

# Simulación del secado neumático de biomasa con movimiento en espiral ascendente

## Simulation of biomass pneumatic drying with ascending swirling movement

Eugenio F. Bombino Matos, Edel Pineda Revilla

I. Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Santiago de Cuba. Cuba.

Correo electrónico: [bombino@uo.edu.cu](mailto:bombino@uo.edu.cu)

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 23 de mayo de 2017

Aceptado: 30 de julio de 2017

### Resumen

Considerando la forma de capa que adquieren las partículas durante el proceso estudiado fue necesario definir la relación existente entre el área de transferencia de calor y masa y el flujo de material para poder simular con mayor precisión este tipo de secado. Los resultados de la simulación se compararon, a través de un análisis estadístico basado en el programa Statgraphics-Centurion V15, con los resultados obtenidos en otros estudios de secadores neumáticos de bagazo y fueron semejantes por lo que se concluyó que es correcta la definición hecha sobre la relación

área/flujo de material definida en este trabajo y que es posible reducir la altura de los secadores neumáticos de biomasa usando este método. Esta reducción que se puede apreciar a través del índice de Reducción de Altura (IRA) de la columna de secado, definido en el trabajo, permitirá secadores de biomasa más compactos.

**Palabras claves:** secado neumático, secado en espiral ascendente, secado de biomasa.

### Abstract

Considering the layer form acquired by the particles during the studying process it was necessary to define the relation between the heat and mass transfer area and particles flow to simulate with more precision this kind of drying. The simulations results were compared, by a statistical analysis based in Statgraphics-Centurion V15 program, with the results obtained in others pneumatic bagasse dryers studies and were similar and for that reason it was categorical that is correct the definition made

about the relation cheap area/material flow defined in this work and it's possible to reduce pneumatic dryer height by using this method. This reduction that can be seen by the Height Reduction Sing (HRS) of the drying column, defined in the work, will permit more compact dryers.

**Key words:** pneumatic drying; drying in ascending swirling, biomass drying.

### Introducción

La biomasa constituye uno de los mayores potenciales de fuente renovable de energía existente en Cuba y, para su mejor aprovechamiento, es necesario secarla, Bombino Matos E.F. *et al.* [1, 2]. Uno de los métodos más empleados actualmente para secar la biomasa es el secado neumático con gases producto de la combustión aunque actualmente también se utilizan otros tipos de secadores para secarla de forma económica y ambientalmente aceptable como son los fluidizados y los rotatorios, Nawshad H. *et al.* [3]. Los secadores neumáticos son los más utilizados en la actualidad para secar el bagazo de caña aunque presentan el inconveniente de sus grandes dimensiones para lograr el tiempo de residencia adecuado cuando las partículas se mueven rectilíneamente a lo largo de la columna de secado. Debido a esta problemática desde hace algún tiempo se están desarrollando trabajos sobre el secado neumático de biomasa en ciclones separadores buscando una vía de solución al problema, De Oliveira F.L. *et al.* [4] y en secadores de cama fluidizada de forma general, Denning J. *et al.* [5], entre otros.

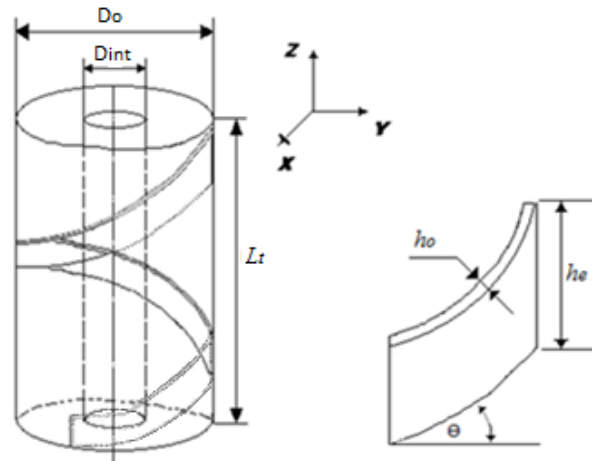
Se han desarrollado diversos trabajos sobre el secado neumático de biomasa entre los que se destacan los de Nebra S.A. *et al.* [6] en ciclones. Se han realizado modelaciones del movimiento en espiral que han sido comprobadas a través de las caídas de presión y las velocidades del gas y el sólido, Niyogi K. *et al.* [7] aunque sin tener en cuenta el movimiento en forma de una capa de partículas.

Este trabajo, tomando en consideración los anteriores, se realizó con el objetivo de definir la relación que existe entre el área de transferencia de calor y masa y el flujo de material durante el secado neumático de una capa de partículas de biomasa con movimiento en espiral ascendente para desarrollar adecuadamente la simulación de este proceso. El estudio se realizó a partir de un diseño estadístico basado en el programa Statgraphics-Centurion V15, concluyéndose que es correcta la definición área/flujo de material establecida aquí para este tipo de secado, de acuerdo con las respuestas obtenidas, lo que evidencia la posibilidad de desarrollar secadores neumáticos de biomasa más compactos.

## Métodos y Materiales

Es importante comenzar con la validación del modelo numérico comparando las caídas de presión y las velocidades con valores experimentales, Niyogi K. *et al.* [7]. En este trabajo, luego de cumplida esta etapa se estuvo en condiciones de simular el secado de las partículas moviéndose formando una capa en espiral al ser arrastradas con aire caliente.

Esto fue posible porque en el caso del movimiento forzado del agente portador de calor el carácter del movimiento del fluido no depende del intercambio de calor, para los límites en que están presentes las diferencias de temperaturas, durante el secado neumático de bagazo, Bombino M.E.F. *et al.* [2]. A una conclusión similar llegaron Prabhu y colaboradores quienes, para entender la influencia del calor en la formación de la estela en un vórtice formado entre dos cilindros, realizaron experimentos con calentamiento y sin calentamiento del flujo y, al comparar, concluyeron que se forma la misma estela en ambos casos, Prabhu, S. *et al.* [8]. En estos casos las condiciones de semejanza fluidodinámica son la premisa indispensable de la similitud térmica, Bombino M.E.F. *et al.* [1]. Los modelos de transferencia de calor y masa utilizados en este trabajo fueron comprobados por otros autores al estudiar el secado neumático de partículas de biomasa entre los que se pueden citar a De Oliveira F.L. *et al.* [4]; Nebra, S.A. *et al.* [6]; Ibraim K.A. *et al.* [9], entre otros, aunque no se encontraron referencias de que en algún caso se tuviera en cuenta el flujo de las partículas en forma de una capa con movimiento en espiral ascendente. Ver la figura 1 que fue desarrollada para representar el fenómeno visualizado en el laboratorio.



**Fig. 1.** Elemento diferencial de una capa de partículas con altura ( $h_e$ ) y espesor ( $h_o$ ) durante el secado con movimiento en espiral ascendente.

### Modelos generales de transferencia de calor y masa empleados para simular el secado neumático de partículas de bagazo de caña

Ecuación de la transferencia de masa, Nebra, S.A. *et al.* [6].

$$G_m \cdot \frac{dU}{dL_i} = -\alpha_m \cdot S_T \cdot \left( \frac{X_S - X_1}{1 - X_S} \right) \quad 1$$

Dónde:

$\alpha_m$  – Coeficiente de transferencia de masa;  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

$X_S$  - Concentración de vapor en la superficie del material; adimensional

$X_1$  - Concentración de vapor en la corriente de aire; adimensional

$P_1$  - Presión parcial del vapor en la corriente de aire; Pa

$P_S$  - Presión del vapor en la superficie del material; Pa

$P$  – Presión total de la mezcla; Pa

$S_T$  – Área de transferencia de calor y masa partículas–aire por unidad de longitud;  $\text{m}^2/\text{m}$

$G_m$  – Flujo de material;  $\text{kg}/\text{s}$

Ecuación de la transferencia de calor para el material, Nebra, S.A. *et al.* [6].

$$G_m \cdot \left( C_{p_m} \cdot \frac{dT_m}{dL_i} + \frac{dU}{dL_i} \cdot C_{p_a} \cdot T_m + U \cdot C_{p_a} \cdot \frac{dT_m}{dL_i} - \frac{dU}{dL_i} \cdot h_v \right) = S_T \cdot \alpha_q \cdot (T_f - T_m) \quad 2$$

Dónde:

$C_{p_m}$  - Calor específico del material;  $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$

$C_{p_a}$  – Calor específico del agua;  $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$

$U$  – Contenido de humedad del material en base seca; %

$h_v$  – Entalpía del vapor;  $\text{kJ}/\text{kg}$

$\alpha_q$  – Coeficiente de transferencia de calor;  $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$

Ecuación de la transferencia de calor para el aire, Nebra, S.A. *et al.* [6].

$$G_f \cdot \left( C_{p_f} \cdot \frac{dT_m}{dL_i} + C_{p_v} \cdot W_i \cdot \frac{dT_f}{dL_i} \right) = S_T \cdot \alpha_q \cdot (T_m - T_f) \quad 3$$

Donde:

$G_f$  – Flujo de gas; kg/s

$W_i$  – Contenido de humedad inicial: kg/kg<sub>f</sub>

### Relación ST/Gm para una capa de partículas de biomasa durante el secado neumático con movimiento en espiral ascendente

Luego de estudiar las particularidades de este proceso, en que las partículas se agrupan en forma de capa, se concluyó que este término debe quedar en función de las dimensiones de referencia altura ( $h_e$ ) y espesor ( $h_o$ ) de la capa de partículas porque son las dimensiones fundamentales por donde se realiza el contacto entre esta capa y el agente secador y también debe estar en función del flujo de material ( $G_m$ ). Considerando que la transferencia de calor y masa se efectúa a través de la interface partícula-gas, definida por la superficie de la capa de material, las ecuaciones 1, 2 y 3 se transforman.

Teniendo en cuenta la definición del término  $S_T$  como el área de transferencia entre las partículas y el aire por unidad de longitud infinitesimal de desplazamiento  $\partial L_i$ , según Nebra, S. A. *et al.* [6]. El área de transferencia de calor y masa entre la superficie de la capa de partículas y el aire ( $\Delta S_c$ ), según la figura 1, se definió de la forma siguiente, ecuación 4:

$$\Delta S_c = (h_e + 2 \cdot h_o) \partial L_i \quad 4$$

Teniendo en cuenta la definición mencionada anteriormente y la ecuación 4, el término  $S_T/G_m$ , se escribió la ecuación 5:

$$\frac{S_T}{G_m} = \frac{\Delta S_c / \partial L_i}{G_m} = \frac{(h_e + 2 \cdot h_o) \cdot \partial L_i / \partial L_i}{G_m} = \frac{(h_e + 2 \cdot h_o)}{G_m} \quad 5$$

Al sustituir 5 en 1, 2 y 3 las ecuaciones de transferencia de calor y masa, para una capa de partículas de bagazo durante el secado con movimiento en forma de espiral ascendente, quedaron de la forma siguiente:

Nueva forma de la ecuación de transferencia de masa, ecuación 6:

$$\left( \frac{dU}{dL_i} \right) = -\alpha_m \cdot \frac{(h_e + 2 \cdot h_o)}{G_m} \cdot \frac{(P_S - P_1)/P}{(1 - P_S/P)} \quad 6$$

Con la ecuación 6 se determinó la variación de humedad por unidad de longitud del desplazamiento, el signo menos indica que la masa de agua que sale del material durante el secado es absorbida por el aire.

Nueva forma de la ecuación de transferencia de calor para el materia, ecuación 7:

$$\left( \frac{dT_m}{dL_i} \right) = \left( \frac{\alpha_q (h_e + 2 \cdot h_o) (T_f - T_m)}{G_m (C_{p_m} + U \cdot C_{p_a})} - \frac{C_{p_a} T_m - h_v}{(C_{p_m} + U \cdot C_{p_a})} \right) \cdot \left( \frac{dU}{dL_i} \right) \quad 7$$

La ecuación 7, describió el comportamiento de la transferencia de calor para la capa de partículas de bagazo y, fue obtenida a partir de la ecuación 2. Esta ecuación 7 permitió determinar la temperatura del material a cada paso.

Nueva forma de la ecuación de la transferencia de calor para el aire, ecuación 8:

$$\left( \frac{dT_f}{dL_i} \right) = \frac{\Delta S \cdot \alpha_q (T_f - T_m)}{G_f (C_{p_f} + C_{p_v} W_i) \cdot 1000} \cdot \partial L_i \quad 8$$

La ecuación 8, describió el comportamiento de la transferencia de calor para el aire y, fue obtenida a partir de la ecuación 3. Mediante la ecuación 8 se pudo determinar la variación de temperatura del aire por unidad de longitud del recorrido.

### Determinación del coeficiente de transferencia de calor

En los diversos trabajos revisados sobre secado de bagazo, debido a las características físicas y morfológicas de este material, sus partículas se suelen dividir de dos formas: Partículas grandes o tipo fibra (mayores o iguales que 10 mm) y partículas pequeñas o tipo polvo (menores que 10 mm) y fueron estas últimas las estudiadas en este trabajo.

En el caso de las partículas pequeñas, se encontró mayor número de datos en la literatura científica y, se decidió adoptar la expresión recomendada por Nebra, S.A. *et al.* [6]. Las propiedades físicas del agente secador se definen a la temperatura del aire, ecuación 9:

$$Nu_q = 2 + [1,4 \cdot Re_{cp}^{0,2} + 0,13 \cdot Re_{cp}^{0,7}] \cdot Pr_m^{0,33} \quad 9$$

Esta ecuación fue comprobada experimentalmente para  $50 < Re_{cp} \leq 2000$  que está dentro del rango estudiado en este trabajo.

### Determinación del coeficiente de transferencia de masa

Para describir la transferencia de masa, se utilizó la analogía de Chilton y Colburn, haciendo las sustituciones correspondientes. Las soluciones de muchos problemas para bajas velocidades de transferencia de masa pueden obtenerse por analogía con los correspondientes problemas de transmisión de calor y viceversa Bombino Matos E.F. *et al.* [1].

El criterio adimensional de Schmidt es la ecuación 10:

$$S_C = \frac{\mu_f}{\rho_f \cdot \vartheta_{v-f}}$$

Dónde:  $\vartheta_{v-f}$  - Coeficiente de difusión del vapor en el aire. Se fundamenta a continuación.

### Determinación del coeficiente de difusión del vapor en el aire

Se determinó por la ecuación 11, según Lienhard J.H. [10], recomendada para la difusión de vapor de agua en el aire.

$$\vartheta_{v-f} = 1,87 \cdot 10^{-10} \cdot \left( \frac{T_f^{2,072}}{P} \right) \quad 11$$

Comprobada para:  $282 \text{ K} \leq T \leq 450 \text{ K}$  que está dentro del rango de temperaturas empleado en este trabajo

Donde:

$\vartheta_{v-f}$  - Coeficiente de difusión del vapor de agua en el aire [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$T_f$  - Temperatura del aire; K

$P$  - Presión total de la mezcla; atm

Los números adimensionales que intervinieron en la descripción del proceso son:

- 1- Número de Reynolds referido a la capa de partículas ( $Re_{cp}$ ).
- 2- Número de Nusselt para la transferencia de calor ( $Nu_q$ ).
- 3- Número de Nusselt para la transferencia de masa ( $Nu_m$ ).
- 4- Número de Prandtl ( $Pr$ ).
- 5- Número de Schmidt ( $Sc$ ).

Estos números adimensionales se aplicaron en la determinación de los coeficientes de transferencia de calor y masa.

### Simulación del secado con movimiento en espiral ascendente de partículas de bagazo

La validación de la modelación del movimiento en espiral ascendente de las partículas de biomasa en un flujo bifásico puede realizarse en relación con las velocidades y caídas de presión, Niyogi K. *et al.* [7]. En este caso se realizó con aire a temperatura ambiente, Bombino Matos E.F. *et al.* [2] y luego se procedió a modelar el secado con aire caliente, Bombino Matos E.F. [1]. Para realizar esta modelación del secado se consideraron reportes de trabajos sobre la cinética del secado de biomasa de varios autores, Chkir I. *et al.* [11]. A partir de la modelación mencionada anteriormente se efectuó la simulación del proceso estudiado.

Se planificó la simulación del secado con movimiento en espiral ascendente a través de un diseño factorial multinivel y mediante el programa Statgraphics-Centurion V15 teniendo en cuenta como variables dependientes: El tamaño de partículas, la temperatura inicial del aire y el flujo de bagazo, para los niveles siguientes:

Seis niveles del tamaño de partículas (0,8; 1,3; 1,8; 2,24; 2,82; 3,25) en mm

Tres niveles de temperatura inicial del aire: (125, 150, 175) en °C.

Tres niveles del flujo de bagazo: (10, 20, 30) en kg/h.

Como variable dependiente se seleccionó el contenido de humedad en base húmeda y las variables se combinaron a través de un diseño factorial (seis x tres x tres) niveles que indicó realizar 54 simulaciones.

La simulación del secado con movimiento en espiral ascendente se realizó para los seis niveles del tamaño de partículas que fueron estudiados con anterioridad, en el laboratorio, en relación a este tipo de movimiento con aire a temperatura ambiente.

## Resultados y Discusión

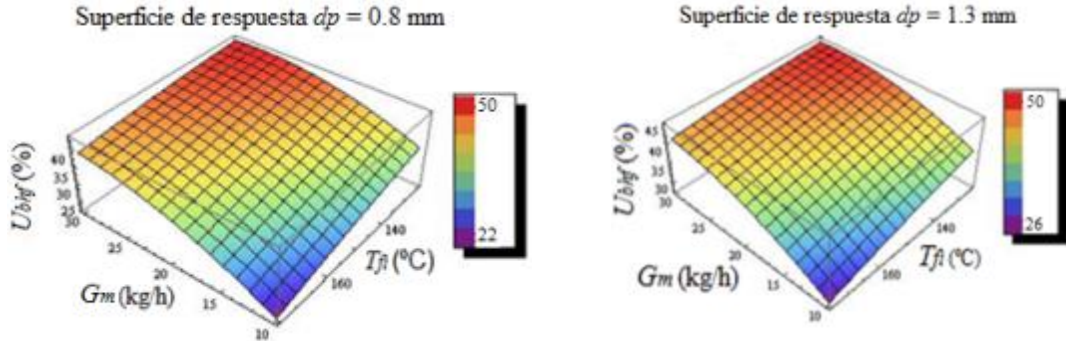
### Análisis estadístico de la simulación del secado neumático, con movimiento en espiral ascendente de partículas de bagazo, con aire caliente

Luego de definir la verdadera relación existente entre el área de transferencia de calor y masa y el flujo de material durante el secado con movimiento en espiral ascendente en forma de una capa de partículas de bagazo, se realizó un análisis estadístico de los resultados de la simulación de este proceso también mediante el programa Statgraphics-Centurion V15 y, se obtuvieron las superficies de respuesta así como las correlaciones de la variable dependiente contenido de humedad en base húmeda, como una función del flujo de material y de la temperatura inicial del agente de secado como variables independientes, con una buena aproximación a lo que ocurre cuando se seca neumáticamente el bagazo según las comparaciones hechas con los resultados de otros estudios.

En diversos trabajos al hacerse el estudio del secado neumático de biomasa se hizo énfasis en que, independientemente del contenido de humedad inicial, el secado de este material en los secadores neumáticos presenta una gran influencia del flujo de biomasa a secar, de la velocidad y temperatura inicial del agente de secado así como del tamaño de las partículas Nebra S.A. *et al.* [6], Salve A.M. *et al.* [13], entre otros. Una

tendencia similar se observa en las superficies de respuesta obtenidas del análisis estadístico de la simulación del secado neumático con movimiento en espiral ascendente, de una capa de partículas, que se presenta en este trabajo.

Las correlaciones obtenidas de las principales variables que intervienen en el proceso en cada caso, con el correspondiente coeficiente de correlación ( $R^2$ ) se presentan con sus correspondientes superficies de respuesta y fueron las siguientes, figuras 2, 3 y 4:



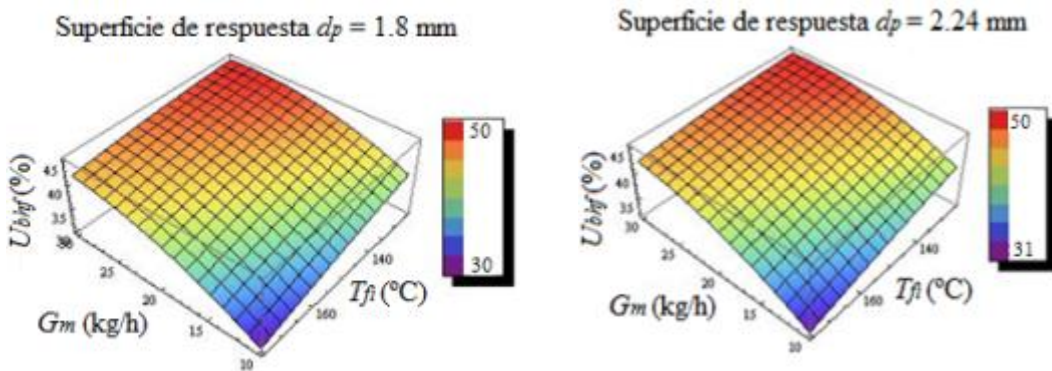
**Fig. 2.** Superficies de respuesta del comportamiento del secado con movimiento en espiral ascendente para una capa de partículas de bagazo con tamaños de 0,8 y 1,3 mm

$$U_{bf} = 39,0244 - 0,0493 \cdot T_{fi} + 0,861 \cdot G_m - 0,0008 \cdot T_{fi}^2 + 0,0073 \cdot T_{fi} \cdot G_m - 0,0323 \cdot G_m^2$$

Para  $dp = 0,8 \text{ mm}$ ;  $R^2 = 0,997305$

$$U_{bf} = 40,8011 - 0,0351 \cdot T_{fi} + 0,6913 \cdot G_m - 0,0007 \cdot T_{fi}^2 + 0,0060 \cdot T_{fi} \cdot G_m - 0,0263 \cdot G_m^2$$

Para  $dp = 1,3 \text{ mm}$ ;  $R^2 = 0,997302$



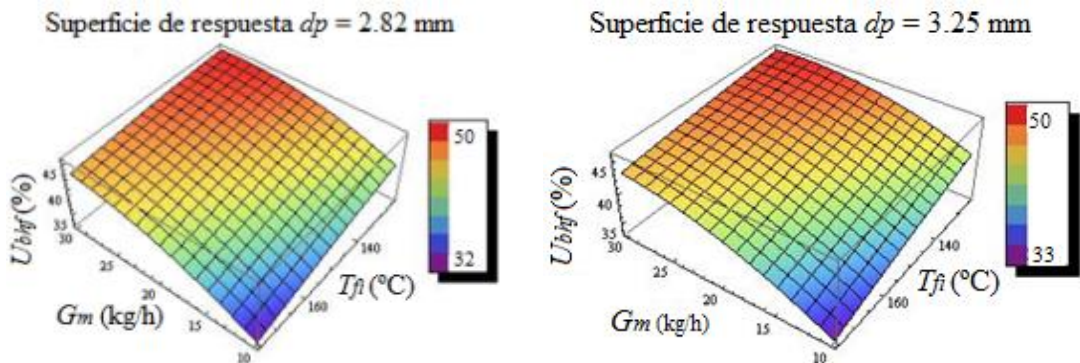
**Fig. 3.** Superficies de respuesta del comportamiento del secado con movimiento en espiral ascendente para una capa de partículas de bagazo con tamaños de 1,8 y 2,24 mm

$$U_{bf} = 41,8267 - 0,0306 \cdot T_{fi} + 0,6118 \cdot G_m - 0,0006 \cdot T_{fi}^2 + 0,0053 \cdot T_{fi} \cdot G_m - 0,0232 \cdot G_m^2$$

Para  $dp = 1,8 \text{ mm}$ ;  $R^2 = 0,997196$

$$U_{bf} = 42,4467 - 0,029T_{fi} + 0,567833G_m - 0,000584T_{fi}^2 + 0,00486T_{fi} G_m - 0,02145G_m^2$$

Para  $dp = 2,24 \text{ mm}$ ;  $R^2 = 0,997185$



**Fig. 4.** Superficies de respuesta del comportamiento del secado con movimiento en espiral ascendente para una capa de partículas de bagazo con tamaños de 2,82 y 3,25 mm

$$Ubh_f = 44,1344 - 0,0396T_{fi} + 0,494667G_m - 0,000506667T_{fi}^2 + 0,00464T_{fi}G_m - 0,0195667G_m^2$$

Para  $dp = 2,82 \text{ mm}$ ;  $R^2 = 0,997089$

$$Ubh_f = 49,28 - 0,0880667T_{fi} + 0,446167G_m - 0,00036T_{fi}^2 + 0,00458T_{fi}G_m - 0,01875G_m^2$$

Para  $dp = 3,25 \text{ mm}$ ;  $R^2 = 0,997085$

En estas gráficas se refleja que para cada uno de los flujos de material, compuestos por los 6 tamaños de partículas estudiados, se cumple que con el aumento de la temperatura y la disminución del flujo de material se produce una mayor reducción del contenido de humedad. También se puede ver que con la disminución del tamaño de las partículas tiende a incrementarse la reducción del contenido de humedad, resultado este que es semejante al observado por otros investigadores del secado neumático de biomasa, Chan Y. *et al.* [12], Salve A.M. *et al.* [13], por lo que la relación definida en este trabajo entre área de transferencia de calor y masa y el flujo de material se puede considerar adecuada.

### Comparación de los resultados de la simulación con los resultados experimentales reportados en otros estudios

Una respuesta similar fue obtenida por De Oliveira F.L. *et al.* [5] al secar bagazo de dos centrales azucareros en Brasil: Junqueira y Santa Lucía. El bagazo fue obtenido del patio con 74,52 % de humedad en base húmeda y directamente de la molienda con 51,72 % de humedad en base húmeda y se observó que tanto el bagazo obtenido del patio como el obtenido directamente de la molienda con diferentes contenidos de humedad siguieron una tendencia similar en cuanto al secado.

A través de la simulación del secado neumático con movimiento en espiral ascendente se obtuvo el comportamiento de la variable dependiente contenido de humedad final ( $Ubh_f$ ) como una función de las variables independientes flujo de material ( $G_m$ ) y temperatura inicial del aire ( $T_{fi}$ ), correlacionando con un nivel de confianza de 99 % para estos resultados que fueron semejantes a los resultados experimentales obtenidos en el trabajo antes mencionado a través de un análisis de varianza con el que se determinó que el coeficiente de correlación  $R^2$  estuvo entre 90 y 93 % para el contenido de humedad.

En el trabajo de De Oliveira *et al.* [4] también se reporta que para el bagazo obtenido en ambos centrales azucareros, independientemente del contenido de humedad inicial, se alcanzaron las mayores reducciones del contenido de humedad con el aumento de la temperatura y con la disminución del flujo de alimentación de sólidos y en otros trabajos se plantea además que para secadores neumáticos de biomasa esta influencia es grande, De Oliveira F.L. *et al.* [4], Chan Y. *et al.* [12], Salve A.M. *et al.* [13], lo que coincide con los resultados obtenidos en este trabajo.

Lo anteriormente planteado se explica porque el aumento de la concentración de biomasa influye inversamente en el secado neumático y, en este caso es debido a que, cuanto mayor es la concentración de bagazo menor es la cantidad de aire caliente que interviene en el secado por unidad de masa del material húmedo a secar.

La influencia directamente proporcional del aumento de la temperatura tiene relación con el aumento de la fuerza motriz del calor en el secado. Comportamientos similares para el secado neumático de biomasa fueron reportados por otros autores como Moreno M.R. *et al.* [14], Hong-Wei Li *et al.* [15].

Todos estos comportamientos son similares a los obtenidos en este trabajo como puede observarse en las superficies de respuesta presentadas en las figuras de la 3.3 a la 3.8 en las que para un mismo tamaño de partículas, cuando disminuye el flujo de material y aumenta la temperatura, se produce una mayor reducción del contenido de humedad del material.

### Una comparación con otros secadores neumáticos

Las simulaciones realizadas en este trabajo indican, además, que la reducción de humedad en el secado neumático con movimiento en espiral ascendente tiene una tendencia similar a la obtenida en otros secadores neumáticos de bagazo presentados en la tabla 1 en la que las simulaciones a escala de laboratorio se corresponden con las filas 3a, 3b y 3c, (ver tabla 1). En la fila 1 se presenta un secador neumático desarrollado por el Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras (ICINAZ), correspondiente al trabajo doctoral titulado Secado neumático de bagazo integral con los gases de escape de los generadores de vapor de los centrales azucareros de Arrascaeta Recaño A., en el que las partículas alcanzaron un recorrido de alrededor de 20 metros.

En la fila 2 se presenta un secador ciclónico desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Campinas (UNICAMP) en Brasil, correspondiente al trabajo doctoral titulado Secado neumático de bagazo de caña de Nebra A.S., en el que las partículas alcanzaron un recorrido algo menor que 15 metros.

En las filas 3a, 3b y 3c se presentan las simulaciones, a escala de laboratorio, correspondientes a la columna de secado con movimiento en forma de capa en espiral ascendente a escala de laboratorio, desarrolladas en este trabajo, en las que las partículas alcanzan un recorrido de alrededor de 4 metros.

**Tabla 1.** Comparación de la reducción de humedad [ $\Delta U_{bh(prom)}(\%)$ ] en dos secadores neumáticos de bagazo y en las simulaciones a escala de laboratorio

Nº	Tipo secador	Temperatura inicial gases $T_{fi}(\text{°C})$	Concentración másica $C_m(\text{kg}_b/\text{kg}_f)$	Reducción humedad $\Delta U_{bh(prom)}(\%)$
1	Neumático (ICINAZ)	232,2	0,18	44,3 – 29,8 $\Delta U_{bh(prom)}= 14,5$
2	Ciclónico (UNICAMP)	180	0,09	49,54 – 33,82 $\Delta U_{bh(prom)}= 15,72$
3a	Con movimiento espiral Simulación 1	125	0,05 - 0,15	50 – 42,61 $\Delta U_{bh(prom)}= 4,20$
3b	Con movimiento espiral Simulación 2	150	0,05 - 0,15	50 – 40,02 $\Delta U_{bh(prom)}= 5,58$
3c	Con movimiento espiral Simulación 3	175	0,05 - 0,15	50 – 36,67 $\Delta U_{bh(prom)}= 7,52$

$\Delta U_{bh(prom)}$ : Reducción promedio de humedad

### Definición del Índice de Reducción de Altura (IRA) de la columna de secado

El Índice de Reducción de Altura (IRA) de la columna de secado con movimiento en espiral ascendente, obtenido a partir de los resultados de la simulación, se refiere a la disminución que se puede lograr de la altura de la columna de secado en comparación con la longitud total del recorrido de la capa de partículas.

Este índice se definió como la relación entre la longitud total del recorrido del material, a través de la trayectoria en forma de espiral ascendente, y la altura de la columna de secado. Así fue posible determinar en cuántas veces se puede reducir la altura de la columna de secado en relación con la longitud total del recorrido de las partículas de biomasa. Este índice puede alcanzar valores de consideración según los resultados obtenidos de las simulaciones lo que significa la posibilidad de construir secadores neumáticos de biomasa más compactos y, por tanto, muy factibles desde los puntos de vista económico y medioambiental.

### Conclusiones

Se logró definir adecuadamente la relación existente entre el área de transferencia de calor y masa y el flujo de material durante el secado neumático con movimiento en espiral ascendente y esto se evidenció en que se pudo simular el proceso de secado cuando las partículas se organizan en forma de capa, obteniéndose las correspondientes correlaciones de las variables fundamentales, con un nivel de confianza de 99 % correspondiéndose con resultados semejantes a los obtenidos experimentalmente en otros trabajos de secado neumático de biomasa con coeficientes de correlación que están entre 90 % y 93 %.

A través de la simulación se estableció el Índice de Reducción de Altura (IRA) de la columna de secado, evidenciándose que se podrá disminuir esta dimensión en relación con otros tipos de secadores neumáticos, lo que permitirá secadores de biomasa más compactos y superiores ecológica y económicamente

### Referencias

- Bombino Matos EF, Roca Alarcón GA, Marín MJE. Modelación del secado neumático vortiginoso del bagazo de la caña de azúcar Ingeniería Mecánica. 2013;16(3):194-201.
- Bombino Matos EF, Roca Alarcón GA, Marín MJE, et al. Efecto de la espiral normal en el movimiento vortiginoso con partículas de bagazo de caña Ingeniería Mecánica. 2012;15(3):224-32.
- Haque N, Somerville M. Techno-economic and environmental of biomass dryer. Procedia Engineering. 2013;56:650-5.
- De Oliveira FL, Tosato PG, Ribeiro MF, et al. Secagem de Bagaco de cana obtido em en duas condicoes diferentes de teor de humidade. In: XIX Congresso de pos-graduacao da UFLA; Minas Gerais. Brasil: Universidad Federal de Lavras; 2010. [Citado junio de 2017] Disponible en: <http://www.sbpnet.org.br/livro/lavras/resumos/2161.pdf>
- Dening J, Xiaotao B, Jim Lim C, et al. Biomass drying in a pulsed fluidized bed without inert bed particles. Fuel 2016;186:270-84.
- Nebra SA, Silva MA. Tópicos especiales en secado. Secado en ciclones. São Paulo. Brazil: São Carlos; 1992.
- Niyogi K, Toregrosa MM, Pantzali MN, et al. Experimentally validated numerical study of gas-solid vortex units hydrodynamics. Powder Technology. 2017;305:794-808.
- Prabhu S, Tait P. Vortex shedding and heat transfer in rotationally oscillating cylinders. J Fluid Mech. 2014;748:549-79.
- Ibrahim KA. Swirling gas-solid flow through pneumatic conveying dryer. Powder Technology. 2013;235:500-15.
- Lienhard JH. A heat transfer textbook. Massachusetts, USA: Phlogiston Press; 2006.
- Chkir I, Balti MA, Ayed L, et al. Effect of drying Kinetics on main bioactive compounds and antioxidant activity of acerola (Malpigiaemarginata D.C.) residue. Int J Food Sci Technol. 2015;48:1041-7.
- Chan Y, Dyah TMN, Kamaruddin A. Solar dryer with pneumatic conveyor. Energy Procedia. 2015;65:378-85.

13. Salve AM, Pande SS, Khan JS. Effect of velocity and particle size on the coefficient of heat transfer in fluidized bed exchanger. *International Journal of Engineering Research and General Science*. 2014;2(2):230-4.
14. Moreno MR, Antolín G, Reyes AE. Heat transfer during forest biomass particles drying in an agitated fluidised bed. *Biosistemas Engineering*. 2016;151:65-71.
15. Hong-wei L, Hao G. Analysis of drying characteristics in mixed pulsed rectangle fluidized beds. *Powder Technology*. 2017;308(451-460).