

# Modelación del secado neumático vortiginoso del bagazo de la caña de azúcar

## Modulation of sugar cane bagasse pneumatic drying in a vortex

Eugenio F. Bombino Matos<sup>I</sup>, Guillermo A. Roca Alarcón<sup>I</sup>, Jorge E. Marín Morán<sup>II</sup>

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

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

II. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Facultad de Ingeniería Mecánica. Cuba

III. Universidad de Oriente. Facultad de Ciencias Naturales. Santiago de Cuba. Cuba

Recibido: 9 de enero de 2013

Aceptado: 26 de julio de 2013

---

### Resumen

Tomando en consideración los estudios realizados sobre la modelación del movimiento vortiginoso de partículas de bagazo, se realizó el estudio del secado neumático de esta importante biomasa teniendo en cuenta la transferencia de calor y de masa. Se modeló el proceso de secado a través de las ecuaciones fundamentales que describen la cinética del mismo y se compararon los resultados obtenidos con resultados reportados en la literatura especializada sobre mediciones de la variación del contenido de humedad en otros tipos de secadores neumáticos de bagazo para iguales condiciones de operación. Esta modelación permitió realizar simulaciones de este proceso las cuales arrojaron resultados aceptables en cuanto a los valores de disminución del contenido de humedad del bagazo lo que permitirá continuar profundizando en el desarrollo de próximos estudios sobre el tema ya que se evidencia que por esta vía es posible disminuir las dimensiones de los secadores de bagazo.

**Palabras claves:** secado neumático vortiginoso, secado de bagazo, modelación matemática.

### Abstract

Taking in account the studies carried out about the vortex movement of bagasse particles, the study of pneumatic drying of this important biomass was carried out considering the heat and mass transfer. The drying process was modeled through the fundamentals equations which describe the kinetic of it and the obtained results were compared with results reported in the specialized literature on drying measurements in others kinds of bagasse pneumatics dryers under the same conditions of operation. This modulation permitted to made simulations of this process which produced acceptable results about the decrease humidity values of bagasse and it will permit to continue in the development of next studies about this topic because it is evident that it is possible to reduce bagasse dryer dimensions.

**Key words:** pneumatic vortex drying, bagasse drying, mathematical modeling.

## Introducción

Uno de los potenciales en cuanto a fuentes renovables de energía más importante existente en nuestro país es el bagazo de la caña de azúcar, este además tiene diversos usos como materia prima y de ahí la importancia de secarlo. Según refieren varios investigadores el secado de bagazo ha sido poco estudiado en los últimos años. Sosa A.J.H. *et al* [1] presentaron un estudio detallado sobre el estado del arte del tema hasta el año 2004 que denota la evolución por la que ha transitado este proceso a partir de comienzos del siglo XX, desde secadores rotatorios hasta preferentemente el secado neumático debido a las ventajas que ofrece [2]. Se han reportado trabajos importantes en países productores de azúcar de caña como por ejemplo Argentina, México y Brasil [1- 4]. Por ejemplo, en el 2010 se realizó un importante trabajo relacionado con el monitoreo de un sistema de secado neumático de bagazo acoplado a una caldera en el ingenio El Carmen de México [3], se determinó que este sistema brinda grandes ventajas desde el punto de vista del ahorro energético sin embargo presenta las desventajas propias de los secadores neumáticos convencionales relacionada con sus grandes dimensiones. Debido a esta problemática con anterioridad Sosa et al., Nebra S.A. y Silva M.A. [1,10] y otros investigadores han venido trabajando sobre el secado neumático de bagazo en ciclones separadores [1]. Actualmente se continua estudiando este problema en el que aún falta mucho por hacer, en 2012 se presentaron los resultados del estudio realizado por Bombino *et al* [4] relacionado con la modelación del movimiento vortiginoso de partículas de bagazo cuando son arrastradas en forma de un vórtice ascendente dentro de dos cilindros concéntricos por gases a temperatura ambiente para su posterior aplicación al secado neumático vortiginoso usando gases calientes. Se han realizado diversas modelaciones matemáticas por diferentes autores en relación al proceso de secado de productos agrícolas [5-7] así como también estudios aplicando técnicas de fluidodinámica computacional o *Computational Floudynamics* (CFD) [8] y utilizando métodos de simulación numérica, aplicados al secado neumático de biomasa agrícola como el bagazo y la paja [9, 10].

De acuerdo con lo anterior este trabajo tiene por objetivo estudiar la modelación del secado neumático vortiginoso utilizando gases calientes incluyendo la transferencia de calor y masa en el modelo matemático desarrollado en trabajos anteriores sobre la transferencia de la cantidad de movimiento, considerando el proceso a régimen estacionario y que este transcurre solamente durante el primer período de secado de acuerdo con los requerimientos de la macrocinética del secado de bagazo cuando este se seca hasta alrededor de 30 % de humedad en base húmeda.

## Métodos y materiales

La modelación del secado neumático vortiginoso que tiene en cuenta además de la transferencia de la cantidad de movimiento, las ecuaciones que describen la transferencia de calor y de masa durante el proceso de secado de bagazo se realizó haciendo las consideraciones generales:

- El proceso será considerado a régimen estacionario.
- El proceso transcurre en el 1<sup>er</sup> período de secado acorde con el mecanismo de este proceso.

La modelación del secado se realizó teniendo en cuenta las ecuaciones empleadas en el modelo elaborado anteriormente para describir los fenómenos de transferencia de la cantidad de movimiento y que sirvieron de base para el estudio del efecto de la espiral normal en el movimiento vortiginoso de partículas de bagazo, Bombino *et al* [2,4].

### Ecuación de la transferencia de masa

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

Dónde:

$X_S$ - Concentración de vapor en la superficie de la partícula ( $P_S / P$ ).

$P_S$  - Presión del vapor en la superficie de la partícula [Pa].

$P$ - Presión de la mezcla [Pa].

$X_1$ - Concentración de vapor en la corriente de gases ( $P_1 / P$ ).

$P_1$  - Presión parcial del vapor en los gases [Pa].

$m$  - Masa de partículas (Flujo másico) [ $kg_b/kg_f$ ].

$dU$  – Diferencial humedad del material.

$dL_i$  – Diferencial longitud de la trayectoria [m]  
 $\alpha_m$  - Coeficiente de transferencia de masa [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ].  
 $S_T$  - Área de transferencia de calor y masa partículas-gas [ $\text{m}^2$ ].  
 $G_m$  – Flujo másico de bagazo [ $\text{kg}/\text{h}$ ]

#### Ecuación de la transferencia de calor para el material

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

Dónde:

$T_m$ - Temperatura del bagazo [K]	$C_{pa}$ - Calor específico a p = cte. del agua [ $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ]
$T_f$ - Temperatura del gas [K]	$h_v$ - Entalpía del vapor de agua a la temperatura de los gases [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]
$C_{pm}$ - Calor específico a p = cte. del material [ $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ]	$\alpha_q$ - Coeficiente de transferencia de calor [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]

#### Ecuación de la transferencia de calor para los gases

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

Dónde:

$m_g$ - Flujo de gases [ $\text{kg}/\text{s}$ ]	$w$ - Contenido de humedad de los gases [ $\text{kg}_v/\text{kg}_{as}$ ]
$C_{pg}$ - Calor específico a p = cte. de los gases [ $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ]	$\text{kg}_v$ - kilogramos de vapor de agua
$C_{pv}$ - Calor específico a p = cte. del vapor de agua [ $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ]	$\text{kg}_{as}$ - Kilogramos de aire seco

#### Ecuación de conservación de la masa

$$G_m \cdot \left( \frac{dU}{dL_i} \right) = -G_f \cdot \left( \frac{dW_i}{dL_i} \right) \quad (4)$$

Las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) corresponden a los balances de masa y energía y mediante estas se pudieron determinar parámetros importantes como las temperaturas del gas ( $T_g$ ) y del bagazo ( $T_m$ ) así como la variación de la temperatura del gas a lo largo de la trayectoria, teniendo en cuenta las características del bagazo cuando se mueve en forma de capa. Además se aplicaron los criterios adimensionales correspondientes a la descripción del proceso de secado neumático del bagazo para determinar los coeficientes de transferencia de calor y de masa, de la forma siguiente:

#### Coeficiente de transferencia de calor

Para determinar este coeficiente se consideraron las partículas divididas de dos formas: Partículas grandes o tipo fibra (mayores o iguales que 10 mm) y partículas pequeñas o tipo polvo (menores que 10 mm).

Partículas tipo fibra o grandes.

En el caso de las partículas de bagazo tipo fibra se decidió adoptar la expresión (5) recomendada para cilindros lisos infinitos propuesta por Whitaker S. y empleada por Nebra S.A. [10] para determinar el número o criterio adimensional de Nusselt a través del cual se puede determinar el calor transferido durante el secado de bagazo de caña en ciclones separadores debido a que esta ecuación tiene en cuenta la variación de la viscosidad del gas en la capa límite lo cual es congruente con el mecanismo de transporte de la humedad durante el 1er período de secado para estas partículas del bagazo de la caña de azúcar porque durante este

período la humedad se transporta en el interior del material hasta la superficie de este y de aquí hacia el medio circundante a través de dicha capa límite.

$$N_{Uq} = \left( 0.4 \cdot Re_{cp}^{0.50} + 0.06 \cdot Re_{cp}^{0.66} \right) \cdot P_r^{0.4} \cdot \left( \frac{\mu_f}{\mu_m} \right)^{0.25} \quad (5)$$

Para  $4 < Re_{cp} < 10^6$

Los números adimensionales que intervienen 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 ( $N_{Uq}$ ).
- 3- Número de Nusselt para la transferencia de masa ( $N_{Um}$ ).
- 4- Número de Prandtl ( $P_r$ ).
- 5- Número de Schmidt ( $S_c$ ).

Los cuales se determinaron a la temperatura media de la "capa" de partículas según recomendaciones de Nebra S.A. [10] y se definen:

Número de Reynolds referido a la capa de partículas. Para determinar este criterio adimensional se tomó como dimensión de referencia el tamaño de las partículas que componen la capa ( $d_p$ ).

$$Re_{cp} = \frac{\left[ \left( \frac{W}{\varepsilon} \right) - V \right] \cdot d_p \cdot (\rho_V + \rho_f)}{\mu_f} \quad (6)$$

$W$  – Velocidad del gas [m/s]

$V$  – velocidad de las partículas [m/s]

$\mu_f$  -Viscosidad dinámica a la temperatura del gas [Pa·s]

$\mu_m$  - Viscosidad dinámica a la temperatura del bagazo [Pa·s]

$\varepsilon$  - Porosidad

$d_p$  – Tamaño de las partículas [m]

$\rho_V$ - Densidad del vapor [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_f$  - Densidad del gas [kg/m<sup>3</sup>]

$$P_r = \frac{C_{p_f}}{\lambda \cdot \mu_f} \quad (7)$$

$$N_U = \frac{\alpha_q \cdot d_p}{\lambda} \quad (8)$$

$\lambda$  – Conductividad térmica del gas [J/m·s·K]

En el caso de las partículas tipo polvo se decidió adoptar la expresión recomendada por Nebra S.A. en su tesis doctoral sobre secado neumático de bagazo en ciclones separadores.

$$N_U = 2 + \left[ 1.4 \cdot Re_{cp}^{0.2} + 0.13 \cdot Re_{cp}^{0.7} \right] \cdot P_r^{0.33} \quad (9)$$

Comprobada experimentalmente para  $50 < Re_{cp} \leq 2000$

Donde los números adimensionales tienen el mismo significado que anteriormente

Coeficiente de transferencia de masa

Se tuvieron en cuenta los criterios adimensionales antes expuestos y para la transferencia de masa se utilizó la analogía de Chilton-Colburn recomendada por Nebra S.A. [10] para el secado de bagazo en ciclones, sustituyendo (10) en (5) y (9).

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{Uq} \longrightarrow N_{Um} \\ P_r \longrightarrow S_c \\ Re_{cp} \longrightarrow Re_{cp} \end{array} \right\} \quad (10)$$

Donde el criterio adimensional de Nusselt de masa ( $N_{Um}$ ) se define por:

$$N_{Um} = \frac{\alpha_m \cdot d_p}{\rho_f \cdot (1+w) \cdot v_{v-f}} \quad (11)$$

$v_{v-f}$  – Coeficiente de difusión del vapor en los gases, [m<sup>2</sup>/s].  
y el número de Schmidt:

$$S_c = \frac{\mu_f}{\rho_f \cdot v_{v-f}} \quad (12)$$

De esta forma se logró modelar el secado neumático vortiginoso de partículas de bagazo para estudiar su comportamiento y compararlo con los resultados del secado neumático en otros tipos de secadores.

Con el fin de comprobar la validez de la modelación desarrollada para describir el secado neumático vortiginoso se realizó la simulación para condiciones similares a las de los experimentos desarrollados por Arrascaeta R. A. en su tesis doctoral desarrollada en el Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras (ICINAZ) sobre secado neumático de bagazo, quien los desarrolló primero a escala de laboratorio y luego a escala industrial y los resultados que obtuvo en el laboratorio fueron avalados por los resultados obtenidos en dos secadores, uno a escala de prototipo industrial de 6 Ton/h y otro a escala industrial de 20 t/h de capacidad. En todos los casos los resultados de las mediciones efectuadas por Arrascaeta R.A. fueron obtenidas con el respaldo de los correspondientes diseños de experimentos.

En este trabajo se compararon los resultados de la simulación con los de las mediciones reportadas en los dos secadores neumáticos de 6 y 20 t/h mencionados anteriormente. En cuanto al secado en los secadores de 6 y 20 t/h se redujo la humedad del bagazo desde 44.89 % hasta 27.76 % y desde 48% hasta 31% respectivamente, o sea, una variación de 17.13 y 17.84% puntos respectivamente incluyendo la disminución de humedad que se produjo durante el trayecto de las partículas dentro de los ciclones separadores. Sin embargo el promedio de reducción de humedad en la columna de secado neumático de estos secadores estuvo entre 12 y 15 puntos según se reportó.

La disminución del contenido de humedad obtenida con la simulación del proceso en la columna vortiginosa estuvo alrededor del rango obtenido para la columna de secado en el secador neumático prototipo, o sea, entre 12 y 15 puntos lo que indica que los coeficientes de transferencia de calor y masa se comportan de forma similar para ambos tipos de secadores.

Barbosa D. R., en su tesis de maestría sobre secado de bagazo en sistemas neumáticos, al estudiar los valores obtenidos del coeficiente convectivo de transferencia de calor gas-partícula y compararlos con los encontrados por otros autores que investigaron este proceso en lecho fluidizado y en lecho deslizante para el bagazo de la caña de azúcar, llegó a la conclusión de que para los sistemas neumáticos este coeficiente es considerablemente mayor. Esto sucede en el caso de los sistemas neumáticos incluyendo el vortiginoso y se explica por la mayor turbulencia de estos sistemas y por el movimiento rotacional de las partículas que promueve perturbaciones en la subcapa laminar próxima a la superficie de las mismas.

La simulación se realizó de forma tal que la longitud del recorrido de las partículas fuera similar para ambos tipos de secadores, sin embargo la longitud de la columna de secado para el secador vortiginoso siempre fue considerablemente menor debido a la característica del movimiento en forma de vórtice, lo cual conlleva a que se requiera menor cantidad de acero y mayor sencillez en el diseño y la explotación de secadores funcionando con este tipo de movimiento.

Debido a los resultados obtenidos en las comparaciones mencionadas anteriormente, se decidió continuar el estudio simulando secadores neumáticos vortiginosos para diferentes capacidades.

La simulación se realizó a través de un diseño de experimentos factorial  $3^3$  sin réplica.

Los niveles de las variables para este diseño fueron:

Niveles de velocidad del gas 38, 35, 32 en m/s

Niveles de temperatura 240, 210, 180 en °C

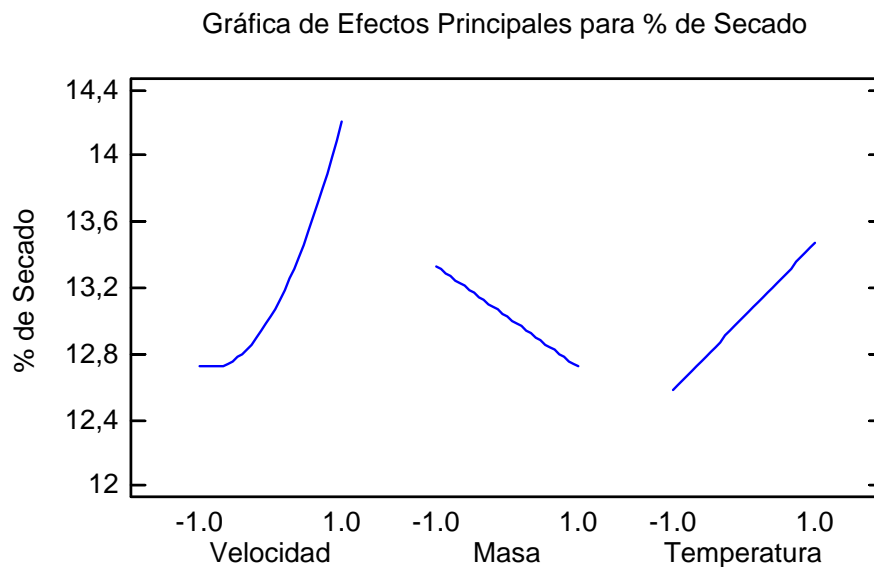
Niveles de Flujo de bagazo 18, 12, 6 en t/h

Los niveles para cada variable se codificaron como -1, 0, 1 generándose una matriz de 27 experimentos.

## Resultados y discusión

Con los datos obtenidos de la simulación se definió como influyen las variables analizadas en cuanto al % de secado.

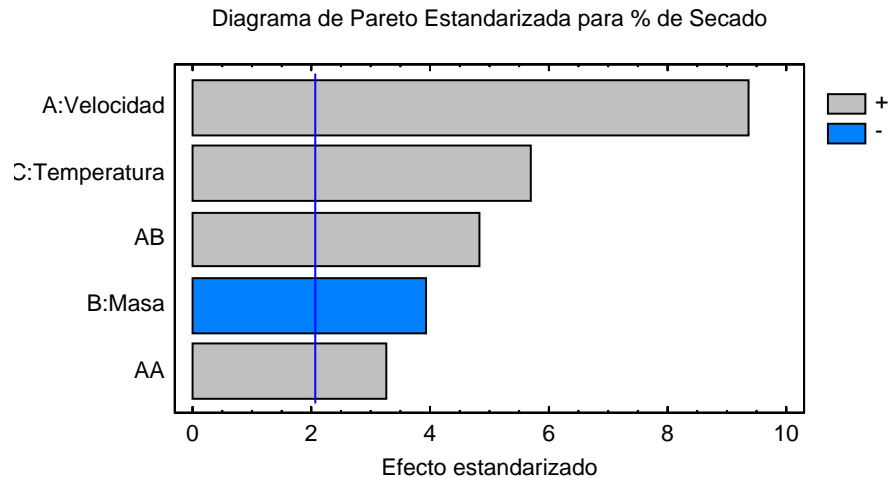
Las gráficas que aparecen en la figura 1 muestran la influencia de las variables analizadas para describir el % de secado.



**Fig. 1.** Gráfica de comportamiento de los efectos que tienen las variables la velocidad del gas, el flujo másico de bagazo y temperatura inicial de los gases, en el secado neumático vortiginoso

Al incrementarse la velocidad del gas tiende a aumentar el % de secado debido a que se incrementan los efectos de la turbulencia y tiende a romperse con mayor facilidad la subcapa laminar que rodea las partículas, sin embargo al aumentar la masa de bagazo a secar tiende a disminuir el potencial de secado. Ocurre el efecto contrario al aumentar la temperatura ya que con el aumento de esta última el potencial de secado se incrementa debido a que aumenta la energía de vaporización.

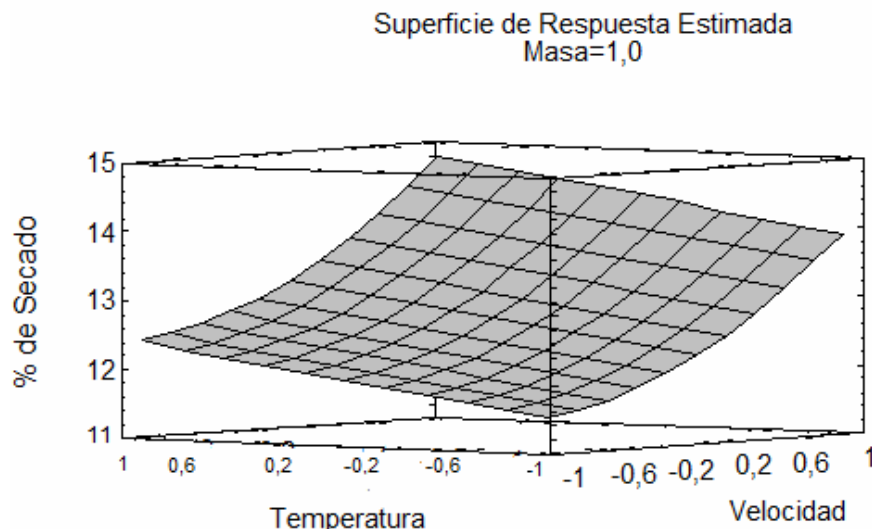
Se obtuvo además la significación estadística de los efectos de las variables que intervienen en el secado vortiginoso lo cual se puede apreciar mediante el diagrama de Pareto de la figura 2:



**Fig. 2.** Significación estadística de las principales variables analizadas en el proceso de secado vortiginoso

En la figura 2 puede apreciarse que para el % de secado la velocidad presenta el mayor efecto positivo seguido de la temperatura, luego le siguen en importancia la combinación de la velocidad con la masa de bagazo a secar y posteriormente la combinación de la velocidad al cuadrado, mientras que se puede apreciar el efecto negativo de la masa de bagazo a secar lo que se explica debido a que cuando aumenta el flujo másico de bagazo tiende a disminuir el potencial de secado.

A través de la superficie de respuesta estimada que aparece en la figura 3 se pudo visualizar el efecto de las variables que intervienen en el secado vortiginoso manteniendo una constante, en este caso la masa o flujo másico ( $G_m$ ).



**Fig. 3.** Efecto de la velocidad y la temperatura manteniendo la masa constante

En la superficie de respuesta de la figura 3 puede verse la tendencia del aumento en el % de secado cuando aumentan la velocidad y la temperatura. Se puede apreciar que el efecto de estas 2 variables es importante siendo más acusado el del aumento de la velocidad del gas.

Los resultados obtenidos ajustaron por encima de 88 % en cuanto a la variabilidad en el % de secado, lo cual es aceptable ingenierilmente y corrobora los resultados obtenidos.

## Conclusiones

- La implementación de los modelos matemáticos en una aplicación informática permitió determinar teóricamente la relación entre los parámetros fundamentales del proceso estudiado en relación con la variación del contenido de humedad del bagazo. Estos parámetros se compararon con los de secadores neumáticos en los que la trayectoria de las partículas no es igual pero sí recorren las mismas distancias dentro de la columna de secado y los resultados en cuanto al % de secado presentaron similitud aceptable.
- La simulación evidenció que el secado vortiginoso se comporta de forma similar al secado neumático con movimiento rectilíneo en cuanto al % de secado lo cual se puede realizar con dimensiones de la columna de secado alrededor de 50 % menores, lo cual indica que existe la posibilidad de diseñar secadores neumáticos de bagazo más compactos y sencillos de operar.
- Se recomienda continuar el estudio de la modelación matemática desarrollada y conjugada con los procedimientos de simulación teniendo en cuenta además aspectos de semejanza geométrica, lo cual permitirá enfrentar el diseño de las primeras columnas vortiginosas para el tratamiento y manipulación del bagazo de la caña de azúcar para diferentes capacidades.

## Referencias

1. Sosa A. J.H., Fabiano; Oliveira M. F.; Corrêa G. J.L.; Silva A. M.; Nebra A. S. "Sugar Cane bagasse Drying - A review". En: *14th International Drying Symposium (IDS 2004)* São Paulo. Brazil 2004.
2. Bombino M. E.; Roca A.G.; Mojícar C. S. "Resultados experimentales del movimiento vorticial de unamezcla bifásica aire-bagazo para su aplicación al secado". En: *Conferencia Internacional de Energía Renovable, CIER 2011*. La Habana. 2011. ISBN 978-959-261-350-8.
3. Franck, C.F.J., Golato M. A., Morales, W. *et al.* "Monitoreo de un sistema de secado de bagazo acoplado a una caldera en un ingenio de México". *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*. 2010, vol. 87, nº 2, p. 33-44. ISSN 0370-5404.
4. Bombino M. E. F., Roca A. G. A., Marín M. J. E. *et al.* "Efecto de la espiral normal en el movimiento vortiginoso con partículas de bagazo de caña". *Ingeniería mecánica*. 2012, vol. 15, nº. 3, p.224-232. Consultado el: 30 de marzo de 2013 <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>. ISSN 1815-5944.
5. Basirat T. H., Hamdullahpur, F. "*Mathematical modelling of drying based on surface evaporation source term for coupled energy and mass transfer*". *Journal of Energy Research* 2007, vol. 31, nº 15, p. 1455-1464. ISSN 0363-907X.
6. Barati E., Esfahani J .A. "Mathematical modeling of convective drying: Lumped temperature and spatially distributed moisture in slab". *Energy* 2011 p. 2294-2301 ISSN 0360-5442.
7. Yaldiz O.; Ertekin C.; Uzun H.I. "Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes". *Energy* 2001, vol. 26, nº 5, p. 457-65. ISSN 0360-544.
8. Le Page J.F.; Chevarin C.; Kondjoyan C.C.A. *et al.* "*Development of an approximate empirical-CFD model estimating coupled heat and water transfers of stacked food products placed in airflow*". *Journal of Food Engineering* 2009, vol. 92, nº. 2, p. 208-16. ISSN 0145-8876.
9. Hongwei S.W.L.; Qunyiz R.L. "Numerical Simulation and Analysis of Pneumatic Drying on Straw Fuel". En: *International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. China. 2011
10. Nebra S.A.; Silva M.A. "Tópicos especiales en secado. Secado en ciclones" ..Editado por Freire - Sartori. 1992. São Carlos. São Paulo. Brazil 1992. p.p. 175 – 210. Vol. I.