

CONVALIDACION EXPERIMENTAL DEL MODELO INVERNADERO-SECADOR DE DOBLE CÁMARA. PRUEBAS DE LABORATORIO

L. Mealla Sánchez, M. Condori¹, L. Saravia²
INENCO³ - Departamento de Física, Universidad Nacional de Salta
Calle Buenos Aires 177. (4400) Salta. E mail: meallal@unsa.edu.ar ; Fax 5487 255489

RESUMEN

El modelo de invernadero secador de simple y doble cámara se desarrolló a principios de la década (Saravia et al., 1990), pero no fue adecuadamente convalidada mediante medidas experimentales detalladas. Esto se debió a que las experiencias a escala natural se ven dificultadas por la cantidad de producto y la necesidad de realizar un gran número de ciclos de secado con éste. A esto se suma la variabilidad de los parámetros meteorológicos de interés (temperatura, radiación y humedad).

En el presente trabajo se muestra la convalidación experimental de la teoría de los invernaderos secadores de doble cámara utilizando un prototipo a escala reducida con el auxilio de radiación artificial. Se analiza también, la productividad del secador de doble cámara frente al aprovechamiento de la energía recibida, realizando una comparación con el secadero de una sola cámara, siguiendo el modelo teórico.

DESCRIPCION

El uso del invernadero como colector y cámara de secado fue probado y modelizado hace algunos años. Básicamente, se utiliza la estructura de un invernadero común en donde se colocan bandejas con el producto a secar, éste recibe radiación solar a través de la cubierta transparente y la humedad se elimina por convección natural o forzada. Sus versiones más difundidas son el secador de cámara simple y el de doble cámara.

En un secadero invernadero de cámara simple, existe una única cámara de secado en donde se coloca el producto a secar, mientras que el ventilador se encarga de remover la humedad generada en el proceso. El producto necesita varios días para alcanzar el grado de secado requerido. La cantidad de agua extraída es muy importante en el primer día, pero disminuye en los días posteriores debido al aumento de la resistencia al secado en el producto.

En el secador invernadero de dos cámaras, el invernadero original se divide en dos mediante una pared trasparente. El proceso consta de tres etapas: Una primera donde se coloca producto fresco en una de las cámaras y el aire fluye desde la cámara vacía hacia la cámara con producto, la primera trabaja como un pre-calentador del aire que ingresa a la cámara que tiene el producto. La segunda etapa comienza cuando el producto alcanza la mitad del ciclo de secado. La primera cámara se carga con producto fresco y el flujo de aire se invierte de manera que desde la cámara con producto semiseco llega aire con poca agua incorporada a la cámara con producto fresco, pues en la primera el producto alcanza un estado avanzado de secado, además actúa como un pre-calentador del aire que ingresa a la cámara con producto fresco, en la cual se produce una elevada evaporación debido a que contiene producto fresco. Cuando el producto en la primera cámara está seco, se retira, se incorpora producto fresco y se invierte el flujo de aire, esta es la tercera etapa, la segunda cámara tiene producto semiseco y la primera producto fresco, al final de esta etapa se descarga el producto seco de la primera y se inicia otra etapa similar a la segunda, de manera de alternar las etapas segunda y tercera.

Balances de masa y de energía

Las ecuaciones de balance térmico y de masa de agua en un invernadero-secadero de una y dos cámaras fueron establecidas en el trabajo de Saravia et al. (1990) y en el de Condori (1999). Desarrollamos únicamente las ecuaciones para el invernadero secador de doble cámara a fin de obtener la expresión de la masa de agua evaporada por segundo en ambas cámaras y de esa manera obtener la función característica del invernadero-secador.

En la figura 1 se representa el proceso de circulación de aire húmedo en ambas cámaras, la principal fuente de absorción de energía: la radiación solar y pérdidas hacia el ambiente. las variables más representativas relacionadas con el proceso también están representadas. Las condiciones establecidas para realizar los balances de calor y humedad son: ambas cámaras presentan una distribución uniforme de temperatura y humedad; además que el flujo másico de aire es constante.

La masa de agua contenida en el aire que circula por ambas cámaras se expresa de la siguiente manera:

¹ Becario del CONICET.

² Investigador del CONICET.

³ Instituto UNSa-CONICET.

$$\dot{m}_{w_1} = \dot{m}_a (w_1 - w_a) \quad ; \quad \dot{m}_{w_2} = \dot{m}_a (w_2 - w_1) \quad (1)$$

siendo \dot{m}_{w_i} la masa de agua evaporada en cada cámara por unidad de tiempo y por unidad de área; \dot{m}_a el flujo de aire que ingresa al secador y w_i las cantidades de humedad ambiente y en las dos cámaras.

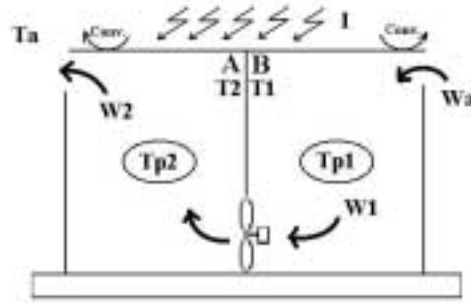


figura 1: Principales variables en el proceso de secado.

La velocidad de evaporación en ambas cámaras es proporcional a la velocidad del aire circulante impulsado por el ventilador (la sección del invernadero y la densidad del aire se suponen constantes a fin de simplificar el cálculo, por lo tanto el flujo de aire depende de la velocidad del mismo) y también a la diferencia de humedad absoluta del aire que ingresa a la cámara y de la humedad absoluta que hay en ella.

Las de evaporación de agua en el fruto corresponde a las siguientes ecuaciones:

$$\dot{m}_{w_1} = A_{pd_1} H_{d_1} [w_{s_1}(t_{p_1}) - w_1] \quad ; \quad \dot{m}_{w_2} = A_{pd_2} H_{d_2} [w_{s_2}(t_{p_2}) - w_2] \quad (2)$$

donde $A_{pd_i} H_{d_i}$ es el producto del área de intercambio de vapor por el coeficiente másico de difusión del producto en cada cámara; w_{s_i} es la humedad absoluta de saturación a la temperatura de producto t_{p_i} en cada cámara.

Se supone que la temperatura del fruto es uniforme y que el proceso de evaporación de agua en el fruto es similar al que ocurre en la superficie libre de agua, el valor del coeficiente másico de pérdida de vapor de agua del producto se obtiene experimentalmente, aunque se debe tener cuidado en determinar el valor del área de intercambio, pues este coeficiente viene caracterizado por esta cantidad.

El balance térmico en las dos cámaras queda establecido por:

$$\alpha_1 A_{s_1} I = c_p \dot{m}_a (t_1 - t_a) + q_f \dot{m}_{w_1} + h_{c_1} A_{c_1} (t_1 - t_a) \quad ; \quad \alpha_2 A_{s_2} I = c_p \dot{m}_a (t_2 - t_a) + q_f \dot{m}_{w_2} + h_{c_2} A_{c_2} (t_2 - t_a) \quad (3)$$

siendo α_i en porcentaje de radiación absorbida por cada cámara; A_{s_i} área de suelo de cada cámara; I radiación incidente sobre el prototipo; c_p calor específico del aire; q_f calor latente de cambio de fase del agua; h_{c_i} coeficiente convectivo en la cubierta de cada cámara; A_{c_i} área de cubierta de cada cámara; t_i temperaturas ambiente y en cada cámara.

La energía recibida por las cámaras se divide en tres procesos: calentamiento del aire circulante, evaporación de agua del producto y pérdidas a través de la cubierta. No se tiene en cuenta la acumulación de calor en el piso ni el intercambio radiativo en las cámaras.

Por ultimo el balance térmico en el producto ubicado en las cámaras resulta:

$$\alpha_{p_1} A_{p_{i_1}} I = q_f \dot{m}_{w_1} + A_{p_{t_1}} h_{p_1} (t_{p_1} - t_1) \quad ; \quad \alpha_{p_2} A_{p_{i_2}} I = q_f \dot{m}_{w_2} + A_{p_{t_2}} h_{p_2} (t_{p_2} - t_2) \quad (4)$$

donde α_{p_i} es el porcentaje de radiación que absorbe el producto en cada cámara; $A_{p_{i_j}}$ el área de producto ubicado en las cámaras; $A_{p_{t_i}}$ área por la cual el producto intercambia calor; h_{p_i} coeficiente convectivo del producto.

De las ecuaciones escritas consideramos como incógnitas a las temperaturas de las cámaras t_1 y t_2 ; el valor de la humedad absoluta en ambas cámaras w_1 y w_2 ; las temperaturas de producto t_{p_1} y t_{p_2} ; y las masas de agua evaporada en ambos compartimentos \dot{m}_{w_1} y \dot{m}_{w_2} .

Definimos los rendimientos en cada cámara como:

$$\chi_1 = q_f \dot{m}_{w_1} \quad ; \quad \chi_2 = q_f \dot{m}_{w_2} \quad (5)$$

Tomamos las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 despejamos las variables de interés y reemplazamos adecuadamente de manera de tener la expresión de los rendimientos en ambas cámaras en función de variables conocidas (pasibles de medir) y parámetros geométricos. Además utilizamos la ecuación de Penman en aproximación lineal, pues se necesita conocer $w_s(t)$, y así poder reemplazar en las ecuaciones precedentes la expresión de la humedad de saturación en función de la temperatura del producto t_{pi} . La expresión de tal relación es:

$$w_s(t) = w_0 + bt \quad \text{con } w_0 \text{ y } b \text{ conocidos} \quad (6)$$

El rendimiento total del secador es la suma de los rendimientos individuales de cada cámara, es decir: $\chi_t = \chi_i + \chi_w$. La expresión final para el rendimiento del secador es:

$$\chi = q_f \dot{m}_a [w_s(t_a) - w_a] \mathbf{R} + A_s I \mathbf{S} \quad (7)$$

Las constantes \mathbf{R} y \mathbf{S} están expresadas en función de los parámetros físicos y geométricos del sistema.

Función característica del secador

Designando a los potenciales:

$$\chi_w = q_f \dot{m}_a [w_s(t_a) - w_a] \quad ; \quad \chi_i = A_s I \quad (8)$$

como los responsables principales de la evaporación de agua; el primero por la diferencia de humedad absoluta del aire de entrada y el valor máximo que puede tomar a temperatura ambiente y el segundo por calentamiento producido por la radiación solar. La variable χ puede alcanzar el valor χ_i si se aprovecha por completo la radiación solar, o puede tomar el valor χ_w si se logra saturar el aire que circula por el secador.

Se considera apropiado definir un coeficiente para conocer hasta que punto aprovecha el secador el potencial de secado proporcionado por χ_i y χ_w , se denomina a esta función Factor de Performance y se define de la siguiente manera:

$$f_p = \frac{\chi}{\chi_i + \chi_w} \quad (9)$$

Cabe recordar que no se usa la palabra eficiencia por el hecho de que la energía que se usa para secar no es puramente radiativa, sino que también se puede secar en una cámara oscura por diferencia de humedad entre el aire que ingresa a la cámara y el valor de saturación a la temperatura de la cámara. Se define una variable que engloba a los dos potenciales de la forma:

$$z = \frac{\chi_w}{\chi_i + \chi_w} \quad (10)$$

por lo tanto, se procede a reemplazar la expresión 8 en la 9, usando la igualdad 10, se consigue la expresión final para el Factor de Performance.

$$f_p = (\mathbf{R} - \mathbf{S})z + \mathbf{R} \quad (11)$$

La expresión es lineal con respecto a la variable z . Por otra parte la recta que define, proporciona la *curva característica* del invernadero secador, tanto z como f_p varían entre 0 y 1. Si $z=1$, toda la energía para el secado proviene de la diferencia de cantidades de humedad absoluta, es decir, no incide radiación sobre el invernadero. Si el aire está completamente saturado $z=0$.

Equipo experimental

Las pruebas se realizaron en un prototipo utilizando la escala geométrica 1:100. Según el modelo propuesto por Saravia et al. (1990), en cuyos ensayos se utilizó un secador con 50 m² de área de suelo, mas precisamente un invernadero de 10 m de largo y 5 m de ancho. El prototipo se construyó con un área de suelo de 0,25 m² por cámara, resultando un secador prototipo de 0,5 m² en total.

Para asegurar un flujo de aire uniforme sobre el producto a fin de remover el agua evaporada, se instalaron dos ventiladores en el secador. Se reguló la velocidad de aire mediante un control de tensión, permitiendo aumentar o disminuir la velocidad de giro de los ventiladores y así la cantidad de aire impulsado. El valor de las velocidad de aire para realizar los ensayos se obtiene de comparar los números de Reynolds de ambos invernaderos para las condiciones geométricas y dinámicas dadas tanto en el invernadero a escala real como el construido a escala reducida.

A fin de simular la radiación solar se usó un arreglo de lámparas ya existente utilizado en una experiencia anterior, consiste en un conjunto de 30 lámparas distribuidas en seis hileras paralelas de 5 lámparas cada una, sujetas a un marco de aluminio apoyado en un soporte rígido; éste posee un mecanismo que permite subir y bajar el arreglo para así tener mayor o menor potencia lumínica en la superficie debajo de él, allí es donde se coloca el prototipo de invernadero-secador.

En la elección de sensores de temperatura se tuvo en cuenta las dimensiones reducidas del prototipo, por lo que se utilizó sensores de pequeño tamaño.

La humedad absoluta en las cámaras y en el exterior se midió a través de psicrómetros contruidos con termistores para sensar las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo. Procediendo después a calcular el valor de humedad correspondiente mediante correlaciones a partir de datos de temperatura.

La medida de radiación se realizó con un sensor marca Licor, de reducido tamaño y rápida respuesta. Al ser un sensor fotovoltaico, la señal de salida depende del espectro de la radiación a medir. Se trató de conservar el mismo a lo largo de las experiencias realizadas utilizando la misma tensión de alimentación en las lámparas.

EXPERIENCIA

Dos grupos de medidas se realizaron utilizando el prototipo, un primer grupo utilizó agua y un segundo grupo utilizó una plancha de poliuretano embebido en agua a fin de simular la resistencia del producto al secado.

Medidas con agua

Se ensayó con dos bandejas semi-cilíndricas (cilindro cortado a lo largo de su eje principal cerrado en sus extremos) cuyo diámetro es de 0,15 m, y de longitud 0,2 m. Se eligió esa forma para tener superficie variable y así modificar la velocidad de vaporización, simulando de esta manera el proceso de secado típico en un producto. Se tomaron datos de variación de peso de la muestra; temperaturas a la entrada, en las cámaras y a las salida del invernadero; temperaturas de producto en las cámaras; también las cantidades de humedad absolutas a la entrada, la humedad de saturación a la temperatura de entrada al secador y, si se trata de un proceso de secado con doble cámara, la humedad absoluta en la primera cámara y la humedad de saturación a la temperatura de la primera cámara, esas dos son las condiciones de entrada para la segunda cámara.

La radiación se midió a la altura del la superficie de la bandeja, se realizaron múltiples experiencias en días que presentaban condiciones ambiente similares. De un par de medidas comparativas para simple y doble cámara, las variación en los valores de radiación en la experiencia con cámara simple fue entre 480 y 540 W/m², mientras que la variación en la experiencia de doble cámara estuvo entre 490 y 430 W/m². Esta variación se debe a la forma en que está construida la balanza, la altura de la muestra se modificó a medida que perdía peso, por lo tanto a menor peso recibía más radiación. El flujo en ambas experiencias fue de 0,021 Kg/seg., el flujo en las demás experiencias con agua se mantuvo en valores semejantes.

Del análisis que se hace de los datos tomados, se puede notar que a pesar de que la intención fue modificar la resistencia de difusión de agua al secador modificando la superficie libre de líquido, el efecto del cambio de la misma no tuvo incidencia en la variación de la pendiente de la curva de secado, la misma fue prácticamente constante y se puede aproximar a una recta lo que significa que la evaporación fue similar a la superficie libre de líquido con área de difusión constante. Por otra parte de la observación de la masa de agua evaporada, se puede decir que para un tiempo similar, el secador de doble cámara evaporó mas masa que el secador de cámara simple, eso se demuestra comparando pesos acumulados en ambas experiencias.

A fin de analizar el comportamiento del secador en sí mediante el cálculo del factor de performance, se procede calcular los rendimientos según las ecuaciones (5), los potenciales de secado debido a la diferencia de humedad y a la radiación según las ecuaciones (8), con esos valores se procede a calcular valores a fin de dibujar la curva f_p vs. z para ambos secadores, según las ecuaciones (9) y (10); el comportamiento de esas variables esta notablemente influenciado por la variación de las condiciones ambiente externas durante los ensayos. La figura 2 muestra la relación de variables tanto en el secado en una cámara como en dos cámaras. Se observa el comportamiento lineal tal como corresponde a la evaporación de agua libre, f_p alcanza mejores valores para el secado con doble cámara, mejorando aproximadamente el doble para z del orden de 0,5.

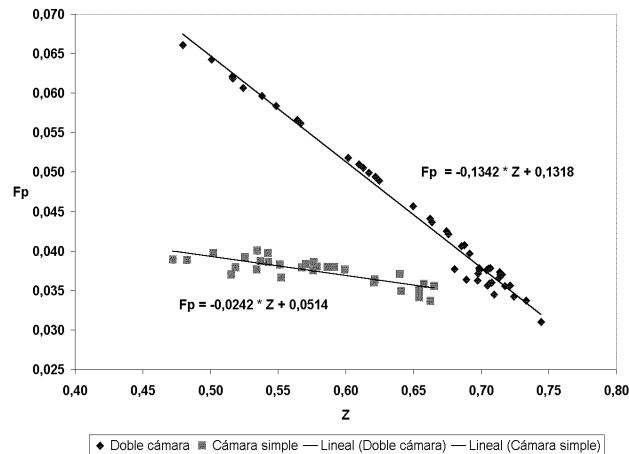
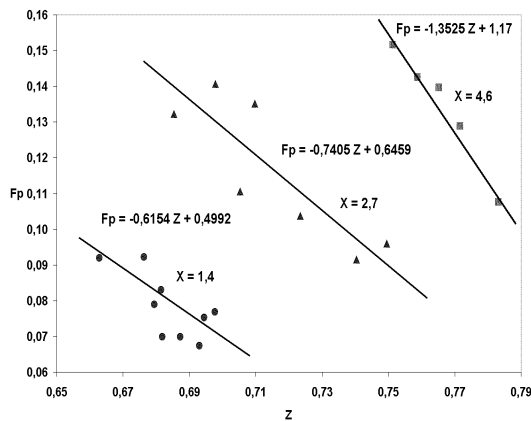


figura 2: Curvas características para el secado con bandejas de agua.

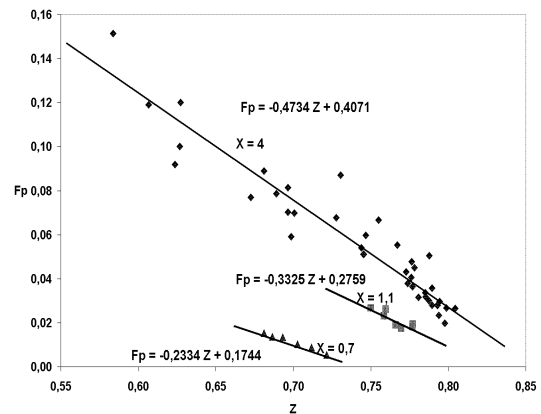
Medidas con producto

A fin de lograr uniformidad en el comportamiento y reproducir la curva de secado proporcionada al someter al proceso a un producto en particular, se utilizó una plancha de poliuretano embebida en agua, de manera que a medida que pierde líquido, la transferencia de agua varía. Se realizaron múltiples medidas a fin de comparar el comportamiento de los secadores de simple y doble cámara, se utilizaron valores de radiación cercanos a los 500 W/m², pues, al igual que el criterio seguido para las medidas con agua, el valor de la radiación debe aproximarse al promedio horario diario en los meses de verano en el valle de Lerma. Se realizaron medidas con baja radiación, presentando un comportamiento similar a las realizadas con alta radiación. Las pruebas elegidas para representar el comportamiento del invernadero-secador son cuatro, dos de simple y doble cámara realizadas con alta radiación y alta velocidad, resultando un flujo de aire de 0,02 Kg/seg. Otras se similares características se realizaron con baja velocidad y alta radiación, con un flujo de aire de 0,01 Kg/seg.

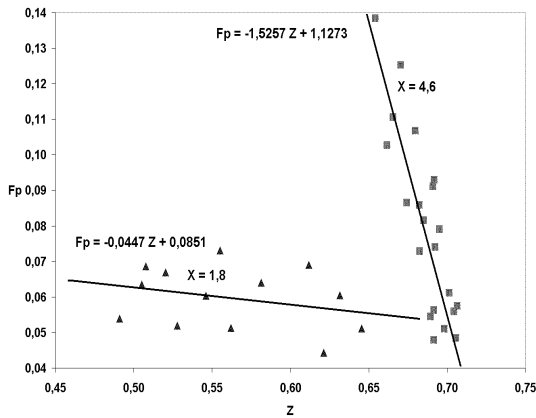
Cabe acotar que para los secados realizados en cámara simple se corta la experiencia cuando la variación de peso registrada fue despreciable, mientras que en los secados con cámara doble se deja de medir cuando las variaciones de peso en la cámara con producto semiseco son despreciables. Con este método se logran obtener curvas de velocidad de secado similares a las de un producto real, la característica de este método radica en que *la primera etapa del secado* (es decir cuando el secado se produce como si se tratara de una superficie libre de líquido) está ausente del proceso, sólo se observa una marcada presencia de *la tercera etapa del secado* (cuando la resistencia a la difusión de agua desde el interior del producto se torna importante).



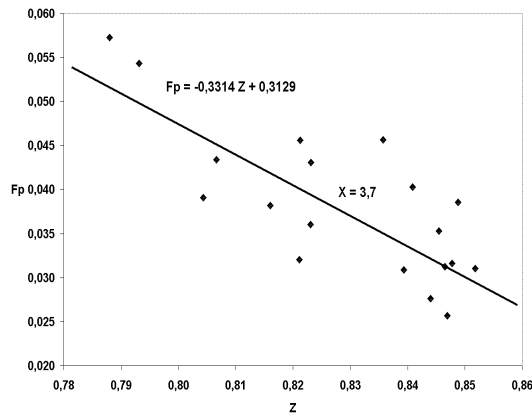
(a): Performance con flujo de aire alto. Cámara simple.



(b): Performance con flujo de aire bajo. Cámara simple



(c): Performance con flujo de aire alto. Doble cámara.



(d): Performance con flujo de aire alto. Doble cámara.

Figura 3. Parámetros característicos de los ensayos con producto.

El comportamiento en todos los ensayos realizados presenta similitudes en cuanto a la curva de velocidad de secado, por lo tanto se prefiere mostrar los resultados de las experiencias con alta radiación y establecer comparaciones entre ellas. Una característica importante es el rendimiento de los secadores de cámara simple comparados con los de doble cámara, para ello se comparan pesos acumulados en el tiempo que dura el secado.

En cuanto al factor de performance f_p como una función de la variable z , se observan comportamientos bastante peculiares, tal como lo muestra la figura compuesta número 3. El criterio seguido para construir estas figuras fue el comportamiento de los puntos respecto de un valor promedio de la velocidad de secado, como se puede observar, el comportamiento es aproximadamente lineal. Este comportamiento fue propuesto por M. Condori (1999) donde se postula que $f_p(z)$ está parametrizada con el contenido de humedad.

CONCLUSIONES

En las experiencias con agua comparando la masa de agua evaporada, se puede decir que para un tiempo similar, el secador de doble cámara evapora mas masa que el secador de cámara simple, eso se demuestra observando el peso acumulado para un mismo tiempo. Se concluye que en los ensayos con agua, el rendimiento del secador de doble cámara es superior al de cámara simple. Este comportamiento se observó tanto en ensayos con bandejas con agua, como así en ensayos con producto (aproximadamente un 100 %), ambos con alta radiación, para ensayos con baja radiación el rendimiento es similar.

La figura 2 representa las dos curvas f_p Vs z , de allí se desprende que el secador de doble cámara presenta una variación mucho mas marcada que el de cámara simple cuando se utiliza como evaporador. Además para el secador de doble cámara a medida que disminuye el parámetro z , es decir si se aumenta la radiación, el factor de performance aumenta considerablemente. Mientras que si se aumenta la diferencia entre la humedad de entrada y la correspondiente a la saturación a temperatura de entrada y se disminuye la radiación, el valor del factor de performance disminuye abruptamente en comparación con el de cámara simple. Este último presenta variaciones no muy notables respecto a los valores de humedad de entrada y de radiación.

Para las pruebas con secado de producto en cámara simple se observa que el comportamiento del factor de performance responde en forma progresiva a los valores promedio de la velocidad de secado, observándose menor pendiente en el secado a bajo flujo de aire, esto es razonable debido a que la pendiente de la curva depende en gran medida de este. Los Valores de R y S , presentan esa dependencia del flujo de aire en el secador. Se observa que el comportamiento respecto al parámetro velocidad de secado, es más brusco en un secador de doble cámara que en un secador de cámara simple, esto se debe a que la gran masa de agua se evapora mientras la cámara con producto semiseco contribuye con humedad en forma apreciable. Cuando la contribución se hace mas pequeña, el funcionamiento se reduce al de la cámara que aun conserva humedad en gran proporción, es decir la segunda cámara, por lo tanto, el cambio de pendiente es brusco.

Comparados los resultados con otros obtenidos en trabajos anteriores y a escala real, se concluye que el modelo invernadero secador enunciado por Saravia en 1999 se cumple al menos en las experiencias realizadas, dejando abierta la posibilidad de realizar mas en distintas condiciones.

REFERENCIAS

1. Duffie J. A., Beckman W. A.(1991). Solar Engineering of Thermal Processes, 2ª. Edición, Wiley & sons, Inc, New York.
2. Mujumdar A. S.(1987). Handbook of Industrial Drying. Marcel Dekker, Inc

3. Mealla Sánchez L. (2000). Convalidación Experimental de la Teoría de Funcionamiento de los Secadores Invernadero de Doble Cámara. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta.
4. Condorí M. A.(1991). Optimización del diseño de Colectores Solares de Aire con Absorbedores de Piedra. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta.
5. Condorí M. A.(1999). Estudio de Secaderos Invernaderos del Tipo Túnel. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta.
6. Saravia L., Echazú R., Zunino L. y Quiroga M.. (1990). Secadero Invernadero de Doble Cámara. Actas del V Congreso Ibérico de Energías Renovables, Madrid, 37-48.
7. Saravia L., Zunino L. y Echazú R.(1990). Performance y Diseño de Secadores Invernaderos de Convección Forzada. Actas de la 14^{va} Reunión de Trabajo de ASADES, Mendoza, 331-341.
8. Condorí M. y Saravia L.(1997). La producción de Secadores Invernaderos de Simple y Doble Cámara". *Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 2, 43-51.

ABSTRACT

The simple and double chamber greenhouse dryer model developed at the beginning of the decade (Saravia et al., 1990), but it was not appropriately validated by means of detailed experimental measures. This was due because the natural scale experiences are seen hindered by the product amount and the necessity of carrying out a great number of drying cycles with this. To this is add the interest meteorological parameters variability (temperature, radiation and humidity).

Presently paper shows the experimental validation of the double chamber greenhouses dryers theory utilising a condensed scale prototype with the artificial radiation aid. We also analyse, the double chamber dryer productivity, in front to the received energy gain, carrying out a comparison with the single chamber dryer, following the theoretical model.