

Efecto de la espiral normal en el movimiento vortiginoso con partículas de bagazo de caña

Effect of normal spiral in the vortex movement with small sugar cane bagasse particles

Eugenio Francisco Bombino-Matos^I, Guillermo Alfonso Roca-Alarcón^I,
Jorge Erick Marín-Morán^{II}, Luís Augusto Barbosa-Cortez^{III}

I. Universidad de Oriente. Centro de Estudios de Eficiencia Energética. Santiago de Cuba. Cuba

Correo electrónico: bombino@fim.uo.edu.cu

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

III. Universidad Estatal de Campinas. Facultad de Ingeniería Agrícola. Sao Paulo. Brasil.

Recibido: 25 de febrero de 2012

Aceptado: 27 de junio de 2012

Resumen

Debido a la importancia que adquiere cada vez más el bagazo de caña, se estudia el movimiento vortiginoso de sus partículas transportadas por un gas y se comparan los resultados obtenidos experimentalmente con los simulados mediante un modelo matemático. La formación de la espiral se clasificó de tres formas, obteniéndose la velocidad y caída de presión en cada caso a través de un diseño de experimentos factorial multinivel con una réplica. Como variable dependiente cualitativa se tomó la formación de la espiral normal y como variables independientes cuantitativas la velocidad del gas, el tamaño de partículas y la concentración de la mezcla, obteniéndose una correlación que ajustó con 84.64%. Se determinó el tamaño de muestra para comparar los valores de velocidades del gas y caídas de presión obtenidos experimentalmente con los simulados, los resultados experimentales cumplen una distribución normal y el modelo simula el proceso con error aceptable ingenierilmente.

Palabras claves: movimiento de vórtice, secado neumático de bagazo, modelo matemático.

Abstract

The vortex movement of sugar cane bagasse carry by a gas is study and the results obtained in the laboratory are compared with the ones simulated through a mathematical model. The formation of the hairspring was classified in three ways, being obtained the speed and fall of pressure in each case through a design of multilevel factorial experiments with a replica. The formation of the normal hairspring was taken as qualitative dependent variable, and as quantitative independent variables, the gas speed, particles size and the mixture concentration were taken, being obtained a correlation that adjusted with 84.64%. The sample size was determined to compare the values of gas speed and the falls of pressure experimentally obtained with those obtained by the simulation, the experimental results complete a normal distribution and the pattern simulates the process with acceptable engineering error.

Key words: vortex movement, pneumatic bagasse drying, mathematical model

Introducción

La importancia del bagazo de la caña de azúcar comenzó a aumentar desde la segunda mitad del siglo pasado y esta tendencia continúa debido a que es considerado el subproducto no maderable más importante del mundo, incluso ha sido considerado en ocasiones como el producto principal y el azúcar como un subproducto de la industria de la caña de azúcar. Para aprovechar al máximo las potencialidades del bagazo este se debe someter a determinados procesos de tratamiento y manipulación entre los que se encuentran el secado y la clasificación. En su tesis doctoral presentada en 1989, Arrascaeta A. R. plantea que la primera referencia del secado de bagazo data del año 1911 cuando Kerr E.W., publicó los resultados de una serie de 40 pruebas de secado y combustión efectuadas durante la zafra de 1910, en el ingenio Palo Alto, Louisiana, E.U.A., pero es a partir de 1976 cuando se reportan las primeras instalaciones comerciales para el secado de bagazo. En los últimos años el proceso de secado se viene realizando preferentemente por métodos convectivos como es el caso del secado neumático y el secado fluidizado entre otros [1-5], aunque han existido otras propuestas de investigación como el secado de bagazo en cama fija, el secado de bagazo se realiza desde los años 80 del pasado siglo preferentemente con secadores neumáticos debido a que estos equipos se caracterizan por sus bajos gastos energéticos además de la sencillez en la construcción y el mantenimiento, sin embargo muchos de estos sistemas aún presentan determinadas desventajas y dificultades que no han permitido lograr un mayor grado de aplicación en la industria debido fundamentalmente a sus grandes dimensiones. Desde hace algunos años se trabaja en la solución de este problema imprimiendo carácter circular al movimiento de las partículas para aumentar la longitud del recorrido y el tiempo de residencia de estas dentro del equipo, Nebra A. S. en su tesis doctoral presentada en Octubre de 1985 en Brasil, estudió el secado de bagazo en separadores ciclónicos y en los últimos tiempos este tema sigue siendo abordado por algunos investigadores como por ejemplo Nebra A.S. y Barbosa D.R. [6-7] quienes reportaron estudios para perfeccionar el secado ciclónico del bagazo de la caña de azúcar, entre los años 1985 y 1992. Posteriormente se reporta el estudio del movimiento en forma de espiral ascendente de partículas de bagazo por Bombino et. al [8-9] entre los años 2010 y 2011, aunque a partir del 2000 ya aparecieron los primeros trabajos sobre el tema.

Por lo anteriormente planteado se aprecia que muchos aspectos de este proceso están siendo investigados aún pues no todo es conocido y existe poca información sobre el tema en lo relacionado con el movimiento de vórtice, para su aplicación al secado del bagazo de la caña de azúcar.

Este trabajo tiene por objetivo estudiar el desarrollo de la espiral normal durante el movimiento de vórtice con partículas de bagazo transportadas por un gas y comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los simulados mediante un modelo matemático para lo cual se empleó un equipo construido a escala de laboratorio llamado columna vorticial o columna vortiginosa, constituido por dos cilindros concéntricos, el cual se construyó de acrílico transparente para poder visualizar el correcto desarrollo del fenómeno estudiado cuando las partículas son transportadas por una corriente gaseosa en forma de espiral ascendente, ver figura 1, y se comparan los resultados obtenidos en el laboratorio con los de la simulación hecha a través de un modelo matemático que tiene en cuenta la transferencia de la cantidad de movimiento así como de calor y masa entre las fases, para su posterior aplicación al secado neumático del bagazo de la caña de azúcar.

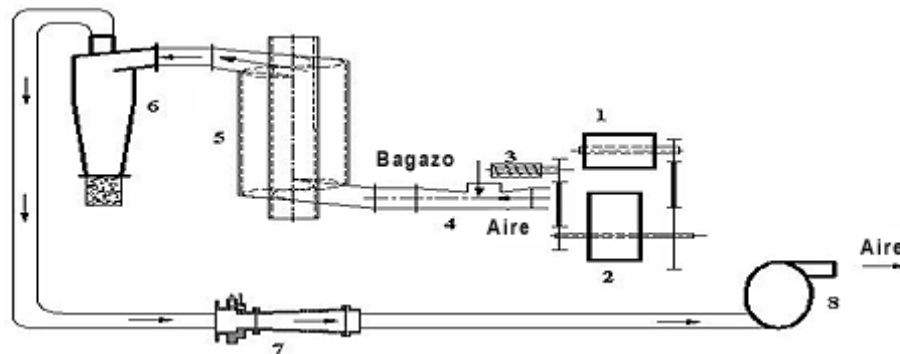


Fig. 1. Columna vorticial construída deacrílico transparente

Se planteó como hipótesis que el movimiento en forma de espiral ascendente de una capa de partículas de bagazo en el espacio anular entre dos cilindros concéntricos, se puede modelar mediante la superposición de dos campos de flujo, uno ascendente recto vertical y otro plano circular horizontal y de esta forma será posible simular a través de la resultante de ambos campos, el movimiento vortiginoso ascendente y será aplicable a procesos de tratamiento y manipulación de biomasa como el secado neumático del bagazo de la caña de azúcar.

Métodos y Materiales

A partir de observaciones experimentales realizadas en el laboratorio de Mecánica de los Fluidos del Centro de Estudios de Eficiencia Energética (CEEFE) de la Facultad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Oriente en Santiago de Cuba, se definió el modelo físico del fenómeno investigado como el movimiento de una capa de partículas que se transporta en forma de espiral ascendente por el espacio anular entre dos cilindros concéntricos. Un esquema simplificado de la instalación se presenta a continuación, el esquema se concibió previo a su construcción y es el siguiente:



Leyenda: **1** Motor eléctrico, **2** Reductor, **3** Alimentador de tornillo sin-fin, **4** Eyector, **5** Columna vorticial, **6** Separador ciclónico con colector de bagazo en la parte inferior, **7** Medidor de flujo (Vénturi), **8** Ventilador.

Fig. 2. Instalación para el estudio experimental del movimiento neumático vortiginoso

La técnica experimental estuvo compuesta por 4 pasos fundamentales:

- 1- Preparación del bagazo.
- 2- Preparación de la instalación
- 3- Diseño de los experimentos
- 4- Mediciones experimentales

El experimento se realizó de la forma siguiente: la preparación del bagazo contó con dos pasos fundamentales, el primero fue su separación en fracciones y esto se realizó mediante un proceso de tamizado usando para ello un juego de tamices y un equipo tamizador vibratorio, se decidió darle un tiempo de 50 minutos por cada 0.04 kg de bagazo a tamizar, se realizaron los experimentos con 6 muestras de bagazo de diferentes tamaños utilizándose en todos los casos una cantidad total de bagazo de 25 gramos que garantizó ser una cantidad prácticamente funcional y acorde con las dimensiones de la instalación, y el segundo paso fue un análisis gravimétrico que consistió en introducir las muestras de cada fracción en una estufa controlada a 378 K donde se secó la misma hasta peso constante para determinar la humedad de equilibrio, que resultó ser de 11% en base húmeda.

En cuanto a la preparación de la instalación, una vez construida y montada se sometió a un proceso de "envejecimiento", es decir, se realizaron pruebas experimentales que permitieron comprobar que funcionaba con los niveles de concentración deseados y un proceso similar se hizo antes de cada experimento para garantizar el estado estacionario del sistema. Para ello se hizo circular la cantidad de aire necesaria mediante una válvula y sólo bajo estas condiciones comenzó cada experimento al mismo tiempo que se comprobaron los diferentes sistemas de medición de la instalación.

Los experimentos se diseñaron como se indicó anteriormente y la variación de velocidad del gas se logró a través de una válvula que permite garantizar diferentes valores de flujo del gas que se variaron entre 2,34 y 3,12 m³/seg, que para diferentes regímenes de alimentación de bagazo entre 0,187 y 0,375 kg/min garantizaban las distintas concentraciones de la mezcla deseadas. Esta alimentación del bagazo se logró mediante un alimentador de tornillo sin fin cuya velocidad de rotación se varió en función de la cantidad de material que se deseaba alimentar, el flujo de gas se midió a través de un medidor de flujo Vénturi con una relación de diámetros de 0,5 y a través del mismo el valor del flujo se obtiene por la ecuación $Q=0.21352 \cdot (h^{0.5})$, donde h es la diferencia de alturas que se lee en el manómetro diferencial en milímetros, la clase o precisión es de 2 mm col H₂O y está conectado a un manómetro diferencial que contiene agua como líquido manométrico.

Mientras que la caída de presión se midió mediante un micro manómetro conectado entre la entrada y la salida de la columna vorticial, dicho micro manómetro usa como sustancia manométrica agua destilada con una densidad de 1 g / cm³ y una clase o precisión de 0,5 mm col. de H₂O para una constante del instrumento $K= 0,3$ que corresponde a una inclinación en la escala graduada de 30° respecto al horizonte.

La velocidad del gas se determinó mediante mediciones del flujo de gas y según la hipótesis siguiente: A través de la superposición de las componentes axial y tangencial de la velocidad es posible obtener la velocidad resultante durante el movimiento vorticial. La componente radial queda anulada en un tiempo infinitesimalmente pequeño al pegarse la capa de partículas prácticamente de forma instantánea a la pared interior del cilindro exterior por la acción de la fuerza centrífuga, esto último se pudo observar con claridad durante los experimentos, luego la velocidad resultante se determinó por la expresión siguiente:

$$W = \sqrt{(W_{ax}^2 + W_{tg}^2)} \quad (1)$$

Donde:

W – Velocidad resultante, en m/s;

W_{ax} – Componente axial de la velocidad, en m/s

W_{tg} – Componente tangencial de la velocidad, en m/s

La componente axial se determinó a través de mediciones del flujo de gas mediante el medidor Vénturi y teniendo en cuenta el área de la sección anular comprendida entre los dos cilindros concéntricos que conforman la columna vorticial, aplicando la ley de conservación de la masa traducida en la ecuación de continuidad para las condiciones dadas, por la expresión 2:

$$W_{ax} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{eq}^2} \quad (2)$$

Donde:

Q – Flujo de gas, en m³/s; y D_{eq} – Diámetro equivalente de la columna vorticial, en m

La componente tangencial de la velocidad se determinó en función de la velocidad axial y del ángulo de inclinación de la espiral, por la expresión siguiente:

$$W_{tg} = \frac{W_{ax}}{\operatorname{tg}(\Theta)} \quad (3)$$

Donde: Θ – Ángulo de inclinación de las toberas de entrada y salida de la columna vorticial, en grados.

Se realizó un primer diseño experimental por el método de regresión múltiple aplicando el programa *StatgraphicsCenturion v15*, para lo cual se tuvo en cuenta como variable dependiente cualitativa la formación de la llamada espiral normal la cual se denominó EN (Espiral Normal) y como variables independientes se consideraron, la concentración de la mezcla (μ_c) en kg_b/kg_f con tres niveles: 0,056; 0,091; 0,127, el tamaño de la partícula (d_p) en mm con 6 niveles: 0.8; 1.3; 1.8; 2.2; 2.8; 3.2, a la humedad de equilibrio 11% en base húmeda, y la velocidad requerida del gas (W) en m/s, para la cual se escogieron 3 niveles correspondientes a las velocidades mínimas seguras para obtener la espiral normal con los diferentes tamaños de partículas: (8; 11; 14) m/s, debido a que estos diferentes tamaños de partículas se corresponden con diferentes velocidades requeridas del gas para obtener la espiral normal en función de la velocidad de arrastre. Finalmente y de acuerdo con lo anterior, se aplicó un diseño factorial multinivel con una réplica que indicó realizar un total de 108 experimentos, a través del cual se combinaron los 6 diámetros con las 3 concentraciones y las 3 velocidades referidas anteriormente.

Como resultado de este primer experimento se llegó a la conclusión de que la influencia de la variable concentración de la mezcla en el rango analizado, que está alrededor de, entre 0.06 y 0.1 kg_b/kg_f y en torno del cual funcionan la mayoría de los secadores neumáticos reportados en la literatura especializada, es estadísticamente poco significativa en este rango de variación.

Debido a esto se realizó un nuevo diseño factorial multinivel con una réplica para 36 experimentos, donde se tuvieron en cuenta las dos variables independientes más significativas que son el tamaño de partículas con 6 niveles y la velocidad requerida del gas con 3 niveles, obteniéndose una correlación de estas variables con la variable dependiente formación de la espiral normal (EN), para facilitar el análisis fue codificada esta variable cualitativa de la forma siguiente: igual a -1 para la espiral lenta (cuando la espiral se forma con velocidades bajas, o sea por debajo de la llamada velocidad mínima segura, y las partículas tienden a caerse dentro del equipo); igual a 0(cero) para la espiral normal, e igual a 1 para la espiral rápida(cuando la espiral se forma con velocidades altas, o sea por encima de la llamada velocidad mínima segura y la trayectoria de las partículas puede tender a enderezarse. Los 6 tamaños de partículas se codificaron de la forma siguiente: 0.8 igual a (-1); 1.3 igual a (-0.6); 1.8 igual a (-0.2); 2.2 igual a (0.2); 2.8 igual a (0.6); 3.2 igual a (1). Mientras que las velocidades se codificaron de la forma siguiente: 8 igual a (-1); 11 igual a (0); 14 igual a (1). Finalmente se obtuvo un modelo ajustado con 84.64%.

Posteriormente con el objetivo de comprobar la validez de la modelación teórica empleada para simular el proceso, se planificó un tercer experimento para el cual se determinó estadísticamente el tamaño de la muestra requerido para la obtención de la velocidad mínima segura del gas correspondiente a cada tamaño de partícula y resultó que era necesario realizar 7 corridas para cada caso, cuyos valores se promediaron y se muestran en tablas a continuación.

Resultados y Discusión

Los valores correspondientes a las 7 corridas referidas anteriormente se muestran en la tabla 1 referida a las velocidades y en la tabla 2 referida a las caídas de presión para diferentes valores del criterio adimensional de Reynolds de partícula (Rep), cuya determinación se detalla más adelante. En estas tablas se comparan los valores promedio de la velocidad del gas y de las caídas de presión obtenidos experimentalmente con los obtenidos mediante la simulación para igualdad de las condiciones en que se efectuaron los experimentos y se comprobó mediante la prueba de *Kolmogorov-Smirnov* que los datos obtenidos cumplen una distribución normal.

Tabla 1. Comparación de velocidades obtenidas experimentalmente y simuladas

Rep	W_{exp} (m/s)	W_{sim} (m/s)
61	7.6	6.9
126	9.1	8.8
204	10.6	10.3
275	11.5	11.4
393	12.8	12.8
480	13.6	13.6

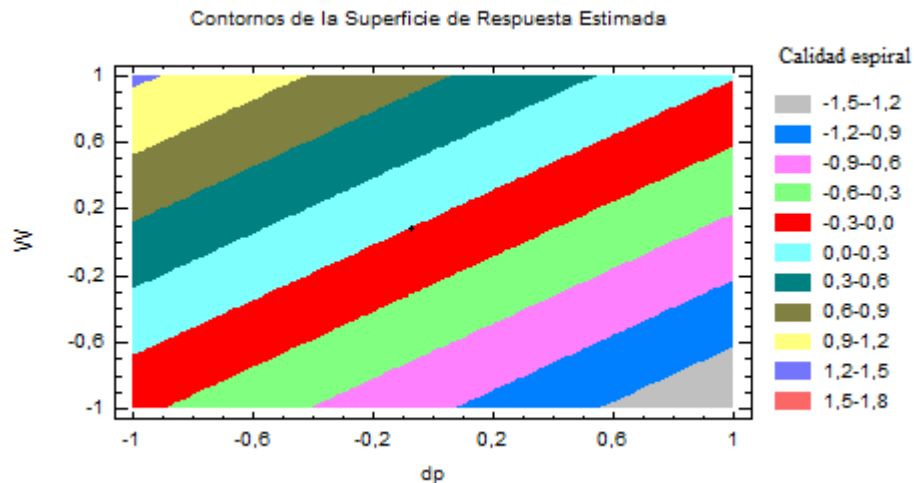
Tabla 2. Comparación de caídas de presión obtenidas experimentalmente y simuladas

Rep	Δp_{exp} (kPa)	Δp_{sim} (kPa)
61	0.015	0.009009
126	0.023	0.017795
204	0.031	0.026576
275	0.037	0,033409
393	0.045	0.043237
480	0.050	0.049493

Inicialmente, al planificar los experimentos se detectó que la influencia de la variable concentración de la mezcla bifásica en el rango entre 0.06 y 0.1 kg_b/kg_f resulta poco significativa para la formación de la espiral normal dentro del rango analizado, el cual está dentro de los límites referidos en la literatura para el secado neumático, que está entre 0.061 y 0.406 kg_b/kg_f [6-7], debido a esto se planificó un segundo experimento basado en un diseño factorial multinivel con una réplica para un total de 36 experimentos, donde se tuvieron en cuenta las dos variables independientes más significativas que son el tamaño de partículas con 6 niveles: y la velocidad requerida del gas con 3 niveles, obteniéndose una correlación de estas variables con la variable dependiente formación de la espiral normal (EN) y finalmente la correlación obtenida ajustó con 84.64 % y es la siguiente:

$$EN = -0,111111 - 0,619048 \cdot dp + 0,75 \cdot W \quad (4)$$

En la gráfica de la figura 3 se puede apreciar que la formación de la espiral normal óptima está en la línea divisoria entre las franjas azul claro y roja, la cual se corresponde con el valor cero en la escala (Calidad espiral), estas franjas se encuentran entre $-0,3$ y $0,3$ lo cual está en correspondencia con la correlación obtenida, este resultado se refleja en la tabla 3 más adelante.

**Fig. 3.** Superficie de respuesta estimada correspondiente a la formación de la espiral normal

Una segunda parte del estudio consistió en validar la modelación teórica empleada para la simulación, para lo cual se planificó un tercer experimento donde se compararon las velocidades del gas y las caídas de presión experimentales y simuladas, obteniéndose resultados con un error del 2% para las velocidades y 12% para las caídas de presión lo cual indica que el modelo simula de forma aceptable desde el punto de vista ingenieril el proceso estudiado, se compararon los valores obtenidos experimentalmente con los simulados para las mismas condiciones de los experimentos y se determinó el error promedio para las velocidades y las caídas de presión, los experimentos se realizaron con valores de concentración entre 0.06 y 0.1 kg_b/kg_f .

Para confirmar la validez de los resultados obtenidos con el modelo teórico, se hizo un análisis a través del error relativo, ecuaciones 5 y 6

$$\sum_{i=1}^6 \frac{W_{\text{exp}} - W_{\text{teor}}}{W_{\text{exp}}} * 100 = 2 \% \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^6 \frac{\Delta P_{\text{exp}} - \Delta P_{\text{teor}}}{\Delta P_{\text{exp}}} * 100 = 12 \% \quad (6)$$

Los resultados se obtuvieron a partir del cálculo de los errores relativos puntuales que consisten en la diferencia entre el valor experimental " X_{exp} " y el valor teórico " X_{teor} " obtenido por el modelo para las mismas condiciones del experimento, dividido entre el valor experimental de las variables analizadas.

Martínez R. A. en su tesis doctoral defendida en 1988, sobre secado de bagazo en cama fija, hace un análisis sobre los errores y sus posibles fuentes especificando que para cálculos de ingeniería una desviación entre (20 y 25) % es satisfactoria, pues en cada error influyen factores como los siguientes:

- Características de los instrumentos de medición (en algunos casos pueden ser industriales) que presentan una menor precisión.
- Perturbaciones que pueden ocurrir en las variables prefijadas durante la realización de las mediciones.
- Los valores experimentales obtenidos son valores promedio de las réplicas efectuadas.
- Posibles errores de apreciación que se cometen al realizar las mediciones, debidos a las pequeñas oscilaciones que ocurren en los líquidos manométricos durante los experimentos.

Un resultado importante se refleja en la tabla 3 donde se muestra el cálculo de la variable dependiente EN (Espiral Normal) descodificada, cuyo valor debe oscilar alrededor de cero dentro del intervalo -0.3 a 0.3 y según puede apreciarse en la superficie de respuesta, todos los valores se encuentran dentro de ese intervalo de confianza por lo que en cada caso se está en presencia de una espiral normal.

Tabla 3. Variable EN (Espiral Normal) descodificada en su correlación con W y dp

dp (mm)	W_{exp} (m/s)	EN
0,8	7,6	-0,25
1,3	9,1	-0,21
1,8	10,6	-0,08
2,2	11,5	-0,11
2,8	12,8	-0,03
3,2	13,6	-0,08

El error promedio en la determinación de la variable EN que aparecen en la tabla 3 es modularmente de 12.6 %, lo cual está dentro del margen de error de la correlación obtenida para $EN = f(dp, W)$ y está dentro del margen definido en la superficie de respuesta, todos los valores están dentro del intervalo de confianza definido en la misma.

El error relativo promedio está por debajo del 25% lo cual confirma la validez de los resultados teóricos obtenidos mediante el modelo matemático. Los resultados muestran que la modelación simula el proceso con un error aceptable ingenierilmente y esto puede apreciarse a través de la comparación de las curvas de comportamiento de la velocidad requerida del gas y de la caída de presión, obtenidas experimentalmente y mediante la simulación realizada para las mismas condiciones de los experimentos, estos parámetros fueron graficados, figuras 4 y 5, con respecto al criterio adimensional Reynolds de partícula (Rep), el cual se determinó por la ecuación siguiente:

$$\text{Rep} = V_a * \phi * d_p / u_f \quad (7)$$

Donde:

V_a – Velocidad de arrastre, en (m/s)

d_p – diámetro medio de las partículas al tamiz, en (m)

u_f – Viscosidad cinemática del fluido, en (m^2/s)

ϕ – Factor de forma para las partículas de bagazo

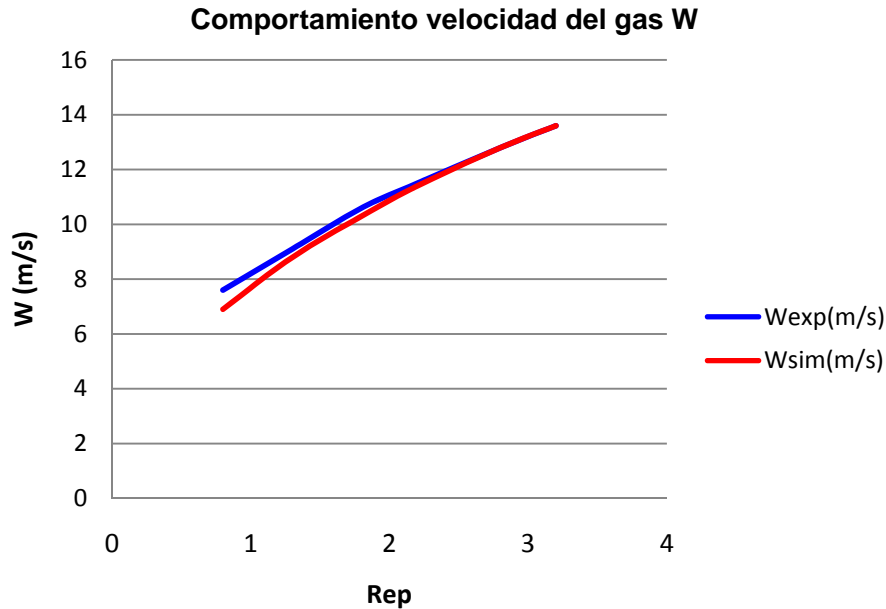


Fig. 4. Comportamiento velocidad del gas experimental vs simulada

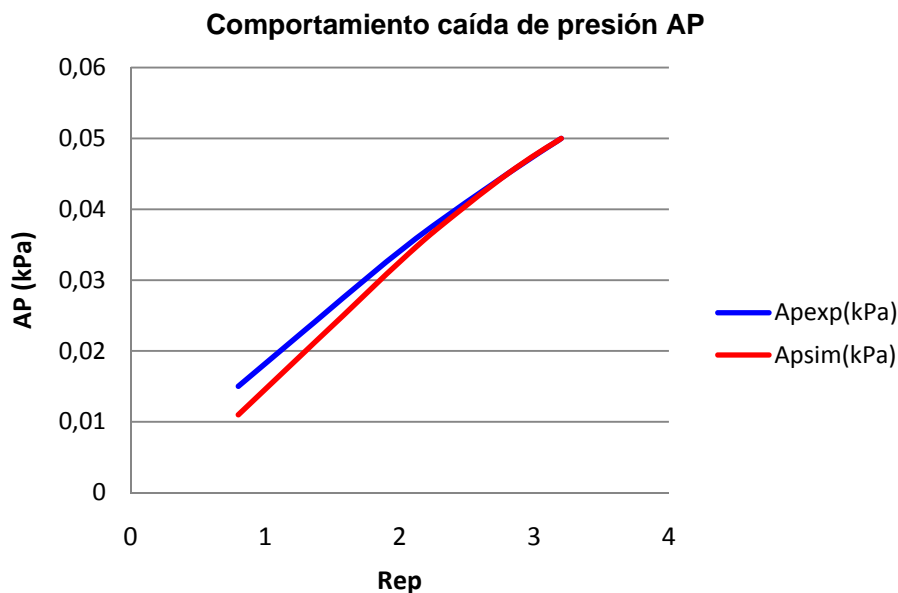


Fig. 5. Comportamiento caída de presión experimental vs simulada

En las figuras 4 y 5 puede apreciarse que la tendencia del comportamiento entre los valores experimentales y los simulados, tanto para las velocidades como para las caídas de presión, son aceptables desde el punto de vista de la ingeniería. Algo importante a señalar es que las diferencias en ambos casos comienzan a minimizarse de forma importante a partir del valor del criterio de Reynolds correspondiente a las partículas de 2.5 mm y esto se explica a partir de que ese es el valor del diámetro medio de las partículas de bagazo de los ingenios azucareros de nuestra provincia con el cual se han realizado la mayoría de las investigaciones precedentes que sirvieron de base al presente trabajo, en relación a las propiedades físicas y geométricas de las partículas.

Los resultados obtenidos son significativamente importantes para la posterior aplicación de la simulación del movimiento de vórtice al proceso de secado neumático empleando gases calientes, y pueden aplicarse a escalas mayores ya que tanto el modelo físico a escala del laboratorio como el modelo matemático empleado para simular el proceso fueron elaborados teniendo en cuenta a la Teoría de la Semejanza, sobre lo cual se hace referencia en [8-9].

Debido a que este trabajo se realizó con el fin de aplicarse al secado neumático de bagazo, es importante destacar que en el caso del movimiento forzado del agente portador de calor, el carácter del movimiento del fluido no depende del intercambio de calor, debido a que para los límites en que están presentes las diferencias de temperatura en el flujo durante el secado neumático del bagazo de la caña de azúcar, por debajo de 300 grados, el cambio de las propiedades físicas del agente portador de calor no es grande y este efecto puede no tomarse en consideración, y es por eso que las condiciones de la semejanza fluidodinámica son la premisa indispensable de la similitud térmica y estas se reducen a la similitud de los campos de velocidad y presión en estos casos, según refieren *Mijeev, M.A.-Mijeeva, I.M.* [10].

Conclusiones

La influencia de la variable concentración de la mezcla en el rango estudiado, para el cual funcionan la mayoría de los secadores neumáticos reportados en la literatura especializada, alrededor de entre 0,06 y 0,1 (kg_b/kg_f), es estadísticamente poco significativa para la formación de la espiral normal.

Se definió la correlación entre las variables formación de la espiral normal (EN), velocidad del gas (W) y tamaño de las partículas (dp), estas dos últimas se definieron como las variables independientes más importantes que intervienen en la formación de la espiral normal dentro del rango de concentraciones estudiado.

Con los resultados experimentales obtenidos se pudo validar la modelación teórica desarrollada y se muestra que la misma simula el proceso con un error aceptable ingenierilmente y fue elaborada teniendo en cuenta las características de las partículas en relación con su tamaño y factor de forma.

Agradecimientos

Los autores agradecemos el apoyo brindado por el Proyecto de “Aprovechamiento del Biogas” desarrollado en la comunidad rural de Magueyal del municipio San Luís en Santiago de Cuba y por la dirección de mantenimiento de la Empresa de Cereales Frank País García de la ciudad de Santiago de Cuba, quién facilitó parte importante de los recursos que fueron necesarios para la construcción de la columna vorticial y para realizar la adecuada transformación de la instalación del laboratorio respectivamente, sin lo cual no hubiese sido posible llevar a cabo el trabajo experimental.

Referencias

1. Smail, M. “Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer”. *Energy Conversion and Management*. 2011. vol. 52, p. 1644–1649. ISSN 0196-8904.
2. Fagernas, L., Brammer, J., Wilén C. *et al.* “Drying of biomass for second generation synfuel production”. *Biomass and bioenergy*. 2010. vol. 34, p. 1267-1277. ISSN 0961-9534.
3. Barati, E. y Esfahani, J.A. “Mathematical modeling of convective drying: Lumped temperature and spatially distributed moisture in slab”. *Energy*, 2011. vol. 36, p. 2294 – 2301. ISSN 0360-5442
4. Ali, M., Saeid, M y Mohammad, H.K. “Evaluation of energy consumption in different drying methods”. *Energy Conversion and Management*. 2011. vol. 52, p. 1192–1199. ISSN 0196-8904.
5. Kaleta, A. y Górnicki K. “Some remarks on evaluation of drying models of red beet particles”. *Energy Conversion and Management*. 2010. vol. 51, p. 2967–2978. ISSN 0196-8904.
6. Nebra, S.A. y Silva, M.A. *Tópicos especiales en secado. Secado en ciclones*. Editado por J.T. Freire y D.J.M. Sartori. 1992, vol. I, p. 175 – 210.
7. Barbosa, D. R. “Secagem de bagaço de cana em sistema pneumático”. Título de MESTRE. Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas. Campinas. Sao Paulo. Brasil. 1992.
8. Bombino, M. E., Roca, A.G., Lesme, J.R. *et al.* “Principales elementos teórico-prácticos para El estudio del secado neumático vorticial del bagazo de caña”. *Revista Tecnología Química*. 2010, vol. XXX, nº 2. p. 74-81.
9. Bombino M. E.; Roca A.G.; Mojícar C. S. “Resultados experimentales del movimiento vorticial de una mezcla 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.
10. Mijeev, M.A. y Mijeeva, I.M. *Fundamentos de termotransferencia*. Editorial Mir. Moscú, p. 61-64. 1979.