

PERFORMANCE Y DISEÑO DE SECADORES INVERNADEROS DE CONVECCION FORZADA

L. Saravia*, L. Zunino° y R. Echazú

INENCO+
Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177
4400, Salta, Argentina

RESUMEN

En el presente trabajo se determina analíticamente la capacidad de secado de los secadores invernaderos de convección forzada y cámara única o doble cámara, como función de las variables meteorológicas de interés en el proceso: temperatura ambiente, humedad ambiente y radiación solar. Se introduce el concepto de performance del secador y se demuestra que puede expresarse en función de un único parámetro que agrupa las tres variables mencionadas. Se comprueban experimentalmente las expresiones obtenidas presentando los ensayos de un secador de 50 m² de área de piso. Finalmente se discute como encarar el proceso de diseño de estos sistemas teniendo en cuenta tres aspectos: la masa de agua evaporada, la necesidad de que la humedad relativa dentro del secador no sobrepase límites que inducen a la formación de hongos y el goteo de agua condensada en el techo, y la selección del flujo de aire para que el consumo eléctrico de los ventiladores sea moderado.

INTRODUCCION

Este tipo de secador hace uso de la estructura de un invernadero colocando bandejas con producto en su interior a fines de lograr su secado. La circulación de aire que elimina la humedad se obtiene mediante convección natural con la adecuada colocación de ventanas o chimeneas, o por convección forzada mediante ventiladores.

Existen diversos ejemplos publicados de este tipo de secadero(1,2,3), que presenta algunas ventajas potenciales: el secado con radiación directa da lugar a un mejor aprovechamiento de la misma, permite atender el secado de producciones intermedias con costos iniciales muy bajos, situándose entre los secadores pequeños de gabinete y los mayores que hacen uso de colectores y túnel de secado, la estructura puede ser usada como invernadero durante la temporada fría aumentando la rentabilidad total del equipo. En lo que sigue se discutirán únicamente los secadores de convección forzada.

La forma más sencilla de secaderos de este tipo se ilustra en la figura 1. Consta de una cámara de paredes transparentes, usualmente utilizada como invernadero, dentro de la cual se colocan bandejas con el producto a secar, el cual es calentado durante el día por acción de la radiación solar que recibe a través del techo y paredes. Un ventilador toma aire a temperatura ambiente, el que circula alrededor del producto llevándose el vapor de agua que se escapa del mismo. Este equipo trabaja en forma discontinua, cargándose todo el producto fresco en forma simultánea para luego esperar varios días hasta lograr el secado requerido. La energía solar es aprovechada totalmente el primer día, cuando se produce el máximo de evaporación, pero luego baja la eficiencia en su uso, ya que disminuye la evaporación por el incremento de la resistencia que opone el producto a la eliminación del agua.

* Investigador del CONICET, Argentina

° Becaria del CONICET, Argentina

+ Instituto UNSa - CONICET



Figura 1 - Secadero-invernadero de una sola cámara

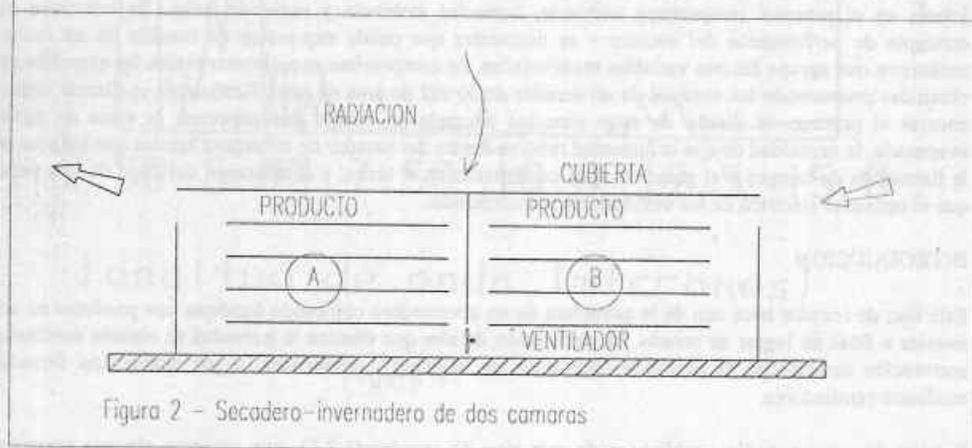


Figura 2 - Secadero-invernadero de dos cámaras

Un diseño tendiente a mejorar la productividad ha sido propuesto recientemente (4), y se muestra en la figura 2. En él se divide la estructura del secadero en dos cámaras, colocándose un ventilador de flujo reversible en la pared divisoria. En un cierto momento se encuentra en la primera cámara producto semiseco proveniente de la etapa anterior de funcionamiento, mientras que en la segunda cámara se coloca producto fresco, en una cantidad equivalente a la que en el primer tipo de diseño se colocaba en todo el invernadero. El aire circula inicialmente a través de la primera cámara, la que cumple dos funciones. Por un lado hace las veces de un colector precalentador para el aire entrante. Por otro, termina de deshidratar el producto semiseco. Esta última función aumenta ligeramente el contenido de humedad del fluido. Luego, el aire atraviesa la segunda cámara donde el producto fresco lo carga de humedad. Después de un tiempo del orden de la mitad del período de secado total del producto, la carga en la primera cámara está totalmente seca y la de la segunda se encuentra semiseca. Se descarga la primera cámara, se carga en ella producto fresco, se invierte la dirección de marcha de los ventiladores y se reinicia el proceso. Se cumple un proceso similar al anterior con la única diferencia de que el papel de las dos cámaras se ha intercambiado. Como se aprecia, esta estrategia de uso prácticamente duplica la capacidad de secado ya que el secador se carga dos veces en cada período completo de secado. Se ha logrado esta mejora al aprovechar integralmente la radiación solar durante un mayor período de tiempo en comparación con el secador de una sola cámara.

En el presente trabajo se realiza un estudio analítico del comportamiento térmico de los dos diseños con el fin de determinar sus capacidades de secado como función de las variables meteorológicas relacionadas con el proceso: temperatura ambiente, humedad absoluta ambiente y radiación solar. Se demuestra que dicha capacidad puede expresarse como una función de un solo parámetro que comprende las tres variables mencionadas, a la que se le da el nombre de función característica del secador invernadero. Se

puede establecer un paralelismo entre la función característica recién definida y la que se utiliza en relación con los colectores planos, donde la eficiencia del colector también queda como función de las variables externas de interés (5).

Con el fin de comprobar experimentalmente las expresiones obtenidas, se presenta un ensayo con un secador invernadero de 50 m² de superficie. Para evitar la falta de uniformidad habitual en el producto disponible a lo largo de sucesivos ensayos, se ha simulado el mismo con bandejas negras llenas de agua. Se discute la forma de realizar los ensayos para determinar la función característica.

Finalmente se discuten las posibilidades de diseño de estos sistemas utilizando las ecuaciones obtenidas en las secciones anteriores. En el diseño se procura determinar los tres parámetros básicos: área del secador, flujo de aire a través del mismo y masa de producto a cargar. A estos efectos se considera a la humedad relativa en la cámara de secado como una variable importante. Un valor excesivo de la misma produce la formación de hongos sobre el producto y el goteo de agua condensada en el techo del invernadero sobre el material a secar.

SECADOR INVERNADERO DE UNA CAMARA

Las principales variables y parámetros que intervienen en el proceso térmico se listan en la tabla I.

Tabla I - Lista de variables y parámetros que caracterizan el funcionamiento del Secadero Invernadero de una cámara.

Variables meteorológicas

t_a = Temperatura ambiente

W_a = Humedad absoluta ambiente

I = Radiación solar instantánea

Parámetros geométricos

A_s = Área del suelo del secadero

A_c = Área de la cubierta transparente

A_{pd} = Área de producto por la cual se intercambia vapor de agua

A_{pt} = Área de producto por la cual se intercambia calor

A_{pi} = Área de producto que recibe radiación solar

Parámetros térmicos

q_f = Calor de cambio de fase de agua

C_p = Calor específico del agua

h_0 = Coeficiente convectivo de la cubierta

h_p = Coeficiente convectivo de las superficies del producto

h_{pd} = Coeficiente másico de pérdida de calor de agua

α_1 = Porcentaje de la radiación incidente, absorbida por la cámara

α_2 = Porcentaje de la radiación incidente, absorbida por el producto

m_a = Flujo másico de aire circundante

Variables a determinar

t_2 = Temperatura de bulbo seco de la cámara

w_2 = Humedad absoluta de la cámara

t_p = Temperatura del producto en la cámara

m_w = Masa de agua evaporada por segundo

A continuación se detallan las ecuaciones que determinan el funcionamiento del secador. Solo se tendrán en cuenta los fenómenos físicos de mayor importancia, tratando de obtener una expresión analítica simple para la masa de agua evaporada por segundo, m_w , que muestra explícitamente la influencia de las variables meteorológicas en función del equipo.

El balance másico de agua en el aire que circula está dado por:

$$mw = ma.(w_2 - w_a) \quad (1)$$

donde se supone que dentro de la cámara se logran condiciones uniformes para las variables térmicas, indicadas por el subíndice 2.

La evaporación de agua del fruto se supondrá regida por la siguiente ecuación de transferencia de masa:

$$mw = A_{pd}.h_d.(w_s(t_p) - w_2) \quad (2)$$

donde se supone que el fruto se encuentra a una temperatura uniforme t_p y A_{pd} es el área de fruto que interviene en el proceso de evaporación. $w_s(t)$ es la humedad absoluta de saturación correspondiente a la temperatura t .

Se está admitiendo que el proceso de evaporación de agua en el fruto es similar al que ocurre en una superficie libre de agua. Para cada fruto habrá que determinar el valor más conveniente para h_d por vía experimental (6). En esta determinación se suele encontrar el valor del producto $A_{pd}.h_d$ por lo que la separación requiere introducir alguna convención para asignar un valor al área A_{pd} . En este trabajo se ha preferido caracterizar la cantidad de producto en el secador a través de su área A_{pd} con el fin de simplificar las expresiones. En la práctica será usual la caracterización a través de su peso inicial, en cuyo caso se deberá dar el parámetro que determina el área por unidad de masa de producto.

La ecuación (2) de transferencia de masa ha sido expresada en función de las humedades absolutas en vez de las presiones parciales, lo que facilita la manipulación posterior de las ecuaciones con el fin de despejar las variables de interés. Tanto la función $w_s(t)$ como el coeficiente de transferencia h_d son dependientes de la presión total en el lugar, lo que debe tenerse en cuenta al utilizar los resultados de esta sección.

Debe indicarse que estos secadores funcionan en tandas por lo que el valor de mayor interés para la masa de agua evaporada es la que corresponde al primer día. Durante el mismo se producirá el máximo de evaporación y por tanto se fijará la capacidad de carga del equipo. En general, el secado de producto fresco en sus etapas iniciales suele mostrar un comportamiento evaporativo similar al de una superficie de agua y por tal razón se ha adoptado la ecuación (2) para representarlo.

En alguno de los ensayos realizados se han utilizado bandejas con agua para simular el producto. En estos casos el coeficiente h_d se suele expresar en función del número de Lewis, cuyos valores típicos son cercanos a la unidad.

El balance térmico total de la cámara de secado está regido por la siguiente ecuación:

$$\alpha_1 . A_s . I = C_p . M_a . (t_2 - t_a) + q_f . mw + h_c . A_c . (t_2 - t_a) \quad (3)$$

Ella indica que la energía solar recibida se distribuye en tres procesos: el calentamiento del aire, la evaporación del agua y la pérdida de calor a través de la cubierta. No se ha tenido en cuenta el efecto de acumulación de calor en el piso y no se ha explicitado el intercambio radiactivo dentro de la cámara.

El balance térmico en el producto queda expresado por la siguiente ecuación:

$$\alpha_2 . A_{pi} . I = q_f . mw + A_{pt} . h_p . (t_p - t_2) \quad (4)$$

donde la energía solar recibida por el fruto es repartida entre el proceso de evaporación y la pérdida convectiva hacia el aire de la cámara. No se ha tenido en cuenta el calentamiento de la masa del producto. En esta ecuación y las anteriores la geometría del producto queda representada por tres áreas: la de evaporación A_{pd} , la de transmisión de calor A_{pt} y la iluminada por la radiación solar, A_{pi} .

En la cuatro ecuaciones planteadas se tienen cuatro incógnitas: la temperatura t_2 y la humedad absoluta w_2 del aire de la cámara, la temperatura t_p del producto y la masa de agua evaporada por segundo mw siendo el primer objetivo la determinación de mw . En lo que sigue se expresará mw en forma indirecta mediante la potencia térmica necesaria para la evaporación.

$$x = qf.mw \quad (5)$$

La variable w_2 se puede eliminar entre las ecuaciones (1) y (2). Si se define el parámetro adimensionado:

$$K1 = 1 + Ma/(A_{pd}.hd) \quad (6)$$

con el fin de simplificar las expresiones, resulta:

$$x = qf.ma.[Ws(tp)-wa]/K1 \quad (7)$$

Entre las ecuaciones (4) y (5) se puede eliminar ta si se definen los parámetros adimensionados:

$$K2 = 1/(1 + hc.Ac/Cp.ma) + Cp.Ma/(A_{pt}.hp) \quad (8)$$

$$K1 = \alpha_1/(1 + hc.ac/Cp.ma) + \alpha_2.(A_{pi}/A_{pt})/[(hp.As)/(Cp.ma)] \quad (9)$$

resulta:

$$tp - ta = K1.[(As.I)/(Cp.ma)] - K2.x/(Cp.ma) \quad (10)$$

La eliminación de tp entre las ecuaciones (9) y (10) implica el conocimiento de la forma analítica para la función $ws(t)$. Dada su dependencia no lineal, se adoptará la forma más sencilla, un desarrollo cuadrático en un intervalo de temperatura que comprenda los valores usuales de tp a lo largo de un día de trabajo. Las expresiones cuadráticas se expresan como:

$$ws(t) = ws_0 + a.t + b.t^2 \quad (11)$$

Los valores de las constantes a utilizar en este trabajo se indican en la Tabla II.

tabla II Constantes de la expresión cuadrática para ws

ws_0	= 0.0225	kg/kg
a	= 0.00144	C-1
b	= 37.28 E-8	C-1

Eliminando tp se obtiene una expresión cuadrática para x . Si se llama:

$$Tai = ta + Ki.As.I/(Cp.ma) \quad (12a)$$

se obtiene:

$$b.[K2/(Cp.ma)]^2.x^2 - [K1/(qf.ma) + a.K2/(Cp.ma) + 2.b.K2/(Cp.ma).Tai].x + (ws_0 - wa + a.Tai + b.Tai^2) = 0 \quad (12b)$$

Esta ecuación permite calcular X como función de las variables meteorológicas ta , wa e I , así como estudiar la variación de X con los distintos parámetros que definen el equipo. En una próxima sección se analizará la influencia de la dependencia no lineal de $ws(t)$, expresada en esta ecuación a través de la constante b , y se encontrará que la misma es pequeña para los valores usuales de radiación. Por tal razón, en la próxima sección se estudiará el caso lineal, $b=0$, introduciendo la noción de función característica para el secador. Más tarde se discutirá la expresión no lineal con más detalle.

FUNCION CARACTERISTICA DEL SECADOR INVERNADERO.

Si se toma $b=0$ en la (12) se obtiene:

$$x = qf.ma.[ws(ta) - wa + K1.a.(As.I/Cp.ma)]/[K1 + (a.qf/Cp).K2] \quad (13)$$

donde se ha utilizado el hecho de que en la aproximación lineal vale:

$$W_s(t_a) = W_{s0} + a \cdot t_a \quad (14)$$

La fórmula (13) refleja el hecho de que la evaporación de agua puede tener dos orígenes: el calentamiento producido por la radiación solar o la diferencia entre la humedad absoluta del aire a la entrada y el valor máximo que podría llegar a tener a la temperatura t_a , es decir $w_s(t_a)$. Si la radiación solar se aprovechase totalmente, la variable X podría alcanzar el valor $A_s \cdot I$. Por otro lado si se pudiese saturar completamente el aire, X podría llegar a valer $q_f \cdot m \cdot (w_s(t_a) - w_a)$. A estos valores potenciales se los designará como X_i y X_w :

$$x_i = A_s \cdot I \quad (15)$$

$$x_w = q_f \cdot m \cdot [w_s(t_a) - w_a] \quad (16)$$

Resulta de interés definir un coeficiente que indique hasta que punto el secadero está aprovechado su potencial de secado. Se le llamará factor de performance f_p y se lo define como:

$$f_p = x / (x_i + x_w) \quad (17)$$

No se ha adoptado el nombre de eficiencia por este parámetro en virtud de que la energía incidente $A_s \cdot I$ no es la única fuente potencial de secado. Aunque no haya energía incidente se puede secar producto si w_a es menor que $w_s(t_a)$.

Si se reemplaza en (17) la expresión encontrada para X , el factor f_p queda expresado en función de los datos meteorológicos por intermedio de una sola variable z :

$$z = x_w / (x_w + x_i) \quad (18)$$

Definiendo la constante K_0 :

$$K_0 = a \cdot q_f / C_p$$

se obtiene la siguiente expresión para f_p :

$$f_p = [(1 - K_0 \cdot K_1) \cdot z + K_0 \cdot K_1] / (k_1 + K_0 \cdot K_2) \quad (19)$$

Se ha demostrado que en la aproximación lineal el funcionamiento del secadero queda caracterizado por un solo parámetro operativo, z , que depende de las tres variables meteorológicas que intervienen en el fenómeno.

En un sistema de coordenadas cuyos ejes representan a f_p y z la ecuación (19) define una recta a la que se da el nombre de curva característica del secadero invernadero. La figura 4 muestra un ejemplo. Tanto z como f_p varían entre 0 y 1. Para $z=1$ se obtiene el valor de f_p cuando no incide radiación sobre el secador, lo que ocurre por ejemplo, si el mismo se hace funcionar durante la noche. A medida que la radiación crece, el punto de funcionamiento del secadero se desplaza hacia $z=0$, valor que se alcanzaría únicamente si el aire de entrada está saturado.

La curva característica representa el funcionamiento del secador en un cierto instante. En la aproximación lineal, la ecuación (13) puede ser promediada durante el número de horas de funcionamiento del equipo. Por tanto, la función característica (19) es válida si f_p y z se calculan con el promedio diario de la radiación, I , y la masa promedio de agua evaporada por segundo, m_w . En tal caso se debe tener cuidado con el hecho de que esos promedios deben evaluarse sobre el período de funcionamiento del secadero, que puede ser sustancialmente menor a 24 horas si el mismo trabaja únicamente durante el día.

Se puede tener una expresión alternativa de la (19) definiendo el factor de performance con referencia a la energía solar incidente, $A_s \cdot I$.

$$f_p' = x/As.I \quad (20)$$

En ese caso el parámetro operativo resultante es:

$$z' = (ws(ta) - wa)/I \quad (21)$$

y la función característica tiene la siguiente expresión:

$$f_p'' = (z' + K0.K1)/K1 + K0.K2 \quad (22)$$

Esta forma es más sencilla, en especial la definición de z donde no interviene el flujo de aire ma. No obstante, tiene el inconveniente de que tanto f_p como z varían entre 0 e infinito, no quedando representada con claridad la influencia del aire de entrada no saturado en el funcionamiento del secadero. El caso del funcionamiento nocturno, $I=0$, corresponde a z infinito y el coeficiente de z en la ecuación (22) debe determinarse a partir de la pendiente de la curva.

SOLUCION NO LINEAL

En la sección anterior se trató la solución aproximada para $b=0$. Si se considera el valor real de b la ecuación es de segundo grado y se determina X en la forma habitual para este tipo de ecuaciones. La solución ya no depende únicamente de la variable z , pero se encuentra que para los valores usuales de las variables en juego la diferencia entre la solución exacta y la aproximada es pequeña. La figura 4 muestra los valores calculados en forma exacta tomando los parámetros de la tabla III. Se adoptó $ta=25$ C y se obtuvieron distintos puntos de funcionamiento variando I entre 100 y 1000 w/m^2 y wa entre 0.01 y 0.02 kg/kg . Como se aprecia, la dispersión es pequeña y existe un buen acuerdo con la solución lineal.

En las ecuaciones que siguen se seguirá discutiendo otros aspectos del funcionamiento de estos secaderos en la aproximación lineal.

TABLA III - Parámetros utilizados en el ejemplo de cálculo del secadero con una cámara

$As = 50 \text{ m}^2$	$Ac = 100 \text{ m}^2$
$Ap = 20 \text{ m}^2$	$Apt = 40 \text{ m}^2$
$Api = 10 \text{ m}^2$	$hc = 18 \text{ w/m}^2\text{C}$
$hp = 6 \text{ w/m}^2\text{C}$	$hd = 0.006 \text{ k/s.m}^2$
$ma = 0.44 \text{ k/s}$	$\alpha = 0.5$

SECADOR INVERNADERO DE DOS CAMARAS

En esta sección se mostrará que la noción de función característica también aplicable al secador que utiliza dos cámaras. La figura 2 muestra un esquema con las dos cámaras y la notación adoptada para las mismas. Las cámaras se identifican con las letras A y B. Los parámetros para la cámara A se seguirán identificando con la misma notación. Para la cámara B se agregará un apóstrofe a la notación anterior.

La cámara A se encuentra en las mismas condiciones que la cámara única estudiada en una sección anterior, por lo que las ecuaciones respectivas podrán ser usadas en este caso. La única diferencia radica en que las condiciones del aire a la salida, punto I de la figura 1.b, necesita conocerse para encarar el cálculo correspondiente a la cámara B. Utilizando las ecuaciones (4) y (1) se obtiene:

$$tI = ta + (I.As.I - x)/(hc.Ac + Cp.ma) \quad (23)$$

$$wI = wa + x/(qf.ma) \quad (24)$$

donde X la cantidad de agua evaporada en la cámara A y se calcula con la expresión (13).

Las condiciones en que se encuentra la cámara B difieren de las estudiadas en la sección anterior en virtud de que el aire de entrada no es el externo sino el proveniente de la cámara A.

Las expresiones expuestas anteriormente para una cámara pueden ser modificadas teniendo en cuenta este hecho. Si las condiciones del aire de entrada se identifican con el número 1, y se define:

$$Kp' = 1/[1 + (hc'.Ac'/Cp.ma)] \quad (25)$$

se obtiene:

$$x' = qf.ma.[ws(ta) - w1 + K1'.a.(As'.l/Cp.ma) + a.Kp'.(t1-ta)] / [K1 + (a.qf/Cp).K2'] \quad (26)$$

donde aparece un nuevo término dependiente de la diferencia $t1 - ta$.

Usando esta expresión se obtienen en forma similar al caso de una cámara la cantidad de agua evaporada, dada por la suma $x+x'$.

La relación que se obtienen sigue siendo lineal en l y $Ws(ta) - Wa$, por lo que nuevamente se introducen las variables z y fp y se puede utilizar la noción de curva característica. La misma no se detalla aquí por razones de espacio.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el fin de comprobar experimentalmente los resultados anteriores se han realizado ensayos de secado en un secador invernadero de 5 cm de ancho por 10 m de largo, dividido en dos cámaras. El mismo tiene una cubierta de plástico anti UV y térmico y una estructura de madera. Dos ventiladores axiales colocados en el tabique de separación mantienen la circulación de aire. Dado que hubiese sido difícil conseguir uniformidad a través de distintos ensayos utilizando algún tipo de producto, se decidió usar bandejas de agua. Se colocaron 111 bandejas de plástico de color negro, cada una con una superficie de 0,18 m². 21 de las mismas fueron colocadas en la cámara A y 90 en la B, tratando de simular las condiciones habituales de funcionamiento, en las que la cámara A contiene producto semiseco cuya tasa de evaporación es mucho menor.

Los parámetros que definen este secadero se han estimado de acuerdo con los valores que figuran en la tabla IV.

El área de producto que está evaporando corresponde al área de bandeja. En cambio, el área de transmisión térmica es el doble, ya que el fondo de las bandejas está constituido por un plástico delgado. En lo que se refiere al área de exposición a la radiación, Ai , sería igual a la de bandeja si las mismas estuviesen colocadas en un solo nivel. En realidad ocupan tres niveles y las superiores hacen sombra sobre las inferiores. Midiendo la radiación sobre las mismas se ha estimado que Ai es del orden del 50% de área de bandejas. El cálculo es bastante sensible a este parámetro ya que una mayor radiación aumenta la temperatura y por lo tanto la tasa de evaporación.

TABLA IV - Parámetros utilizados en el ejemplo de cálculo del secadero de dos cámaras

Parámetro	Cámara A	Cámara B	Unidades
As	25	25	m ²
Ac	50	50	m ²
Ap	4	16	m ²
Apt	8	32	m ²
Apí	4	8	m ²
hc	18	18	w/m ² C
hp	6	6	w/m ² C
hd	0.006	0.006	k/s m ²
ma	0.44	0.44	k/s
α	0.5	0.5	

El parámetro α determina la cantidad de radiación incidente que es efectivamente absorbida dentro de las cámaras. Las medidas puntuales realizadas indican que su valor en las condiciones en que se encontraba el plástico de cubierta se sitúa entre 0.5 y 0.6.

El parámetro h_c determina las pérdidas a través de la cubierta. Dado que el modelo no incorpora la captación de calor por parte de la masa del suelo ni aparecen explícitamente otras pérdidas como ser la producida por renovaciones de aire e intercambio radiativo a través de la cubierta, se adopta un valor mayor que el habitual.

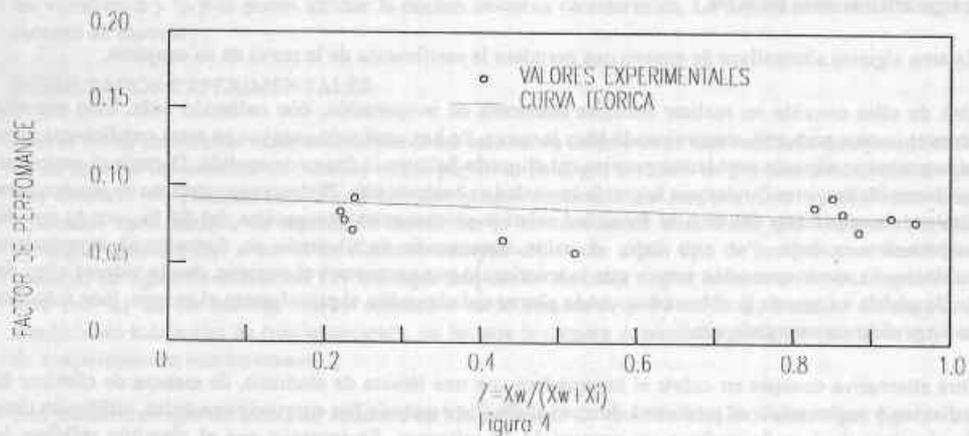
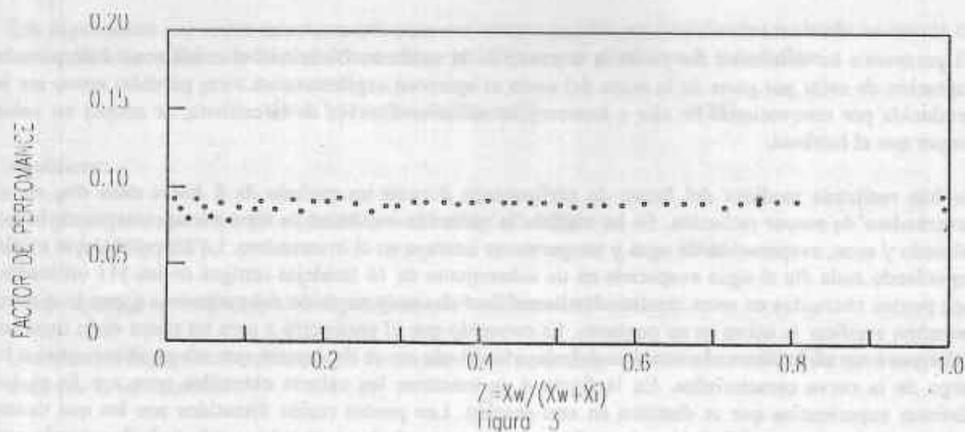
Se han realizado medidas del factor de performance durante un periodo de 8 horas cada día, en el invernadero de mayor radiación. Se ha medido la radiación incidente, la temperatura externa de bulbo húmedo y seco, evaporación de agua y temperaturas internas en el invernadero. La evaporación se midió reponiendo cada día el agua evaporada en un subconjunto de 16 bandejas testigos de las 111 utilizadas. Los puntos obtenidos en estas condiciones tienen un valor muy parecido del parámetro z , por lo que no permiten verificar la curva en su conjunto. Es conocido que el parámetro z para un clima dado tiene un valor poco variable para cada estación del año, por lo que no es de esperar que sea posible puntos a lo largo de la curva característica. En la figura 4 se muestran los valores obtenidos para z y f_p en las distintas experiencias que se discuten en esta sección. Los puntos recién discutidos son los que tienen valores de z cercanos a 0.2. En la misma figura se ha agregado la curva teórica calculada de acuerdo con los parámetros de la tabla IV.

Existen algunas alternativas de ensayo que permiten la verificación de la curva en su conjunto.

Una de ellas consiste en realizar medidas nocturnas de evaporación, con radiación nula. Esto permite obtener puntos para $z=1$, determinando bien la curva. Se han realizado ensayos en estas condiciones pero se encontraron algunos problemas propios del clima de Salta en la época de medida. Durante el verano se producen las mayores lluvias por lo que la humedad es bastante alta. El descenso nocturno de temperatura produce la saturación del aire, la humedad relativa se encuentra por encima del 90 %, por lo que la evaporación es baja. Por otro lado, el calor almacenado en el suelo es devuelto al invernadero produciendo una evaporación mayor que la anterior, lo que enmascara el proceso, dando valores altos de f_p . Se podría evitar este problema colocando placas aisladas sobre el piso durante el ensayo. Esta solución no ha podido ser ensayada aún.

Otra alternativa consiste en cubrir el invernadero con una lámina de aluminio, de manera de eliminar la radiación y poder medir el punto $z=1$ durante el día. Este método fue ensayado con éxito, utilizando tiras de aluminio de 1 m de ancho y un espesor de 40 micrones. Se esperaba que el aluminio reflejara la radiación no elevando su temperatura. Esto no se consigue totalmente y en los días muy soleados la cubierta eleva su temperatura alrededor de 10 C por encima de la temperatura del aire en los secaderos, dando un aporte radiativo en el infrarrojo. Este aporte se tuvo en cuenta en el cálculo de z y f_p , midiendo la temperatura de techo y calculando el intercambio térmico entre el mismo y las bandejas como si ambos fueran cuerpos negros. Los puntos medidos se muestran en la figura 4 y corresponden a valores de z cercanos a 0.9.

La cubierta de aluminio puede retirarse parcialmente, con lo que se pueden lograr medidas con valores globales de radiación menores que los típicos de la época. Los puntos que se muestran en la figura 4 con los valores de z cercanos a 0.5 se obtuvieron de esta forma, retirando el 40 % de la lámina de aluminio.



DISEÑO DEL SECADOR

Para un modelo dado de cubierta y un tipo de producto a secar, los principales parámetros a determinar en el proceso de diseño son el área de secadero A_s , el flujo de aire ma y el área de producto A_p . Esta última está ligada directamente a la cantidad de producto húmedo que deberá colocarse por metro cuadrado de secadero.

Un primer aspecto a considerar es el de la potencia consumida por los ventiladores. Si bien un incremento en el flujo de aire por unidad de área del secadero, ma/A_s , mejora la velocidad de secado, ello se logra en detrimento de la potencia eléctrica consumida. Los ensayos y cálculos realizados muestran que valores de este parámetro en el orden de $0.01 \text{ kg}/(\text{sm}^2)$ son adecuados para lograr un funcionamiento aceptable sin consumir una potencia excesiva.

Un segundo aspecto de importancia es de la humedad relativa dentro de la cámara húmeda, la que no debe pasar un cierto máximo con el fin de evitar la aparición de hongos en el producto e impedir la condensación sobre la cubierta y posterior goteo sobre el producto. El valor a seleccionar dependerá de cada producto, encontrándose habitualmente en el orden del 50 a 60 %.

Sobre la base de estos criterios es posible utilizar las ecuaciones ya desarrolladas para determinar alguno de los parámetros mencionados. Si se elimina la cantidad de agua evaporada, mw , entre las ecuaciones (1) y (4) y se divide la relación que se obtiene por el área de secadero A_s queda:

$$\alpha_1 \cdot I = [C_p \cdot (ma/A_s) + h_c \cdot (A_c/A_s) \cdot (t_2 - t_a) + q_f \cdot (ma/A_s) \cdot (w_2 - w_a)] \quad (27)$$

Al elegirse el valor aceptable de ma/A_s , la ecuación (27) define una relación lineal entre la temperatura del secadero, t_2 , y su humedad absoluta, w_2 . La misma se puede representar en un diagrama sicrométrico,

mostrando gráficamente los posibles puntos de funcionamiento del secador. Por otro lado, la elección de una humedad relativa de trabajo impone otra relación entre t_2 y w_2 , la que se representará en el diagrama psicrométrico con una curva de humedad relativa constante. El corte de la recta anterior con esta curva determina el punto de trabajo del secador.

Una vez calculado el valor de w_2 , se obtiene la relación m_w/A_s mediante la ecuación (1), ya que se conoce m_a/A_s . Si se dispone de estos cocientes se puede calcular el punto de funcionamiento (f_p, z) del sistema.

Finalmente, se puede determinar la relación A_p/A_s que fija la cantidad de producto a cargar por unidad de área del secadero. Con este fin se puede usar la curva característica. Dado el cociente m_a/A_s y la geometría del sistema, dichas curvas son función de la relación A_p/A_s . Trazando algunas para distintos valores de cociente se puede determinar cual de ellas pasa por el punto de funcionamiento (f_p, z) calculado en el párrafo anterior.

Dada un área de secadero, los tres cocientes determinan la cantidad de agua que se puede evaporar durante el primer día, la masa de producto que se debe cargar para lograr ese efecto y el flujo de aire necesario. En cambio no es posible determinar el número de días necesario para completar el secado, para lo cual se debería disponer de datos sobre la evolución del producto en los días posteriores. La ecuación (2) usada en este estudio sólo predice el comportamiento del producto durante el primer período de secado. Será necesario determinar experimentalmente el comportamiento posterior para completar el diseño prediciendo la duración del período total de secado.

INTRODUCCIÓN

El secado industrial convencional está formado por una corriente del tipo húmedo en movimiento, dentro de la cual se sitúan bandejas con el producto a secar. Durante varias horas circulan de uno de los lados del sistema (1-2). La circulación de este material para eliminar la humedad, puede obtenerse por convección natural o forzada. Este sistema funciona por tanto a la radiación que llega de aproximadamente el primer día de cada ciclo, en el cual el producto puede perder hasta una buena evaporación. Durante los días siguientes, la evaporación bajo el efecto del secado anterior, por lo que la energía recibida se es aprovechada con la mayor eficiencia posible.

A continuación se describe un procedimiento del secado industrial con convección forzada, en el que durante el día de un ciclo puede ser aprovechada toda la energía disponible. A continuación se describe el procedimiento.

La figura 1 muestra el principio de funcionamiento del sistema. El secadero se divide en dos partes A y B. Durante el primer día de circulación de aire, en las dos partes se sitúan bandejas con una superficie total igual al doble de la superficie utilizada en los secaderos de una etapa.

1. Introducción del producto
2. Secado del producto
3. Introducción de aire caliente