

CONCLUSIONES RESPECTO AL RENDIMIENTO DEL SECADERO TIPO INVERNADERO DE SIMPLE Y DOBLE CAMARA SEGÚN DOS METODOLOGÍAS DE COMPARACION.

L. E. Mealla Sánchez.

Grupo de Investigación en Energías Alternativas
Universidad Autónoma del Caribe
Calle 90 No 46-112 C.P. 080020 – Barranquilla (Colombia)
Tel. 00575-3671219 – e-mail: luis.mealla@uac.edu.co

Recibido: 11/08/12; Aceptado: 05/10/12

RESUMEN: Se presenta una comparación de dos distintas metodologías de análisis del comportamiento en cuanto al rendimiento de secaderos invernaderos de simple y doble cámara, aplicadas a un conjunto de medidas generadas en un prototipo de laboratorio construido a escala. Las medidas de laboratorio se realizaron bajo radiación artificial de valor constante, flujo de aire a velocidades relacionadas mediante escala con un secador real. Se tomaron dos grupos de medida: uno donde el producto es agua en bandejas de plástico y otro donde se simula un producto real. Se pretende demostrar que el rendimiento del secadero de doble cámara es mejor que el de cámara simple, bajo dos metodologías: la del modelo de secadero invernadero propuesto por Saravia de INENCO y el denominado *Índice de Performance del Secador (IPS)*. Los resultados de ambas metodologías aplicadas a los grupos de medidas confirman el mayor rendimiento del secador de doble cámara comparado con el de cámara simple.

Palabras clave: energía solar, secado, comparación, invernadero secadero, performance.

INTRODUCCIÓN

La extracción de agua utilizando energía solar se presenta como una alternativa para lograr procesos a bajo costo y repetibles. Es de esperar que la combinación de distintos posibles componentes que pudiesen llegar a formar parte de un secadero, optimicen el proceso para lograr un buen comportamiento. La elección de cualquier metodología de secado utilizando energía solar esta ligada a la eficiencia para extraer agua utilizando la misma fuente de energía; por lo tanto es necesario definir cuál es la opción más eficiente de secador.

Cuando se intenta realizar el análisis de la performance de un secador, se puede recurrir a un conjunto de metodologías que se encuentran comúnmente en la literatura. Más precisamente Singh y Kumar (2012) proponen la metodología del Índice de Performance del Secador (*IPS*) basados en el ajuste de la curva de secado del producto mediante dos variables adimensionales: la masa de agua evaporada en función de la masa inicial y el tiempo adimensional que resulta de multiplicar el tiempo con un parámetro que resulta del ajuste exponencial de la curva de secado. Por otra parte, Saravia et al. (1990) propone un modelo de secadero invernadero en donde el coeficiente de performance depende de dos potenciales: uno debido a la radiación incidente sobre el secadero y el segundo a la diferencia de contenido de agua entre el aire que entra al secadero y la humedad del producto a temperatura ambiente. Se pretende comparar los resultados de la aplicación de ambos métodos a medidas realizadas en un prototipo a escala reducida en donde se simula el producto de secado mediante bandejas de agua y espuma de poliuretano embebida en agua.

DESCRIPCION

Existe un sinnúmero de metodologías para evaluar la performance de un secadero en cuanto a la velocidad de agua evaporada como en la calidad del producto que se obtiene; la comparación de la mayoría de estas metodologías son enumeradas por León et al. (2002), Ekechukwu y Norton (1999), donde en su mayoría, no se tiene en cuenta la influencia de los parámetros meteorológicos para describir el comportamiento de los secadores. Un método con las características atrás mencionadas es el propuesto por Singh y Kumar (2012), en las que se toma como base del análisis del comportamiento del secador la curva de secado de un determinado producto. Las variables que se tuvieron en cuenta principalmente en la formulación de este método fueron la energía recibida y la velocidad del aire, pero se observó que el espesor y la densidad del producto tenían también importancia en la curva generada. Se obtiene una curva de secado expresada en términos del contenido adimensional de humedad referido a la masa inicial y el tiempo de secado expresado en segundos. Se realiza un ajuste propuesto por Dincer y Dost (1996) que cumple la relación que se muestra en la ecuación 1.

$$\Phi = \frac{M_t}{M_0} = k_0 \exp(-k \cdot t) \quad (1)$$

La mayoría de las curvas de secado cuando predomina el fenómeno de transferencia de agua del producto hacia la superficie se pueden aproximar por esta relación, en las que indirectamente se tiene dependencia de las variables meteorológicas. Para hacer un ajuste adimensional los parámetros deben ser más o menos independientes de las variables meteorológicas e invariables respecto al producto que se seca. La constante de secado k , en la regresión de la curva de secado, representa la capacidad de secar para un determinado conjunto secador-producto y dependerá de las características del producto como así mismo condiciones de secado y características de diseño del secador. Para valores altos del parámetro seguramente se tendrán menores tiempos de secado. Comparar secadores por este parámetro no es lo indicado pues cada valor es característico de una combinación particular de producto, condiciones de secado y diseño del secador.

Se propone adimensionalizar el tiempo mediante el producto del parámetro k y el tiempo en que cada dato es tomado produciendo un parámetro τ , desarrollando una nueva forma de representar mediante las curvas características de secado generalizadas, y se representan mediante dos parámetros adimensionales llamados contenido de humedad y tiempo del proceso de secado (Φ y τ). Estas curvas se someten a una regresión como lo muestra la ecuación 2.

$$\Phi = \frac{M_t}{M_0} = \exp(-IPS \cdot \tau) \quad (2)$$

En resumen, se propone pasar de una curva particular expresada como $\Phi = f(t)$ a una función universal adimensional $\Phi = f(\tau)$. Se tiene una curva normalizada con valores instantáneos de Φ y τ para un amplio rango de las variables tomadas en cuenta al iniciar el análisis. Un dato interesante es que al graficar las curvas para cualquier combinación de variables meteorológicas y del producto, se observa una marcada superposición sin importar las condiciones en las cuales se obtuvieron los datos. Por lo que se tiene una base equitativa para analizar al performance de cualquier secador. El Índice de Performance del Secador (IPS), representa la capacidad de secado para una determinada configuración de secador, es la medida de la efectividad de un determinado secador y depende solamente del diseño del secador. Si el IPS es alto indica que el secador es muy eficiente. Se sugiere que las curvas de secado se analicen hasta un determinado contenido final de humedad de la muestra, así se define un punto de equiparación entre todos los secadores a comparar.

Para medir la confiabilidad del método, Singh y Kumar realizan el análisis de error relacionado con la curva de ajuste a los datos representados mediante la función que relaciona el contenido de humedad adimensional y el tiempo adimensional. Definen tres parámetros de comparación: Error de raíz media cuadrática ($ERMC$), error estándar (EE) y el coeficiente de correlación (r). Las expresiones de los mismos se observan en las ecuaciones que van de la 3 a 6.

$$ERMC = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Phi_{\text{exp},i} - \Phi_{\text{ajus},i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$EE = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Phi_{\text{exp},i} - \Phi_{\text{ajus},i})^2}{N-1}} \quad (5)$$

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N \Phi_{\text{exp},i} \Phi_{\text{ajus},i} - \left(\sum_{i=1}^N \Phi_{\text{exp},i} \right) \left(\sum_{i=1}^N \Phi_{\text{ajus},i} \right)}{\left[N \sum_{i=1}^N (\Phi_{\text{exp},i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N \Phi_{\text{exp},i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[N \sum_{i=1}^N (\Phi_{\text{ajus},i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N \Phi_{\text{ajus},i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

Se elige la curva de secado más representativa de un grupo de curvas que describan el comportamiento de un determinado secador con el mismo producto y se hace el análisis de error con respecto a la curva ajustada. Se espera que los valores de $ERMC$ y EE tiendan a cero y que el valor de r tienda a uno para un buen ajuste.

Saravia et al. (1990) proponen un modelo de invernadero secadero de una y dos cámaras en los cuales se tiene en cuenta para el cálculo de la eficiencia dos potenciales de secado: uno debido a la diferencia entre la humedad de saturación a temperatura ambiente y la humedad del aire que ingresa al secadero, y otro debido a la radiación que llega al secadero. Tales potenciales más la expresión del rendimiento (cantidad de agua evaporada en el secadero) se expresan en las ecuaciones 7, 8 y 9. Para alcanzar estas expresiones, se parte del balance de energía en el producto y en el aire que circula por el secadero; también se realiza un balance de humedad en el producto y en el aire que rodea al producto. No se tiene en cuenta las pérdidas conductivas en la base ni acumulación en la misma. Las pérdidas radiativas tampoco se tiene en cuenta.

$$\chi_w = q_f m_a [w_s(t_a) - w_a] \quad (7)$$

$$\chi_i = A_s I \quad (8)$$

$$\chi = q_f m_a [w_s(t_a) - w_a] R + A_s I S \quad (9)$$

En la expresión del rendimiento las constantes R y S dependen de los factores constructivos de secador, de las condiciones de secado y de las características del producto a secar. Se define un factor de performance (f_p) como el cociente del rendimiento y la suma de los potenciales, también se define una variable (z) que engloba los dos potenciales y se expresa como el cociente entre el rendimiento debido a la diferencia de humedad y la suma de potenciales de secado, originando una nueva expresión del factor de performance como se expresa en la ecuación 6.

$$f_p = (R - S)z + S \quad (6)$$

Se obtiene una relación lineal del factor de performance y la variable z . Esta es la llamada *curva característica* del secadero. Tanto el factor de performance como la variable tienen rango acotado entre 0 y 1, para cuando el aire en el secadero esté completamente saturado a temperatura ambiente y cuando la radiación incidente sea nula respectivamente. Aportes posteriores a esta teoría (Condori 1999) sostienen que el factor de performance está parametrizado con el contenido de humedad. La pendiente de la representación del factor de performance en función de la variable z dice mucho acerca de la eficiencia del secadero, pues las constantes S y R dependen principalmente del flujo del aire en el secadero y la radiación incidente.

EXPERIENCIA

Descripción del prototipo y equipo de medida

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 secadero con 50 m² de área de suelo, más 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 secadero 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 la parte superior del secadero. 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 velocidades 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 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-secadero. En la elección de sensores de temperatura se tuvieron en cuenta las dimensiones reducidas del prototipo, por lo que se utilizaron termistores debido a su tamaño. La humedad absoluta en las cámaras y en el exterior se midió a través de psicrómetros contruados 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. El esquema del sistema de medida se observa en la figura 1. Las variaciones de masa se registraron mediante una balanza construida utilizando un transductor de presión (Mealla et al., 2000). Se tuvo en cuenta el hecho de que el conjunto de lámparas que simulaban la radiación generaban radiación infrarroja que se acumulaba en el local en donde se realizaron los ensayos; para eliminar el aire caliente del local, se instaló un extractor, asegurando de esta manera el ingreso de aire fresco al local y así tener las condiciones de temperatura y humedad similares al exterior. El registro de las distintas temperaturas en el lapso de un día se muestran en la figura 2, en donde hay una pequeña diferencia entre la temperatura exterior y la temperatura del interior del local de pruebas.

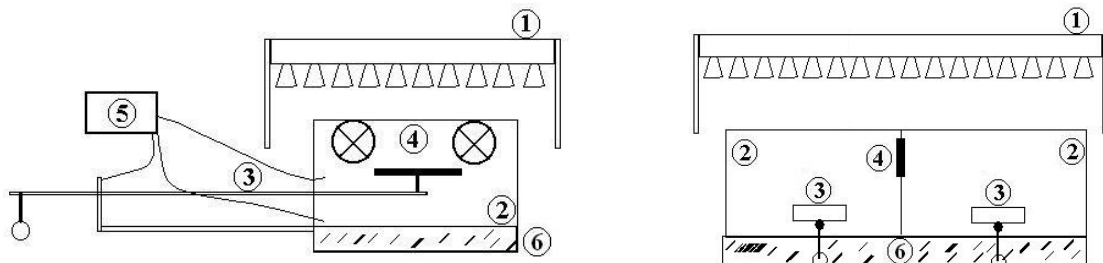


Figura 1: Vista frontal y lateral del invernadero secadero utilizado en la experiencia (1) arreglo de lámparas (2) cámaras de secado (3) balanza (4) ventiladores (5) sistema de toma de datos (6) aislamiento en la base.

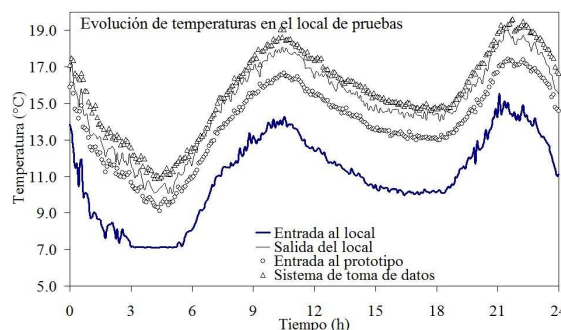


Figura 2: temperaturas de interés en el local de medición.

En la figura 2 se observa que hay una diferencia aproximada de 3,8 °C entre las temperaturas de entrada y salida del local; en el punto de entrada al prototipo la temperatura difiere de la entrada en aproximadamente 2 °C. El punto más caliente del local se identificó en donde se ubicó el sistema de toma de datos, la temperatura de ese punto difiere de la temperatura

exterior en aproximadamente 4,3 °C. En general no existió desfases en el tiempo de la temperatura de los puntos dentro del local con respecto a la entrada.

Mediciones

Dos grupos de mediciones se realizaron: una primera tanda de medidas se hizo con bandejas de agua simulando producto para la configuración de simple y doble cámara. Se ensayó con dos bandejas semicilíndricas (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 salidas 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 de la superficie de la bandeja, se realizaron múltiples experiencias en días que presentaban condiciones ambiente similares. La radiación medida tuvo un valor aproximado a 490 W/m². El flujo en ambas experiencias fue de 0,021 kg/s. Para ambas pruebas, a fin de comparar, se muestran los datos hasta cuando ambas presentaban el 20% de contenido de agua respecto a la masa inicial como se muestra en la figura 3.

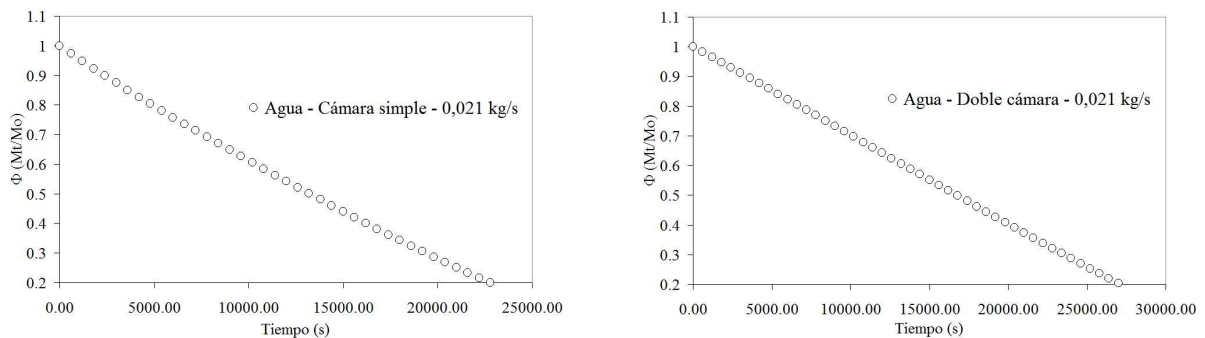


Figura 3: Contenido adimensional de humedad para invernadero secadero de simple y doble cámara, pruebas con bandejas de agua sometidas a un mismo flujo de aire.

Una segunda tanda se realizó con un dispositivo que simulaba un 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 de 0,01 m 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 secaderos de simple y doble cámara, se utilizaron valores de radiación cercanos a los 500 W/m², al igual que el criterio seguido para las medidas con agua. 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/s. Otras de similares características se realizaron con baja velocidad y alta radiación, con un flujo de aire de 0,01 kg/s. Todas las mediciones se cortan para un contenido de agua del 40% para uniformizar la comparación de los secaderos y hacer un buen ajuste de curva. Esto se muestra en la figura 4.

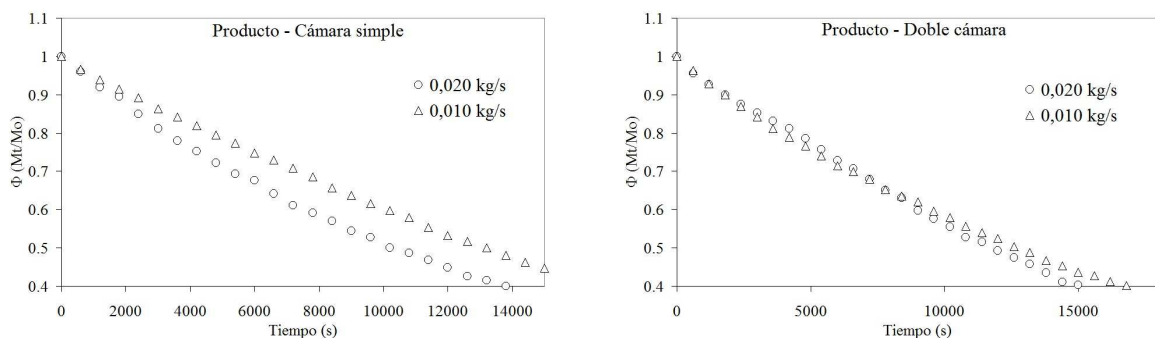


Figura 4: Contenido adimensional de humedad para invernadero secadero de simple y doble cámara, pruebas con producto sometido a dos valores de flujo de aire.

Resultados de la aplicación de las metodologías de comparación a los grupos de datos

Al aplicar ambas metodologías de análisis a los datos obtenidos de las experiencias con bandejas de agua sometidas a un mismo flujo de aire y a la misma radiación, se observó que la variación del contenido de humedad es marcadamente lineal, tal como se debe esperar para una experiencia de evaporación libre de líquido. Las curvas para obtener el IPS resultan lineales haciendo imposible un ajuste exponencial, donde se nota que el Índice de Performance del Secadero es mayor para el secadero de cámara simple que el de doble cámara, contrario a lo que se pretende demostrar. Esto se muestra en la figura 5,

donde se observan las curvas del contenido de la humedad adimensional en función del tiempo adimensional; vemos la curva de ajuste, que muestra una marcada desviación respecto de los datos.

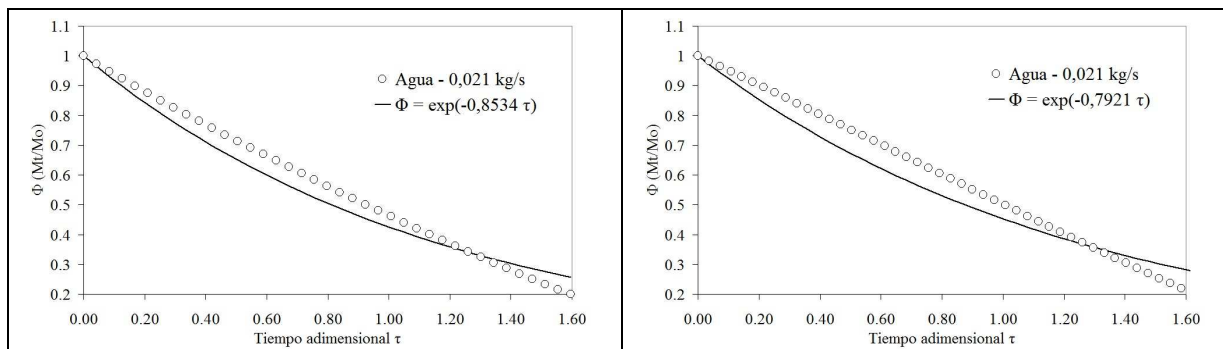


Figura 5: Contenido adimensional de humedad en función del tiempo adimensional para invernadero secadero de simple y doble cámara, ajuste exponencial con IPS.

Se observó que el IPS para el secadero de cámara simple tiene un valor de 0,8534 en contra de un valor de 0,7921 para el secadero de doble cámara. Estos resultados se pueden interpretar por el error marcado en cuanto al ajuste de la curva exponencial a los datos que presentan una linealidad importante. La tabla 1 muestra los principales resultados del análisis de error para las experiencias realizadas con agua.

Ensayo	IPS	ERMC	EE	r
Cámara simple	0,8534	0,0440	0,0071	0,9580
Doble cámara	0,7921	0,0558	0,0083	0,9364

Tabla 1: Parámetros significativos de los ensayos realizados con agua.

Los valores obtenidos del ERMC tiene un valor muy alto, de esta manera según muestran las curvas en la figura 5, el ajuste no es bueno, por lo tanto, no se puede aplicar la metodología IPS a pruebas realizadas con superficie de agua libre pues no hay un comportamiento parecido a la transferencia de agua desde el interior del producto hacia la superficie, y eso en gran medida, se representa por una curva exponencial y no con una recta como lo muestran los resultados obtenidos.

Al comparar ese grupo de medidas con el modelo propuesto por Saravia et al. (1990), se observó que la pendiente de la curva de ajuste del factor de performance en función de z tienen una marcada diferencia. Esa variable está notablemente influenciada por la variación de las condiciones ambiente externas durante los ensayos. La figura 6 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. Se observó que la pendiente es más pronunciada en el caso de los datos obtenidos para en el invernadero de doble cámara, pero la variación de la variable z está muy acotada. Esto se explica por la poca diferencia entre la humedad de saturación a la temperatura del producto y el contenido de humedad del aire ambiente. En las medidas obtenidas para cámara simple se observa mayor variabilidad para la variable z , pero una pendiente más suave se debe en gran medida por las condiciones distintas en cuanto a las diferencias de humedad entre el producto y el aire entrante. En mediciones de evaporación de agua superficial el modelo de Saravia es mucho mas sensible que le método IPS.

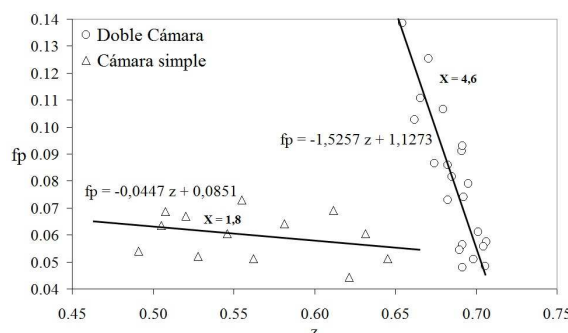


Figura 6: Comparación de los factores de performance para pruebas con agua en simple y doble cámara.

En el caso de las medidas con producto, cuando se aplicó la metodología IPS, se observó lo que predecía la propuesta de Singh y Kumar (2012), pues en primer lugar las curvas se obtuvieron en un proceso donde es evidente la difusión de agua desde el interior del producto hacia la superficie. Según se observa en la figura 6, los datos ajustados para el contenido de humedad adimensional y el tiempo adimensional presentan coincidencia sin importar las condiciones a las cuales se realizaron, tanto para los resultados de producto sometido a secado en el invernadero de cámara simple como en el invernadero de doble cámara. Se observó que el cálculo del Índice de performance del Secador para las experiencias de secado con doble cámara supera a las realizadas con el secador de cámara simple, demostrando la estrategia de secado con un

invernadero de doble cámara es más beneficiosa que el secado con un secador de cámara simple. En la figura 7 se observa los datos superpuestos y la curva de ajuste con el respectivo *IPS*.

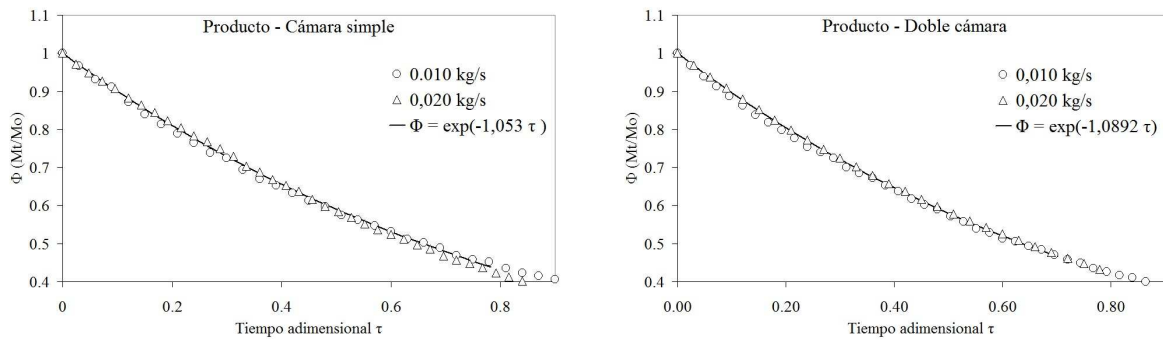


Figura 7: Contenido adimensional de humedad en función del tiempo adimensional para invernadero secadero de simple y doble cámara para dos flujos de aire, ajuste exponencial con *IPS*.

Tomamos como curva representativa, cualquiera de ellas, pues los datos después de aplicar la metodología *IPS* tienden a coincidir en una misma curva. En la tabla 2 se observa los parámetros más representativos obtenidos de aplicar la metodología a los distintos grupos de datos generados en los ensayos con producto.

Ensayo	<i>IPS</i>	<i>ERMC</i>	<i>EE</i>	<i>r</i>
Cámara simple	1,0530	0,0128	0,0021	0,9990
Doble cámara	1,0892	0,0097	0,0015	0,9995

Tabla 2: Parámetros significativos de los ensayos realizados con producto.

Se observa un mayor *IPS* para los ensayos realizados con doble cámara, los valores de los tres errores confirma lo mostrado en la figura 7, en donde se evidencia un excelente ajuste entre la curva simulada y los datos representados como función de las variables adimensionales.

En cuanto al modelo de Saravia et al. (1990), para los secados realizados en cámara simple se tienen en cuenta los datos para el análisis hasta cuando la variación de peso registrada fue invariable, mientras que en los secados con cámara doble se analiza hasta cuando las variaciones de peso en la cámara con producto semiseco son invariables. 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 vaporización en la superficie libre de líquido está ausente del proceso, sólo se observa una marcada presencia de la difusión de agua desde el interior del producto hacia la superficie. La figura 8 muestra 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. Condorí (1999) donde se postula que $f_p(z)$ está parametrizada con el contenido de humedad.

Del análisis de las graficas únicamente se puede concluir que el invernadero de doble cámara presenta un mejor rendimiento si comparamos las pendientes de dos grupos de datos con parámetros de contenido de agua similar. En el caso de los datos para cuando se tiene flujo de aire alto, se puede observar que si la velocidad de secado es 4,6 la pendiente del secadero de doble cámara presenta una pendiente más pronunciada que el secadero de cámara simple. En el resto de los datos no se observan diferencias notorias.

CONCLUSIONES

Se realizaron medidas en un prototipo de invernadero secadero de simple y doble cámara construido a escala, sometido a radiación artificial para simular la radiación solar. Todas las experiencias se realizaron bajo condiciones controladas de radiación y flujo de aire. Se utilizó bandejas de agua y espuma de poliuretano embebida en agua para simular el comportamiento de un producto típico.

Se sometieron a análisis bajo dos metodologías para identificar cuál de los dos diseños tiene el mayor rendimiento. De las medidas con agua se encontró que con la metodología *IPS* no se encuentra resultados concluyentes debido a que se produce evaporación de superficie libre de líquido. Tal como lo predice el método, se debe tomar la parte de la curva de secado en donde la difusión de líquido del interior del producto sea preponderante, pues para cuando se evapora líquido no se puede realizar un buen ajuste. Cuando se simula un producto mediante el poliuretano embebido en agua, se observa el comportamiento deseado, pudiendo de esta manera aplicar la metodología *IPS* tal como lo predice.

Aplicando el modelo de Saravia et al. (1990), se encuentra que el rendimiento del secadero de doble cámara supera ampliamente al de simple cámara, presentando una pendiente muy pronunciada cuando se ajusta el factor de performance en función de la variable z .

Se observó que en las mediciones realizadas con producto la metodología del *IPS* es concluyente a favor del secadero invernadero de doble cámara, pues arroja un Índice mayor que el correspondiente al secadero de cámara simple y unos parámetros relacionados con los errores de ajuste mas adecuados, pues la curva de simulación es casi coincidente con los datos representados en las dos variables adimensionales. En cambio con la metodología de Saravia et al. (1990), se observa una relativa superioridad de la técnica de secado con doble cámara, pero solo comparando un reducido grupo de datos en los que demuestran esta tendencia.

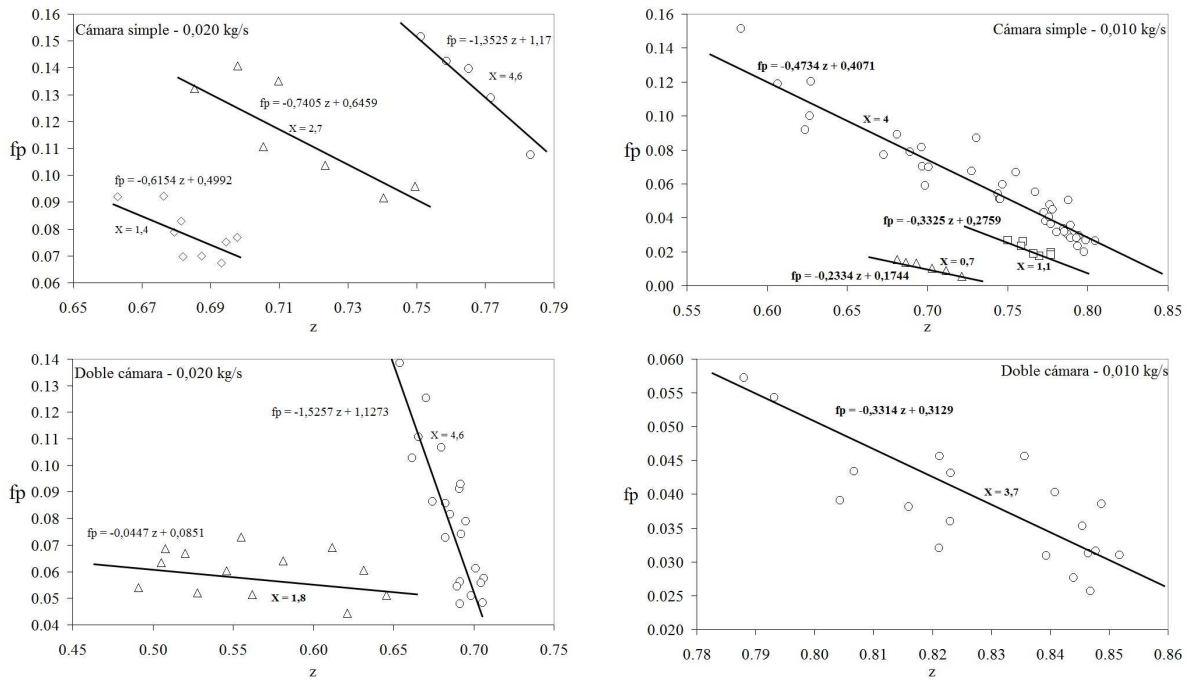


Figura 8: Comparación de los factores de performance para pruebas con producto en simple y doble cámara para dos flujos de aire.

NOMENCLATURA

Φ : Contenido de humedad referido a la masa inicial (adimensional).

M_t : Masa del producto al tiempo t (kg).

M_0 : Masa inicial del producto (kg).

k_0 : Factor de demora (adimensional).

k : Constante de secado (adimensional).

IPS : Índice de performance del secador (1/s).

τ : Tiempo de secado (adimensional).

$ERMC$: Error raíz media cuadrática (adimensional).

N : Número de puntos tomados para el cálculo de los errores (adimensional).

$\Phi_{exp,i}$: Valor experimental del contenido de humedad referido a la masa inicial del punto i -ésimo (adimensional).

$\Phi_{ajus,i}$: Valor simulado del contenido de humedad referido a la masa inicial del punto i -ésimo (adimensional).

EE : Error estándar (adimensional).

σ : Varianza (adimensional).

r : Coeficiente de correlación (adimensional).

χ_w : Potencial de secado debido a la diferencia de humedad de saturación del producto a temperatura ambiente y el contenido de humedad del aire entrante al secador (W).

q_f : Calor latente de cambio de fase del agua (J).

m_a : Flujo de aire en el secadero (kg/s).

$w_s(t_a)$: Humedad de saturación a temperatura ambiente (kg de agua/kg de aire).

w_a : Humedad ambiente (kg de agua/kg de aire).

χ_i : Potencial de secado debido a la radiación incidente (W).

A_s : Área de suelo del secadero (m²).

I : Radiación incidente en el secadero (W/m²).

χ : Rendimiento del invernadero (W).

R y S : Constantes de ajuste dependientes de la geometría y condiciones de secado (adimensionales).

f_p : Factor de performance del invernadero (adimensional).

z : Variable característica del secadero invernadero (adimensional).

REFERENCIAS

- Singh S., Kumar S. (2012). New approach for thermal testing of solar dryer: Development of generalized drying characteristic curve. *Solar Energy* 86, 1981–1991.
- 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.
- Leon M.A., Kumar S., Bhattacharya S.C. (2002). A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy* 6, 367–393.
- Ekechukwu O.V. (1999). Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. *Energy Convers Manage* 40(6), 593-613.
- Ekechukwu O.V., Norton B. (1999). Review of solar-energy drying systems. II: an overview of solar drying technology. *Energy Convers Manage* 40(6), 615–55.
- Ekechukwu O.V., Norton B. (1999). Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications. *Energy Convers Manage* 40 (6), 657-667.
- Dincer I., Dost S., (1996). A modelling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of solid objects. *International Journal of Energy Research* 20, 531–539.
- Condorí M. A. (1999). Estudio de Secaderos Invernaderos del Tipo Túnel. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta.
- Mealla L., Saravia L., Condorí M. (2000). Implementación de un laboratorio para experiencias de secado bajo condiciones Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 4, fasc.1, 02.35 - 02.40.
- Mealla L., Saravia L., Condorí M. (2000). Convalidación experimental del modelo invernadero-secador de doble cámara. Pruebas de laboratorio. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 4, fasc.1, 02.35 - 02.40.
- Duffie J. A., Beckman W. A.(1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª. Edición, Wiley & sons, Inc, New York.
- Mujumdar A. S.(1987). *Handbook of Industrial Drying*. Marcel Dekker, Inc.
- 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.
- Saravia L., Zunino L. y Echazú R.(1990). Performance y Diseño de Secadores Invernaderos de Convección Forzada. *Actas de la 14ª Reunión de Trabajo de ASADES*, Mendoza, 331-341.
- 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.
- Corvalan R, Roman R, Saravia L. (1995). *Ingeniería del secado solar*. CYTED-D.

ABSTRACT

The purpose of the research is to compare different methodologies that analyze the performance of simple and double chambers greenhouse dryers applied to a scale prototype. Data is gathered under constant artificial radiation and air flow at different velocity rates, measuring two different test groups: simple water and a simulated product.

The comparison is based on the workings of Saravia et al. (1990) and that of Singh and Kumar (2012) known as the dryer performance index. Results show that the double chamber green house dryer is more efficient under both analyses.

Keywords: solar energy, drying, comparison, green house dryer, performance.