

Diseño e implementación de un programa de software para el dimensionamiento de un secador de doble tambor

Paulina Loya, Gastón Guerra y Bolívar Izurieta
Departamento de Ciencia de Alimentos y Biotecnología
Laboratorio de Bioprocesos
paulireina@hotmail.es

Resumen

En el presente trabajo se desarrollaron los programas SETA I Y SETA II, escritos en Visual Basic 6.0™, que permiten obtener las dimensiones de un secador continuo de doble tambor. Para acopiar datos para el desarrollo de los programas, se realizaron pruebas de deshidratación en un secador bench scale, en las que se deshidrataron lotes de 0.800 kg de pasta de banano en modalidad semi-batch para establecer la influencia de la presión del vapor saturado, de la velocidad de rotación de los tambores, y de la separación entre ellos; sobre la humedad final. Para el diseño de los programas SETA I y SETA II se desarrollaron dos algoritmos: El primero estima, por iteración, la temperatura de la superficie de secado; y la velocidad de evaporación del agua. Y un segundo algoritmo que permite estimar el área nominal del secador en base al área de la película deshidratada y a un factor de área que relaciona el número de revoluciones necesarias para secar el lote alimentado en cada experimento con el ángulo de contacto, y que permite estimar la longitud y el diámetro del secador a partir del área nominal y de la relación longitud/diámetro del secador utilizado en los experimentos. Por medio de pruebas de hipótesis para muestras pequeñas basadas en el estadígrafo t de Student, que consistieron en analizar la diferencia entre las medias aritméticas de las áreas nominales calculadas por los programas y el área nominal real, se estableció que las diferencias entre éstas no fueron significativas. Para comprobar la idoneidad del programa SETA II, éste se ejecutó utilizando flujos másicos de agua evaporada típicos de secadores comerciales industriales de doble tambor para dimensionar los secadores sobre esta base, pudiéndose concluir que el programa obtiene aproximaciones razonables a las áreas de los secadores comerciales industriales.

Palabras claves: Deshidratación, Secador continuo, Secador de doble tambor, Velocidad de evaporación del agua, Área nominal del secador.

Abstract

Two computer programs, SETA I and SETA II, were developed in Visual Basic 6.0™ in the context of this work, for the estimation of the dimensions of continuous double drum dryers. The experimental dehydrations were carried out on banana slurry, dehydrated in batches of 0.800 kg, to correlate the steam pressure, the speed of rotation of the drums, and their separation with the final moisture content of the product, and the mass flow and rate of water evaporation. The computer programs were based on two algorithms. The first algorithm estimates the temperature of the drying surface by iteration, and the rate water evaporation. The second algorithm estimates the nominal drying area on the basis of the area of the dehydrated film, and an area factor which relates the number of revolutions needed to dry the batch with the contact angle. The length and diameter of the dryer are then estimated on the basis of the thus estimated nominal area, and the length/diameter ratio of the dryer used in the experiments. The experimental results were compared with the results obtained from the computer programs through the calculation of the relative percentage variation; and hypotheses testing based on the Student's t statistic for small samples. The testing permitted to conclude that the difference between the experimental and estimated areas was not significant. The suitability of the SETA II program was established by feeding it commercial data on mass flows of water evaporated in commercial dryers, and comparing these data with the results obtained by the program by means of the calculation of the relative percentage variation. This comparison permitted to conclude that the results obtained by the program satisfactorily approximate the dimensions and capacities of commercial dryers.

Keywords: Dehydration, Continuous dryer, Double drum dryer, Rate of water evaporation, Nominal drying area.

1 Introducción

Los secadores de tambor o de rodillos se desarrollaron al comienzo del siglo XX, habiéndoselos utilizado desde esa época hasta antes de la invención del secado por aspersión (Spray Drying), para secar casi todos los alimentos líquidos [8].

En la actualidad, el secado en secadores de tambor o rodillos es uno de los métodos más eficientes en términos de consumo de energía, y uno de los más adecuados, para el secado de líquidos de alta viscosidad, o de alimentos en forma de puré [2].

Además, estos secadores son particularmente convenientes para el secado de productos termosensibles porque permiten un secado a presión reducida y a una consecuente baja temperatura durante un corto tiempo [5].

Estos secadores se emplean mundialmente debido a su capacidad para manejar un amplio rango de productos tales como pegamentos, aglomerantes, emulsificantes, lácteos, alimentos para bebé, cereales para el desayuno, pulpas de frutas y vegetales, puré de papa, almídonos cocidos y levaduras [8].

Todos los productos de estos secadores tienen buena porosidad y por consiguiente, buena rehidratación, que son cualidades muy importantes para la fácil reconstitución de productos tales como el puré de papas, cualidades que se deben a la característica evaporación del agua por ebullición que se produce en estos secadores [7].

Estas características hacen que el secador de doble tambor sea un equipo recomendable para el procesamiento de alimentos, cuyo diseño y construcción se facilitará con el uso de los programas que se han creado en el contexto de este Proyecto de Titulación.

A este respecto es pertinente citar que, en los últimos 30 años se han realizado esfuerzos considerables por desarrollar programas computacionales aplicables a los procesos de secado; y que —sin embargo— pocos han sido los paquetes computacionales comerciales relacionados con el secado y con el diseño de sistemas de secado que han sido aceptados satisfactoriamente por la industria [3].

Por las razones mencionadas, se presume que la disponibilidad de un programa para el dimensionamiento de secadores de doble tambor podría ser de utilidad para la industria alimentaria ecuatoriana la que no sólo dispondrá de una herramienta de dimensionamiento para el diseño de detalle y para la construcción de este tipo de secadores, sino que —además— contará con una herramienta idónea para su evaluación.

2 Materiales

Para preparar la pasta utilizada en las pruebas experimentales, se empleó bananos con un contenido de humedad de $(2.96 \pm 0.16) \text{ kgH}_2\text{O} / \text{kg Sólido Seco}$, de un grado de madurez de 4.6 ± 1.05 según la escala de color de Von Loesecke [1], y un contenido de sólidos solubles de 19.33 ± 0.60 Brix.

La deshidratación de la pasta de banano se realizó en un secador atmosférico GF Double Drum Dryer, Model 215 fabricado por Mathis Machine Corporation. Cada uno de los dos tambores del secador fue fabricado en acero inoxidable 316, y tiene 12.7 cm de diámetro y 23.5 cm de longitud, y está dotado de cuchillas ubicadas a 208° del punto de aplicación de la pasta húmeda que sirven para desprender el producto deshidratado, y se calienta por medio de vapor saturado que proviene de un calderín eléctrico.

La pasta de banano que se desea deshidratar se vierte en el espacio que se forma entre los tambores hasta una altura de alimentación de $4.22 \pm 0.025 \text{ cm}$.

Los tambores giran en dirección al espacio de alimentación, y el espaciamiento entre ellos determina el espesor de la película que se forma sobre su superficie.

La humedad final de las películas deshidratadas se determinó en una estufa THELCO, Modelo 28, hasta un peso constante. Para esto se utilizó una balanza OHAUS, modelo SC2020, con una precisión $\pm 0.01 \text{ g}$. La humedad final se expresó en kg de agua/kg de sólido seco.

3 Métodos

3.1 Diseño experimental

El diseño experimental consideró, en cada caso, al menos 3 niveles de variación, con dos repeticiones para cada una de ellas, determinándose la humedad final de las películas deshidratadas en cada caso.

En cada experimento se cambió el valor de una de las variables, y se mantuvo fijos los otros dos. Para ello se trabajó primero con la presión del vapor, luego con la separación entre los tambores, y finalmente con la velocidad de rotación de los tambores.

Las presiones de vapor (P_v) utilizadas fueron: 20; 30; 40; 50 y 60 psig, medidas con una precisión $\pm 0.5 \text{ psig}$, fijándose las mediante la válvula reguladora de presión, manteniendo la separación entre los tambores en 0.20 mm; y su velocidad de rotación en $6 \text{ rpm} \pm 0.5 \text{ rpm}$.

Los experimentos se realizaron a 0.20; 0.30; 0.40; 0.50 y 0.60 mm de separación, a $6 \text{ rpm} \pm 0.5 \text{ rpm}$ de velocidad, y a $60 \text{ psig} \pm 0.5 \text{ psig}$. Para establecer la separación entre los tambores (b), se empleó un calibrador de láminas TRUPER. Para establecer la separación se encajó la lámina seleccionada entre los tambores, y se manipuló el mecanismo de ajuste hasta permitir el paso ajustado de la lámina del calibrador entre ellos.

Las velocidades de rotación (V_{rc}) utilizadas fueron 5; 6 y 7 rpm, medidas con una precisión $\pm 0.5 \text{ rpm}$, y reguladas a través del dispositivo regulador de la velocidad; con una separación entre tambores de 0.20 mm, y con vapor saturado de $60 \text{ psig} \pm 0.5 \text{ psig}$.

La humedad final (X_f) se determinó secando un peso aproximado de 4 gramos de las películas deshidratadas, por 24 horas hasta un peso constante, a 100°C .

Los resultados obtenidos en el presente Proyecto tienen un intervalo de confianza del 99%, que se deter-

minó utilizando el estadígrafo t de Student.

3.2 Desarrollo de los algoritmos de cálculo

Se desarrollaron dos algoritmos para el diseño de los programas, que permiten el dimensionamiento de secadores de doble tambor.

El primero, que fue propuesto por Guerra, 2008, sobre la base de las ecuaciones de diseño formuladas por Okos et al., 1992, se utiliza para estimar la temperatura de la superficie del secado, que se denota como T_{ss} . Esta temperatura sirve -a su vez- para estimar la presión de vapor del agua sobre esa superficie, y para estimar la velocidad de secado N , en $\text{kgH}_2\text{O}/\text{hm}^2$.

El modelo, que considera que la transferencia de calor ocurre a estado estacionario, permitió, mediante iteración, obtener un valor único de la temperatura de la superficie de secado (película deshidratada).

Para estimar el valor de la temperatura de la superficie de secado se parte de un valor asumido T_{ass} con el que se calcula la presión del vapor de agua sobre esta superficie. Este valor permite el cálculo de la velocidad de secado, y con él se calcula un coeficiente de evaporación h_e , que permite el cálculo de un valor de la tasa de calor q/Ah transferida.

Con el valor de q/Ah se calcula, de forma independiente, un "valor calculado" T_{ss} , que se compara con el valor anterior de temperatura. El criterio de convergencia se basa en que el valor absoluto de la diferencia entre el valor T_{ass} y T_{ss} sea menor que un valor pequeño ϵ preestablecido, $\epsilon = 0.001$. Si el valor calculado no cumple este criterio se repite el cálculo usando el valor calculado T_{ss} como valor asumido T_{ass} , hasta que el criterio se satisfaga y se obtenga un valor de temperatura de la superficie de secado, que permita establecer el valor de la velocidad de evaporación del agua.

El segundo algoritmo permitió hallar el área de la película deshidratada sobre la base del flujo másico y la velocidad de evaporación del agua.

Debido a que las pruebas de deshidratación se realizaron en modalidad semi-batch; se determinó un factor de área igual a la relación entre el número de revoluciones totales y el ángulo de contacto (ángulo del arco del secador subtendido por la superficie de la película deshidratada).

El área efectiva de los tambores (área en contacto con la película deshidratada) se obtuvo de la relación entre el área de la película deshidratada y el factor de área; mientras que el área libre (área en contacto con el aire) se determinó a partir del área efectiva de los tambores y el ángulo de contacto. Finalmente el área total del secador es la sumatoria del área efectiva y el área libre.

La longitud y el diámetro del secador se obtuvieron a partir del área total, y de la relación L/D del secador con que se trabajó en los experimentos.

Para comprobar el funcionamiento de los programas SETA I y SETA II, se ejecutaron con los resultados experimentales.

4 Resultados y discusión

4.1 Diseño experimental

En la figura 1 se puede apreciar la disminución de la humedad final con el incremento la temperatura del vapor saturado de calentamiento.

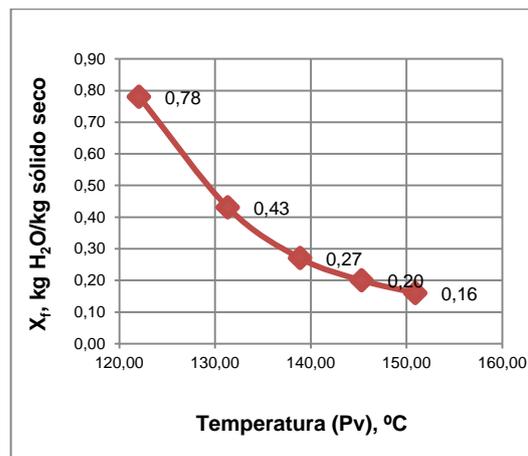


Figura 1. Variación de la humedad final en función de la temperatura del vapor: $Vrc = 6$ rpm; $b = 0,20$ mm para pastas de $X_i = 2.96$ $\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg}$ sólido seco

La tendencia que se muestra en el gráfico es correcta debido a que al incrementarse la temperatura del medio de calentamiento se incrementa la gradiente de temperatura que produce la transferencia e calor, lo que a su vez incrementa la velocidad de evaporación del agua, y obtiene un material con menor contenido de humedad final.

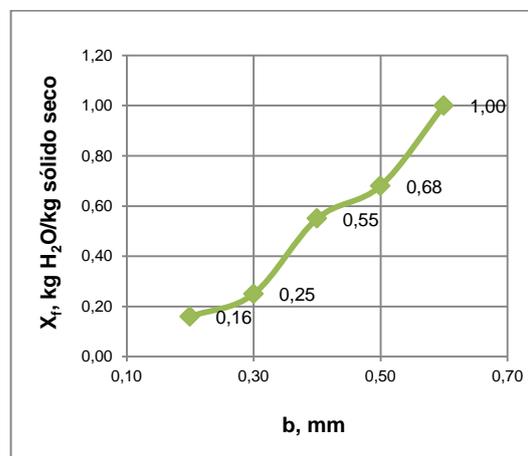


Figura 2. Variación de la humedad final en función de la separación entre tambores: $Vrc = 6$ rpm; $Pv = 60$ psig para pastas de $X_i = 2.96$ $\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg}$ sólido seco

Al aumentarse la separación entre los tambores del secador aumentó el espesor de la película, lo que implicó la disminución del tiempo de residencia de la película en el secador, obteniéndose un producto con mayor contenido de humedad final que otro obtenido con una menor separación entre cilindros, que es lo que se puede observar en la figura 2.

Cuando se aumenta la velocidad de rotación de los tambores del secador y se mantienen constantes la presión de vapor de calentamiento y la separación entre tambores, se obtiene un producto con mayor humedad final media, como se puede observar en la figura 3, lo que se debe a que el tiempo de residencia del material disminuye, y la energía transferida por unidad de masa también.

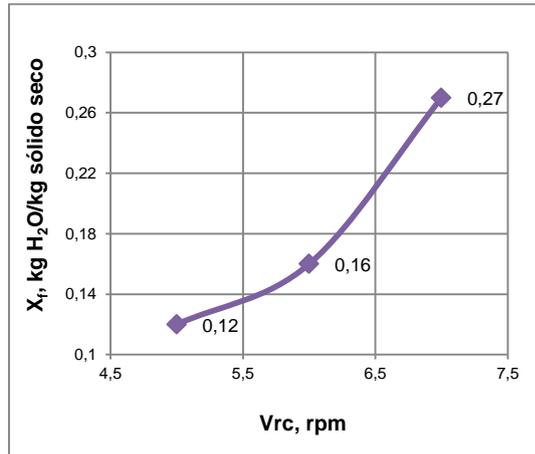


Figura 3. Variación de la humedad final media en función de la velocidad de rotación de los tambores: $P_v = 60$ psig; $b = 0.20$ mm para pastas de $X_i = 2.96$ kgH₂O /kg sólido seco

4.2 Diseño del software para el dimensionamiento del secador de doble tambor

Temperatura de la superficie de secado. La temperatura de la superficie de la película deshidratada no se pudo medir cuando se realizaron las pruebas de deshidratación porque no se disponía de sensores infrarrojos, por lo que en el presente Proyecto no es posible ofrecer evidencia experimental a este respecto.

Las temperaturas de la superficie de secado (película deshidratada) se estimaron a partir de las ecuaciones de diseño que involucran la transferencia de calor, que depende, principalmente, de la presión de vapor del medio de calentamiento, de la velocidad del aire circundante, y del coeficiente de transferencia de calor por conducción de la película de banano.

La presión de vapor es un parámetro importante debido a que determina la diferencia de temperatura entre la pared del tambor y la temperatura de la superficie de secado.

Para poder utilizar el modelo se debió estimar un valor medio de velocidad del aire circundante, que se estimó como 0.015 m/s, que fue el que se utilizó como valor referencial único en los programas. Este valor de velocidad, que en la práctica implica condiciones de convección natural, se estimó a partir de la velocidad de evaporación del agua determinada en los experimentos.

Por otro lado, el coeficiente de transferencia de calor de la película por conducción de banano se deter-

minó con base en los resultados de las pruebas de deshidratación, pudiéndose comprobar, que éste varía de acuerdo a las condiciones operativas (Presión de vapor del medio de calentamiento, separación y velocidad de rotación de los tambores).

Conforme aumentó la temperatura del vapor aumentó, el calor latente de condensación del vapor disminuyó, por lo que se incrementó el flujo másico del vapor, hecho que se pudo comprobar experimentalmente; esto promovió el incremento en la temperatura de la pared del tambor, y ocasionó el aumento de la temperatura de la superficie de secado (película deshidratada), como se puede ver en la figura 4.

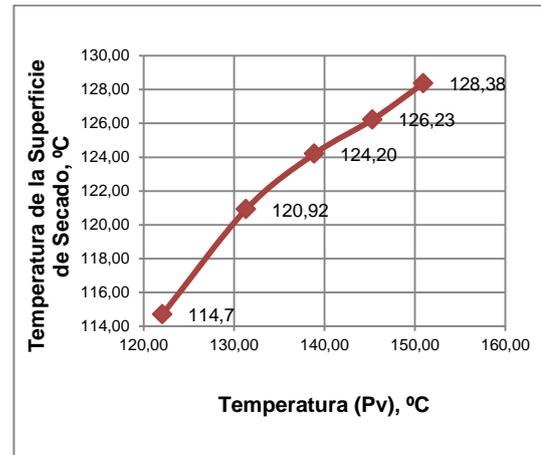


Figura 4. Temperatura de la superficie de secado en función de la temperatura del vapor $Vrc = 6$ rpm; $b = 0.20$ mm

Por otra parte, a medida que se incrementó la separación entre tambores, se produjo un incremento en la tasa del consumo del vapor; promoviendo el aumento de la temperatura de la pared del tambor, con el consecuente aumento de la temperatura de la superficie de secado (película deshidratada) como se puede apreciar en la figura 5.

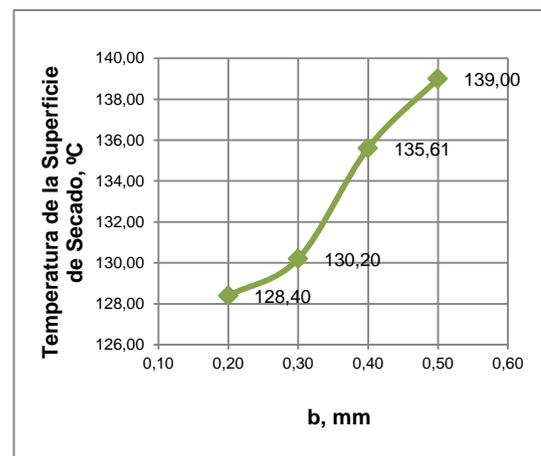


Figura 5. Temperatura de la superficie de secado en función de la separación entre tambores: $Vrc = 6$ rpm; $P_v = 60$ psig

Así mismo, el incremento de la velocidad de rotación de los tambores, produjo un incremento en el flujo másico-

co del vapor; haciendo que la temperatura de la pared del tambor aumente, e incremente subsecuentemente, la temperatura de la superficie de secado (película deshidratada) como se aprecia en la figura 6.

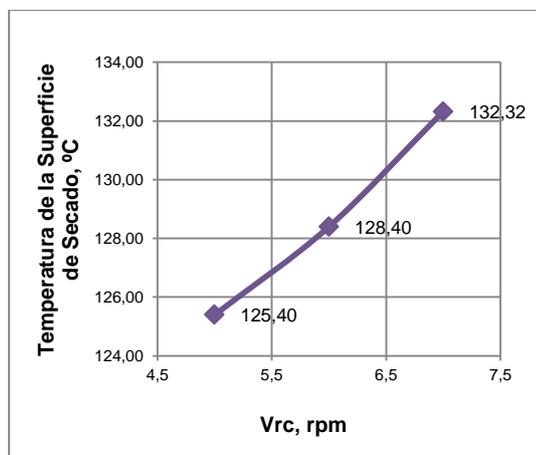


Figura 6. Temperatura de la superficie de secado en función de la velocidad de rotación $Pv = 60$ psig; $b = 0,20$ mm

Velocidad de evaporación del agua. La velocidad de evaporación del agua es función de la velocidad del aire y de la diferencia entre la presión de vapor del agua a la temperatura de la superficie de secado y la presión parcial del agua en el aire. Los resultados obtenidos en la simulación se presentan en las figuras 7, 8 y 9; en ellas se puede notar que las curvas de las velocidades de evaporación del agua presentan el mismo comportamiento que las curvas experimentales.

La presión de vapor del agua se incrementó con el aumento de la temperatura de la superficie de secado, y consecuentemente se promovió el incremento de la velocidad de evaporación del agua como se muestra en las figura 7, 8 y 9.

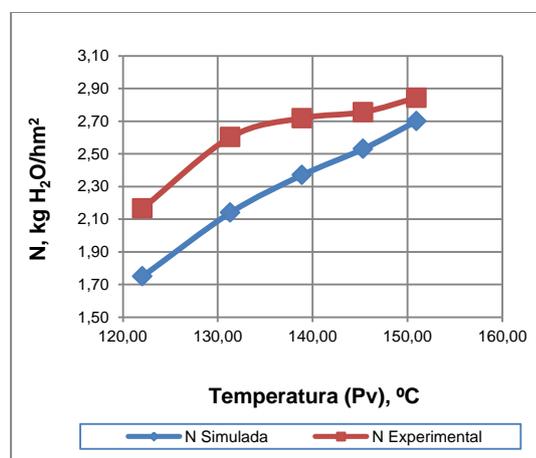


Figura 7. Velocidad de evaporación del agua en función de la temperatura del vapor $Vrc = 6$ rpm; $b = 0.20$ mm

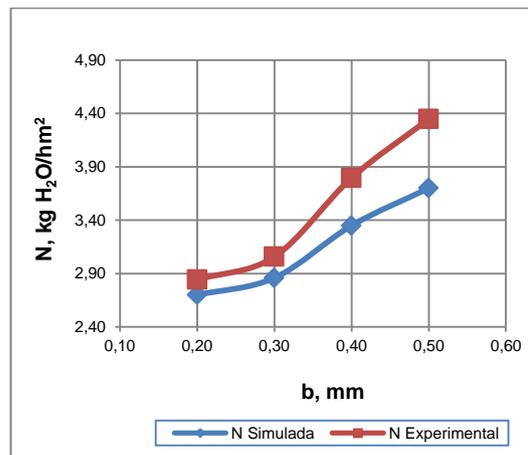


Figura 8. Velocidad de evaporación del agua en función de la separación entre tambores $Vrc = 6$ rpm; $Pv = 60$ psig

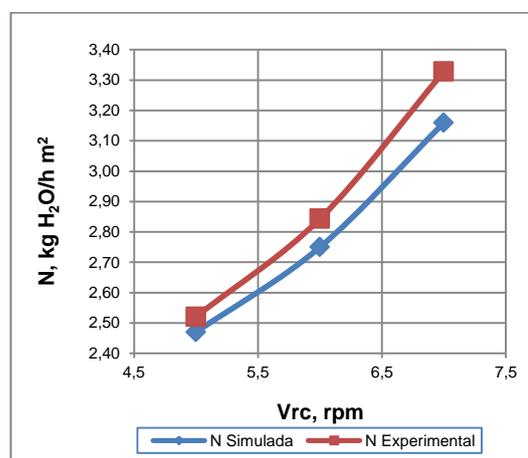


Figura 9. Velocidad de evaporación del agua en función de la velocidad de rotación $Pv = 60$ psig; $b = 0,20$ mm

Área nominal de los tambores del secador (A_t). El área nominal de los tambores se estimó con base en el área de la película deshidratada y con base en el factor de área.

El factor de área es un valor constante, que se determinó utilizando el promedio del número de revoluciones (semi-batch), y el ángulo de contacto (ángulo del arco del secador que se encuentra en contacto con la superficie de la película deshidratada).

Se realizó un contraste de hipótesis para muestras pequeñas, mediante el cálculo de diferencia de medias entre las áreas simuladas y el área real; de acuerdo a las tablas 1 y 2 los valores de significación se encuentran por debajo de los coeficientes críticos; por lo tanto, se acepta la "Hipótesis Cero", H_0 de igualdad de grupos; pues, se determinó que no hay diferencia significativa entre ellos.

Longitud y diámetro del secador. Se estimó la longitud y el diámetro del secador utilizado en los experimentos sobre la base de las áreas nominales de los tambores simuladas y de la relación longitud/diámetro, la misma que fue $L/D = 1.85$.

En las siguientes tablas se presentan los diámetros y las longitudes estimadas por los programas, y las variaciones porcentuales relativas para las diferentes condiciones operativas. Utilizando el flujo másico de producción como parámetro de entrada en el caso de SETA I; y

el flujo másico del agua evaporada en el caso de SETA II. Se puede apreciar que las variaciones porcentuales entre los resultados simulados y los reales presentan un comportamiento cualitativo similar a las variaciones obtenidas con las áreas de los tambores.

Tabla 1. Coeficientes de Significación: Área nominal de los tambores. Parámetro de entrada: Flujo másico de producción SETA I

Variables		Pv , psig	b , mm	Vrc , rpm
Grados de libertad		8	8	6
A_t Simulada, m ²		0,22 ± 0,05	0,18 ± 0,06	0,20 ± 0,09
A_t Real, m ²		0,19 ± 0,00	0,19 ± 0,00	0,19 ± 0,00
Coeficientes de Significación	t_c 0,995	3,36	3,36	4,6
	t	1,23	0,16	0,12

Tabla 2. Coeficientes de Significación: Área nominal de los tambores. Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada SETA II

Variables		Pv , psig	b , mm	Vrc , rpm
Grados de libertad		8	8	6
A_t Simulada, m ²		0,23 ± 0,04	0,19 ± 0,04	0,21 ± 0,06
A_t Real, m ²		0,19 ± 0,00	0,19 ± 0,00	0,19 ± 0,00
Coeficientes de Significación	t_c 0,995	3,36	3,36	4,6
	t	2,04	0,12	0,54

Tabla 3. Diámetros y Longitudes del secador: $Vrc = 6$ rpm; $b = 0.20$ mm; Variable= Pv . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción, SETA I

Pv	Tv	A_t Simulada	A_t Real	Variación porcentual relativa	Diámetro, m		Variación porcentual relativa
					D simulado	D real	
psig	°C	m ²	m ²	%			%
20 ± 0,5	122,07	0,26	0,19	26,92	0,149	0,127	14,77
30 ± 0,5	131,33	0,23	0,19	17,39	0,140	0,127	9,29
40 ± 0,5	138,89	0,21	0,19	9,52	0,136	0,127	6,62
50 ± 0,5	145,33	0,21	0,19	9,52	0,135	0,127	5,93
60 ± 0,5	150,95	0,20	0,19	5,00	0,132	0,127	3,79
Pv	Tv	A_t Simulada	A_t Real	Variación porcentual relativa	Longitud, m		Variación porcentual relativa
					L simulado	L real	
psig	°C	m ²	m ²	%			%
20 ± 0,5	122,07	0,26	0,19	26,92	0,277	0,235	15,16
30 ± 0,5	131,33	0,23	0,19	17,39	0,259	0,235	9,27
40 ± 0,5	138,89	0,21	0,19	9,52	0,251	0,235	6,37
50 ± 0,5	145,33	0,21	0,19	9,52	0,249	0,235	5,62
60 ± 0,5	150,95	0,20	0,19	5,00	0,244	0,235	3,69

Tabla 4. Diámetros y Longitudes del secador: $Vrc = 6$ rpm; $Pv = 60$ psig; Variable= b . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción, SETA I

b	A_t Simulada	A_t Real	Variación porcentual relativa	Diámetro, m		Variación porcentual relativa
				D simulado	D real	
mm	m ²	m ²	%			%
0,20	0,20	0,19	5,00	0,132	0,127	3,79
0,30	0,21	0,19	9,52	0,134	0,127	5,22
0,40	0,19	0,19	0,00	0,127	0,127	0,00
0,50	0,18	0,19	5,56	0,124	0,127	2,42
b	A_t Simulada	A_t Real	Variación porcentual relativa	Longitud, m		Variación porcentual relativa
				L simulado	L real	
mm	m ²	m ²	%			%
0,20	0,20	0,19	5,00	0,244	0,235	3,69
0,30	0,21	0,19	9,52	0,248	0,235	5,24
0,40	0,19	0,19	0,00	0,235	0,235	0,00
0,50	0,18	0,19	5,56	0,229	0,235	2,62

Tabla 5. Diámetros y Longitudes del secador: $b = 0.20$ mm; $Pv = 60$ psig; Variable= Vrc . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción, SETA I

Vrc	A_t Simulada	A_t Real	Variación porcentual relativa	Diámetro, m		Variación porcentual relativa
				D simulado	D real	
rpm	m ²	m ²	%			%
5 ± 0,5	0,18	0,19	5,56	0,126	0,127	0,79
6 ± 0,5	0,20	0,19	5,00	0,132	0,127	3,79
7 ± 0,5	0,21	0,19	9,52	0,136	0,127	6,62
Vcr	A_t Simulada	A_t Real	Variación porcentual relativa	Longitud, m		Variación porcentual relativa
				L simulado	L real	
rpm	m ²	m ²	%			%
5 ± 0,5	0,18	0,19	5,56	0,232	0,235	1,29
6 ± 0,5	0,20	0,19	5,00	0,244	0,235	3,69
7 ± 0,5	0,21	0,19	9,52	0,252	0,235	6,75

Tabla 6. Diámetros y Longitudes del secador: $b = 0.20$ mm; $Vrc = 6$ rpm; Variable= Pv . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción, SETA I

Pv	Tv	A_t Simulada	A_t Real	Variación porcentual relativa	Diámetro, m		Variación porcentual relativa
					D simulado	D real	
psig	°C	m ²	m ²	%			%
20 ± 0,5	122,07	0,25	0,19	24,00	0,148	0,127	14,19
30 ± 0,5	131,33	0,25	0,19	24,00	0,146	0,127	13,01
40 ± 0,5	138,89	0,23	0,19	17,39	0,141	0,127	9,93
50 ± 0,5	145,33	0,22	0,19	13,64	0,137	0,127	7,30
60 ± 0,5	150,95	0,21	0,19	9,52	0,135	0,127	5,93
Pv	Tv	A_t Simulada	A_t Real	Variación porcentual relativa	Longitud, m		Variación porcentual relativa
					L simulado	L real	
psig	°C	m ²	m ²	%			%
20 ± 0,5	122,07	0,25	0,19	24,00	0,273	0,235	13,92
30 ± 0,5	131,33	0,25	0,19	24,00	0,270	0,235	12,96
40 ± 0,5	138,89	0,23	0,19	17,39	0,260	0,235	9,62
50 ± 0,5	145,33	0,22	0,19	13,64	0,254	0,235	7,48
60 ± 0,5	150,95	0,21	0,19	9,52	0,249	0,235	5,62

Tabla 7. Diámetros y Longitudes del secador; $Vrc = 6$ rpm; $Pv = 60$ psig; Variable= b . Parámetro de entrada: Flujo másico del agua evaporada, SETA II

b	A_t Simulada	A_t Real	Variación porcentual relativa	Diámetro, m		Variación porcentual relativa
				D simulado	D real	
mm	m ²	m ²	%			%
0,20	0,21	0,19	9,52	0,135	0,127	5,93
0,30	0,20	0,19	5,00	0,132	0,127	3,79
0,40	0,18	0,19	5,56	0,125	0,127	1,60
0,50	0,17	0,19	11,76	0,120	0,127	5,83
b	A_t Simulada	A_t Real	Variación porcentual relativa	Longitud, m		Variación porcentual relativa
				L simulado	L real	
mm	m ²	m ²	%			%
0,20	0,21	0,19	9,52	0,249	0,235	5,62
0,30	0,20	0,19	5,00	0,245	0,235	4,08
0,40	0,18	0,19	5,56	0,231	0,235	1,73
0,50	0,17	0,19	11,76	0,222	0,235	5,86

Tabla 8. Diámetros y Longitudes del secador: $b = 0.20$ mm; $Pv = 60$ psig; Variable= Vrc . Parámetro de entrada: Flujo másico de producción, SETA II

Vrc	A_t Simulada	A_t Real	Variación porcentual relativa	Diámetro, m		Variación porcentual relativa
				D simulado	D real	
rpm	m ²	m ²	%			%
5 ± 0,5	0,20	0,19	5,00	0,132	0,127	3,79
6 ± 0,5	0,21	0,19	9,52	0,135	0,127	5,93
7 ± 0,5	0,22	0,19	13,64	0,137	0,127	7,30
Vcr	A_t Simulada	A_t Real	Variación porcentual relativa	Longitud, m		Variación porcentual relativa
				L simulado	L real	
rpm	m ²	m ²	%			%
5 ± 0,5	0,20	0,19	5,00	0,245	0,235	4,08
6 ± 0,5	0,21	0,19	9,52	0,249	0,235	5,62
7 ± 0,5	0,22	0,19	13,64	0,254	0,235	7,48

También se ejecutó el programa SETA II; con datos de presión de vapor y flujo de agua evaporada reportados por empresas que fabrican secadores de doble tambor en los Estados Unidos.

Las variaciones porcentuales relativas de las áreas simuladas respecto de las comerciales son pequeñas como se puede observar en la tabla 9.

Tabla 9. Áreas de los tambores a una $Pv = 160$ psig

Presión	Área de los tambores		Variación porcentual relativa
	A_t Simulada	A_t Comercial	
160 psig			
kgH ₂ O evaporada/h	m ²	m ²	%
12,70	0,18	0,20	11,11
57,30	0,80	0,87	8,75
152,30	2,13	2,32	8,92
304,50	4,26	4,65	9,15
440,00	6,15	6,78	10,24
609,50	8,52	9,38	10,09
761,80	10,65	11,71	9,95
846,40	11,83	13,01	9,97
999,50	13,97	15,33	9,74
1110,90	15,52	17,00	9,54
1333,20	18,63	20,44	9,72
2285,00	31,93	35,02	9,68

Tabla 10. Áreas de los tambores a una $Pv = 160$ psig

Presión	Diámetro		Variación porcentual relativa	Longitud		Variación porcentual relativa
	D Simulada	D Comercial		L Simulada	L Comercial	
160 psig						
kgH ₂ O evaporada/h	m	m	%	m	m	%
12,70	0,145	0,152	4,83	0,195	0,203	4,10
57,30	0,291	0,305	4,81	0,437	0,457	4,58
152,30	0,582	0,610	4,81	0,582	0,610	4,81
304,50	0,582	0,610	4,81	1,164	1,219	4,73
440,00	0,775	0,813	4,90	1,263	1,321	4,59
609,50	0,776	0,813	4,77	1,746	1,829	4,75
761,80	0,772	0,813	5,31	2,182	2,286	4,77
846,40	0,776	0,813	4,77	2,427	2,540	4,66
999,50	1,019	1,067	4,71	2,181	2,286	4,81
1110,90	1,015	1,067	5,12	2,435	2,540	4,31
1333,20	1,018	1,067	4,81	2,912	3,048	4,67
2285,00	1,455	1,524	4,83	3,492	3,658	4,10

5 Conclusiones

- Los programas SETA I y SETA II, proporcionan una directriz general para dimensionar secadores de doble tambor de tamaño determinados, como se puede comprobar en los resultados presentados en las tablas 9 y 10, pues SETA II representa adecuadamente las dimensiones y capacidades de secadores comerciales.
- Los dos algoritmos desarrollados para el diseño de SETA I y SETA II se enlazaron de manera adecuada, ya que las variaciones porcentuales relativas de las dimensiones estimadas por los programas respecto a las dimensiones del secador utilizado en los experimentos son pequeñas, como se observa en las tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8.
- Las variables presión del vapor, separación entre tambores y velocidad de rotación afectaron el contenido de humedad final de la película deshidratada, el flujo másico de evaporación del agua, y subsecuentemente la velocidad de secado.

Referencias

- Díaz, J., 1982, *Producción de una mezcla alimenticia de banano y soya deshidratada en secador de rodillos*, Tesis previa a la obtención de título de Ingeniero en la Especialización de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador, p. 22.
- Drum Drying Resources, 2009; *Secadoras de Tambor Dobles de Tipo Atmosférico, Principios de Operación y de producción de Alimentos*, www.quiminet.com/archivos_empresa/01a6d5d98c4d06b4486563e359.pdf (Agosto, 2009).
- Gong, Z., y Mujumdar, A., 2008, *Software for Design and Analysis of Drying Systems*, *Drying Technology*, 26 (7), 884.
- Guerra, G., 2008, *Diseño de Procesos para Pequeñas y Medianas Empresas*, p. 95, en prensa.
- Nonhebel, G. y Moss, M., 1979, *El secado de sólidos en la industria química*, Editorial Reverté, Barcelona, España, pp. 2, 37, 38, 39, 187, 190, 203.
- Okos, M., Narsimhan, G., Singh, R. y Weitnauer, A., 1992, *Food Dehydration* en Heldman, D., "Handbook of Food Engineering", 1st edition, Marcel Dekker, New York, The United States of America, pp. 508, 510, 511.
- Rodriguez, G.; Vasseur, J. y Courtois, F., 1996, *Design and Control of drum Dryers for the Food Industry. Part 1. Set-Up of a Moisture sensor and an Inductive Heater*, *Journal of Food Engineering*, 28 (3), 279.
- Tang, J., Feng, H., y Shen G., 2003, *Drum Drying* en Heldman, D., "Encyclopedia of Agricultural, Food and Biological Engineering", Marcel Dekker, New York, The United States of America, p. 211.