_w$        | = Coeficiente de convección por viento.        | [W/m <sup>2</sup> °C]               |
| $h_1$        | = Coeficiente de convección, cubierta - aire.  | [W/m <sup>2</sup> °C]               |
| $h_2$        | = Coeficiente de convección, placa - aire.     | [W/m <sup>2</sup> °C]               |
| $h_{r,c-a}$  | = Coeficiente de radiación cubierta - cielo.   | [W/m <sup>2</sup> °C]               |
| $h_r$        | = Coeficiente de radiación placa - cubierta.   | [W/m <sup>2</sup> °C]               |
| $U_c$        | = Coeficiente de pérdida de cubierta.          | [W/m <sup>2</sup> °C]               |
| $U_p$        | = Coeficiente de pérdida por laterales.        | [W/m <sup>2</sup> °C]               |
| $U_b$        | = Coeficiente de pérdida por el suelo.         | [W/m <sup>2</sup> °C]               |
| $A_{lat.}$   | = Area lateral del colector.                   | [m <sup>2</sup> ]                   |
| $A$          | = Area de colección                            | [m <sup>2</sup> ]                   |
| $m$          | = Flujo másico de aire.                        | [kg/seg]                            |
| $U_L$        | = Coeficiente global de pérdidas del colector. | [W/m <sup>2</sup> °C]               |
| $S_f$        | = Fracción de energía solar incidente.         | [W/m <sup>2</sup> ]                 |
| $K$          | = Conductividad de aire.                       | [W/m <sup>2</sup> °C]               |
| $L$          | = Longitud característica.                     | [m]                                 |
| $\sigma$     | = Coeficiente de Stefan.                       | [W/m <sup>2</sup> °K <sup>4</sup> ] |
| $\epsilon_p$ | = Emitancia de placa.                          |                                     |
| $\epsilon_c$ | = Emitancia de cubierta.                       | [°C]                                |
| $T_p$        | = Temperatura de placa.                        | [°C]                                |
| $T_c$        | = Temperatura de cubierta.                     | [°K]                                |
| $T_s$        | = Temperatura de cielo.                        | [°C]                                |
| $T_{p,m}$    | = Temperatura media de placa.                  | [°C]                                |
| $T_{c,m}$    | = Temperatura media de cubierta.               | [°C]                                |
| $T_m$        | = Temperatura ambiente.                        | [°C]                                |
| $c_p$        | = Calor específico del aire.                   | [J/kg °C]                           |

#### REFERENCIAS

- (1) A. Iriarte, V. García et. al: "SECADOR NATURAL DE PRODUCTOS AGRICOLAS". ASADES. Catamarca.
- (2) A. Arata. "USO DE INVERNADEROS COMO FUENTE COLECTORA DE ENERGIA SOLAR"
- (3) J. Duffie - W. Beckman. "Solar Engineering of Thermal Processes" - 1.980.