

CARACTERIZACIÓN FLUIDODINÁMICA DE UN REACTOR SPOUTED BED PARA SU USO EN PROCESOS DE GASIFICACIÓN ALIMENTADOS CON PAJA DE ARROZ

MOLINER ESTOPIÑÁN, Cristina ⁽¹⁾; BOVE, Dario ⁽²⁾, BOSIO, Barbara ⁽¹⁾, ARATO, Elisabetta ⁽¹⁾

RIBES GREUS, Amparo ⁽³⁾

aribes@ter.upv.es

⁽¹⁾Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale

⁽²⁾Free University of Bozen, Faculty of Science and Technology

⁽³⁾Universidad Politécnica de Valencia, Instituto de Tecnología de Materiales

RESUMEN

El uso de biomasa como alimento en procesos de obtención de energía constituye una de las alternativas para contribuir al desarrollo de tecnologías energéticas de naturaleza renovable. Entre los diferentes tipos de biomasa, los residuos agrícolas emergen como una fuente de alimento apta para procesos termo-químicos. Estos residuos presentan en muchas ocasiones grandes dificultades en su gestión y acaban convirtiéndose en problemas ambientales y sociales. Este es el caso de la paja de arroz, para la que el método de eliminación más común (30%) sigue siendo su quema incontrolada, con el aumento en emisiones de CO₂ que ello conlleva y el daño que representa.

Los procesos de valorización energética, y en concreto las transformaciones termo-químicas, son comúnmente utilizadas en la actualidad para convertir biomasa en combustibles de características adecuadas. Entre ellas, la gasificación se presenta como una de las tecnologías con más proyección [1] y los reactores de tipo Spouted Bed (SB) se sitúan como una herramienta adecuada para llevar a cabo dichos procesos. La caracterización fluido dinámica del reactor es un elemento esencial para la obtención de los mejores rendimientos y eficiencias en los procesos de conversión termo-química.

Por ello, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar los parámetros fluido dinámicos característicos (perfiles de velocidad y presión) de un reactor Spouted Bed de base cuadrada. Para ello, se han realizado pruebas a baja temperatura utilizando paja de arroz como material de alimento y sílice como material inerte. Estos resultados se han comparado con los obtenidos mediante un modelo fluido dinámico, desarrollado con el software comercial Fluent©, considerando una aproximación euleriana en la que tanto el gas como los sólidos son considerados como medios continuos y las interacciones entre partículas son definidas mediante relaciones de clausura.

Palabras clave: Caracterización fluido dinámica, reactor tipo spouted bed, gasificación biomasa

1. Introducción

El uso de la biomasa para obtener energía constituye una de las alternativas más prometedora en el sector energético renovable. Entre los diversos tipos de biomasa, los residuos agrícolas constituyen una fuente apta para procesos termo-químicos. Estos residuos, en muchas ocasiones, presentan grandes dificultades en su gestión y acaban convirtiéndose en problemas ambientales y sociales. Este es el caso de la paja de arroz, para la que el método de eliminación más común (30%) sigue siendo su quema incontrolada, con el aumento en emisiones de CO₂ que ello conlleva y el daño que representa para la salud humana, porque se produce en un período muy reducido de tiempo y con gran concentración de emisiones. La prohibición de estas prácticas por parte de las autoridades legales ha llevado al abandono de esta paja en los campos, provocando también en ese caso alteraciones importantes en los ecosistemas: su descomposición daña la calidad del agua, produce olores desagradables y aumenta la mortalidad de las especies acuáticas en las zonas de humedales protegidas.

El contenido energético (High Heating Value, HHV) estimado para residuos agrícolas es de HHV=15-17 MJ/Kg [2] que, comparado con los tradicionales combustibles fósiles parece no muy elevado. Sin embargo, la extensa cantidad de residuo disponible así como su naturaleza renovable hace que estos materiales se consideren aptos para su aplicación en este tipo de tecnologías.

Los procesos de valorización energética, y en concreto las transformaciones termo-químicas, son comúnmente utilizadas en la actualidad para convertir biomasa en combustibles de características adecuadas. Entre ellas, la gasificación se presenta como una de las tecnologías con más proyección en la recuperación energética. Entre sus propiedades destacan su habilidad para convertir rápidamente grandes cantidades y tipos de biomasa en combustibles (líquidos o gas) de fácil almacenamiento. El proceso consiste en una serie de reacciones físicas y químicas para transformar el combustible inicial (sólido o líquido) en un nuevo tipo de combustible en fase gas (syngas) con un alto poder calorífico. El alimento es calentado en condiciones sub-estequiométricas y el syngas resultante puede ser usado tanto en aplicaciones térmicas como eléctricas (o ambas).

Varias técnicas de gasificación se han desarrollado para la conversión termo-química de diferentes residuos agrícolas utilizando diversos tipos de reactores. Entre todos los procesos, la fluidización surge como la opción más idónea para la gasificación de biomasa debido a las beneficiosas propiedades que ofrece como resultado de sus condiciones operativas. Entre otras, cabe destacar el alto grado de mezcla de partículas y sólidos alcanzado, la posibilidad de asegurar condiciones isotermas en todo el reactor y la facilidad de realizar el scale-up a instalaciones de mayor capacidad gracias a la no dependencia de las interacciones sólido-fluido con el tamaño o geometría del reactor [3].

Sin embargo, el uso de paja de arroz en procesos de fluidización convencionales presenta una serie de inconvenientes que se necesitan superar para alcanzar valores de eficiencia competitivos respecto a otros residuos agrícolas. Entre estos inconvenientes destacan la necesidad de un pretratamiento de la muestra con el fin de eliminar la mayor cantidad de humedad y contenido en especies alcalinas, los bajos porcentajes de transferencia de materia y energía debido a las grandes dimensiones de partícula y a la elevada heterogeneidad y la aparición de problemas de escoria e incrustantes como consecuencia de los altos contenidos de ceniza y que pueden ocasionar problemas de corrosión en el reactor. Se necesitaría por tanto, la búsqueda de nuevas configuraciones que, aprovechando las ventajas que presenta la fluidización convencional, sean capaces de superar las limitaciones impuestas por la naturaleza de la materia prima

En este contexto, los reactores SB se presentan como alternativa a los métodos convencionales gracias a sus particulares características de trabajo. Estos reactores se obtienen al reemplazar el plato perforado de un reactor de flujo convencional por una base con un simple orificio, normalmente en posición central. De esta forma, la circulación de sólidos aumenta y las zonas de estancamiento disminuyen. Así, los procesos de transferencia de materia y energía se ven altamente favorecidos consiguiendo altos valores de eficiencia. Además, las reacciones se llevan a cabo en rangos de temperatura más bajos por lo que resulta un proceso más fácil de controlar. Este perfil más bajo de temperaturas favorece también la disminución de problemas de aglomeración y de corrosión por las cenizas generadas.

Por esto, en el presente trabajo se realizaron experimentos a baja temperatura en un reactor SB de base cuadrada usando paja de arroz como alimento y sílice como material inerte con el fin de estudiar la fluido dinámica del sistema. Estos resultados se utilizaron para validar el modelo fluido dinámico del proceso obtenido mediante el software de simulación comercial Fluent®.

2. Método experimental

2.1. Material

La paja de arroz utilizada como alimento se recogió en la provincia de Valencia (España) y secada a temperatura ambiente. Todas las muestras utilizadas fueron troceadas y consideradas como un cilindro de diámetro constante y longitud media de $d_{\text{paja_arroz}}=0.01$ m, obtenida tras realizar una distribución de tamaños sobre una muestra representativa. La densidad, calculada experimentalmente, fue de $d_{\text{paja_arroz}}=238$ kg/m³. El factor de forma, definido como la relación entre el área superficial de una esfera que tiene el mismo volumen que la partícula y el área superficial de dicha partícula, fue de $\Phi=0.82$.

El sistema lo completa la sílice presente en el lecho de partículas, con un diámetro $d_{\text{silice}}=1.4 \cdot 10^{-3}$ m y densidad $d_{\text{silice}}=2600$ kg/m³.

Los valores de densidad y diámetro efectivo de la mezcla conteniendo un 10% en volumen de paja de arroz, fueron calculados según sus medias ponderadas en base volumétrica.

2.2. Equipo experimental

El equipo experimental utilizado para realizar las pruebas a baja temperatura está compuesto de: compresor de aire, caudalímetro, manómetro y reactor SB, cuyas dimensiones características se muestran en la Figura 1.

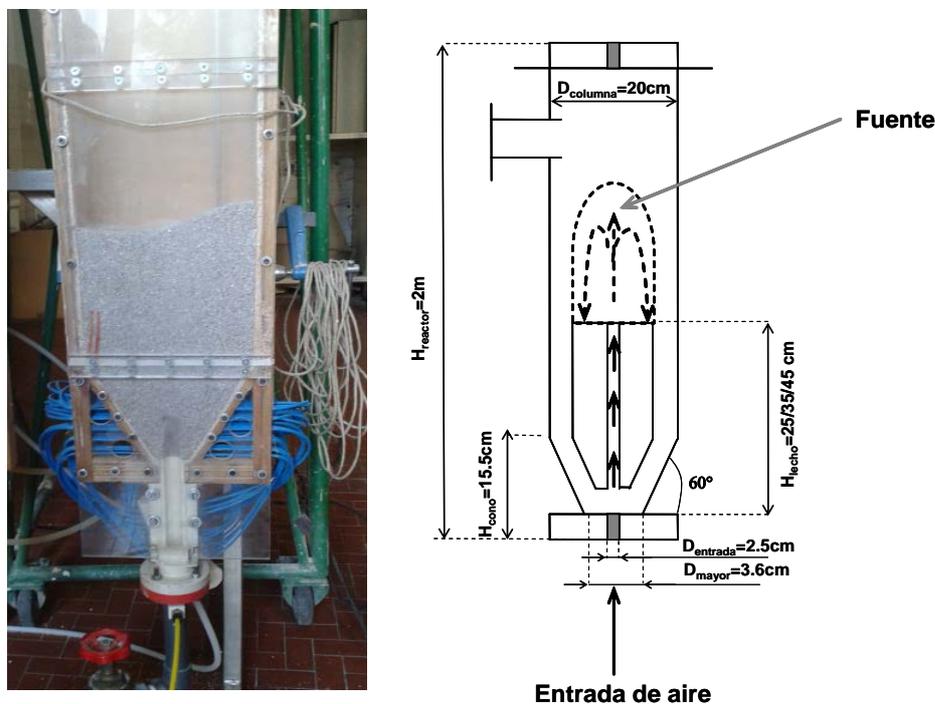


Figura 1: Reactor SB y dimensiones características.

2.3. Parámetros de simulación

La simulación fluido dinámica se llevó a cabo con el software comercial Fluent© mediante la técnica de volumen de control finito. El cálculo de las variables acopladas presión-velocidad se realizó según el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations).

3. Estudio fluido dinámico experimental

El comportamiento fluido dinámico de un reactor SB depende en gran medida de las características del sólido de reacción. La caracterización del sistema a baja temperatura resulta necesaria a la hora de asegurar el buen funcionamiento del proceso. Por ello, se estudió la influencia de la altura inicial del lecho de partículas en la estabilidad del sistema, así como la dependencia de la velocidad mínima de spouting con el tamaño de partícula efectivo.

Los ensayos experimentales se realizaron aumentando el caudal de aire introducido a través del lecho de partículas, situado a tres alturas iniciales diferentes, midiendo en cada caso la caída de presión a través de dicho lecho y la altura máxima de la fuente generada por el proceso de *spouting*.

La Figura 2 muestra la evolución de la caída de presión a través del lecho de partículas conteniendo un 10% (volumétrico) de paja de arroz al incrementar la velocidad del aire de entrada, para diferentes alturas iniciales de lecho.

En la figura se puede observar como la caída de presión aumenta linealmente con el aumento de velocidad de aire (U) hasta que, en cierto punto (ΔP_{max}) alcanza su valor máximo tras el cual decrece rápidamente hasta llegar a un valor donde se mantiene constante. Dicho punto máximo tiene lugar cuando la cavidad de aire a través del lecho llega a la superficie formando la característica fuente del proceso de spouting. La brusca caída de presión se produce por la menor resistencia ofrecida por los sólidos debido a la agitación vigorosa y continua recirculación de partículas como consecuencia de la fuente.

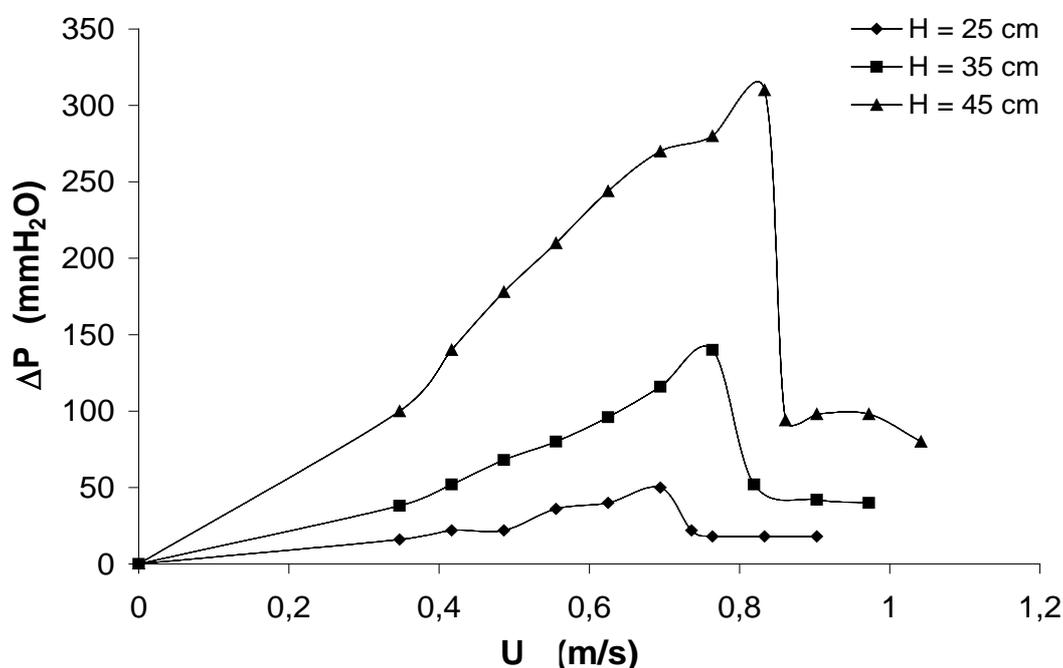


Figura 2: Evolución de la caída de presión con el incremento de velocidad de aire a diferentes alturas iniciales de lecho de partículas (10% v/v).

Como se observa en la Figura 2, los procesos a $H=25$ cm y $H=35$ cm llegan a estabilizarse a valores relativamente bajos en comparación con los métodos tradicionales de fluidización. Sin embargo, la

altura correspondiente a 45 cm presenta incipientes inestabilidades y, por tanto, se define como altura máxima inicial de lecho de partículas para asegurar la estabilidad del proceso.

Los valores de velocidad mínima de spouting fueron experimentalmente calculados como la velocidad de aire correspondiente a la desaparición de la fuente como consecuencia de la reducción de entrada de aire al sistema y se recogen en la Tabla 1.

Tabla 9: Velocidad mínima de spouting para diferentes alturas de lecho inicial de partículas (paja de arroz = 10% v/v)

	H=25 cm	H=35 cm	H=45 cm
U (m/s)	0.500	0.556	0.625

4. Obtención del modelo fluido dinámico del sistema

La definición fluido dinámica teórica del sistema experimental real se realizó con el software comercial Fluent© siguiendo una aproximación euleriana: ambas fases (gas y líquido) son consideradas como medios continuos, mediante la aplicación de *las ecuaciones de conservación de masa y momento cinético* para cada una de las fases, y las interacciones entre partículas vienen representadas por *relaciones de clausura* [4].

4.1. Modelos de arrastre

El modelo de arrastre *Huilin-Gidaspow* [5] se utilizó para definir la interacción gas-sólido, según el cual la ecuación de Ergun se aplicó para la fase densa y la ecuación de Wen-Yu para la fase diluida. Así mismo, el modelo de arrastre de *Syamlal-O'Brien-Symmetric* [6] se empleó para determinar la interacción entre sólidos. En este caso, el coeficiente de restitución (e) se definió según los siguientes valores: 0.85 para la interacción entre partículas de sílice y 0.3 para el caso de interacciones entre partículas de paja de arroz e interacciones sílice-paja de arroz.

4.2. Teoría cinética del flujo granular

Las colisiones inelásticas entre partículas en la fase sólida fueron modeladas mediante la aplicación de la teoría cinética del flujo granular [7]. En ella, la ecuación de conservación de la temperatura granular define la presión cinemática del sólido:

$$p_s = \varepsilon_s \rho_s \theta [1 + 2g_0 \varepsilon_s (1 + e)] \quad (1)$$

Siendo e el coeficiente de restitución entre partículas y g_0 la función de distribución radial definida como:

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,\max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (2)$$

Y la viscosidad de esfuerzo cortante [8]:

$$\mu_s = \frac{4}{5} \varepsilon_s^2 \rho_s d_p g_0 (1 + e) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} + \frac{10 \rho_s d_p \sqrt{\pi \theta}}{90(1 + e) g_0} \left[1 + \frac{4}{5} g_0 \varepsilon_s (1 + e) \right]^2 \quad (3)$$

4.3. Modelo de turbulencia

El modelo de turbulencia aplicado fue el modelo dispersivo, según el cual la fase continua es predominante y los sólidos se encuentran dispersos en ella. El modelo estándar $k-\varepsilon$ se usó para predecir el régimen turbulento en la fase gas [9].

4.4 Resultados de la simulación

Una vez seleccionados los modelos teóricos que definen el proceso e introducidas todas las propiedades físicas del sistema y tomando como velocidad de entrada de aire la mínima velocidad de spouting obtenida previamente, se realizó la simulación numérica del proceso.

La Tabla 2 recoge los valores obtenidos para la altura máxima de fuente tanto experimentalmente como mediante la aplicación del modelo fluido dinámico para el caso de un lecho de partículas de sílice-paja de arroz (10% en volumen) para diferentes alturas iniciales.

Tabla 2: Altura máxima de fuente para diferentes alturas de lecho inicial de partículas (paja de arroz = 10% v/v)

Altura inicial (cm)	Resultado experimental (cm)	Resultado simulación (cm)	Error (%)
25.0	78.0	79.9	+2.4
35.0	93.0	93.4	+0.4
45.0	107.0	102.4	-4.3

Los valores de error obtenidos, siempre menores al 5%, permiten asegurar que el modelo predice con bastante precisión la altura máxima de fuente del proceso. Este parámetro es de gran interés en el diseño del proceso ya que permite la identificación de la zona principal del reactor SB donde se llevan a cabo todos los procesos de intercambio de masa y energía entre gas y sólido.

La validación del modelo permite obtener una herramienta adicional para el estudio del fenómeno de spouting del sistema sílice-paja de arroz y, tomando como base la solución numérica obtenida, los próximos estudios se centrarán en la variación de variables como velocidad de entrada de aire o cantidad inicial de sólidos para obtener la solución optimizada del proceso, así como en el estudio detallado de los fenómenos de transferencia entre sólido y gas que ocurren en la zona de la fuente.

La Figura 3 muestra la representación gráfica de la simulación según las diferentes alturas de lecho analizadas. La representación de la izquierda corresponde a la fracción volumétrica del sílice y la de la derecha a la correspondiente fracción para el caso de la paja de arroz.

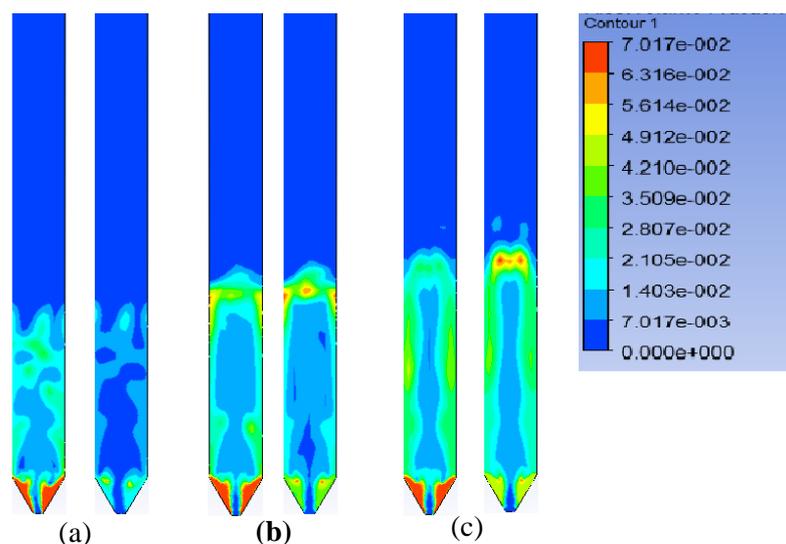


Figura 3. Representación gráfica del modelo: altura inicial de lecho de partículas a 25 cm (a), 35 cm (b), 45 cm (c)

5. Conclusiones y consideraciones finales

El comportamiento fluido dinámico de un reactor tipo spouted bed para el sistema sílice-paja de arroz se estudió tanto experimental como teóricamente. La estabilidad del sistema se analizó experimentalmente mediante el estudio del proceso a diferentes alturas iniciales de lecho de partículas, fijando el valor de 45 cm como altura máxima de trabajo para asegurar la estabilidad fluido dinámica del sistema.

Por otro lado, los resultados de altura máxima de la zona de fuente obtenidos con el modelo desarrollado en Fluent© fueron comparados con los resultados experimentales y, la dispersión de resultados inferior al 5%, permitió validar dicho modelo. Este modelo constituirá una herramienta adicional que permitirá el estudio detallado de los fenómenos de transferencia que ocurren en la zona de la fuente, zona principal del reactor SB donde se llevan a cabo todos los procesos de intercambio de masa y energía entre gas y sólido.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración del Prof. Giorgio Rovero y el Dr. Massimo Curti y por la disponibilidad que han mostrado para la realización de las pruebas en sus laboratorios en el Politecnico de Torino (Italia).

7. Referencias

- [1] A. Kumar, D. D. Jones, M.A. Hanna. *Thermochemical Biomass Gasification: A Review of the Current Status of the Technology*. Energies, 2009, vol. 2, pp. 556-581.
- [2] J.S. Lim, Z. A. Manan, S. Rafidah, W. Alwi, H. Hashim. *A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012, 16, 3084–3094.
- [3] G. Rovero, M. Curti, G. Cavaglià. *Optimization of Spouted Bed Scale-Up by Square-Based Multiple Unit Design*, Advances in Chemical Engineering, Dr Zeeshan Nawaz (Ed.), 2012, ISBN: 978-953-51-0392-9.
- [4] N. Epstein, J.R. Grace. *Spouted and spout-fluid beds. Fundamentals and applications*. Cambridge University Press 2011, Cambridge.
- [5] L. Huilin, D. Gidaspow. *Hydrodynamics of binary fluidization in a riser: CFD simulation using two granular temperatures*. Chemical Engineering Science, 2003, 58, 3777-3792.
- [6] M. Syamal, *The particle-particle drag term in a multiparticle model of fluidization*. National Technical information service, 1987, Springfield, VA.
- [7] C.K.K.Lun, S.B. Savage, D.J. Jeffrey, N. Chepuruiy, *Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flowfield*, Journal of Mechanicals, 1984, 140, 223-256.
- [8] J. Ding, D. Gidaspow, *A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow*, AIChE Journal, 1990, 36, 523-538.
- [9] B.E. Launder, D.B. Spaulding, *Mathematical models of turbulence*, 1972, Academic Press, London, England.