

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA HIDRODINÁMICA DE LECHOS FLUIDIZADOS A PRESIÓN Y TEMPERATURA ATMOSFÉRICA

Yolice Moreno Ruiz, Alejandro Molina, Farid Chejne Janna & Carlos Londoño Giraldo
Escuela de Procesos y Energía, Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín
clondono@unal.edu.co

Recibido para evaluación: 11 de Septiembre de 2007

Aceptación: 6 de Noviembre de 2007

Entrega de versión final: 19 de Noviembre de 2007

Resumen

A pesar del frecuente uso de lechos fluidizados para la combustión y gasificación de carbón y biomasa, pocos estudios se han ocupado de caracterizar experimentalmente la hidrodinámica de los mismos. El carácter no lineal de la interacción de los distintos fenómenos de transporte en un lecho fluidizado y el alto número de partículas en el mismo sugieren la teoría del caos como herramienta para el análisis de la hidrodinámica de lechos fluidizados. En esta investigación se realizaron experimentos en un lecho fluidizado de 8 cm de diámetro interno y 1.20 m de altura y a condiciones ambientales (298 K y 86 kPa). Los datos de presión contra tiempo fueron adquiridos por medio de un transductor de presión con un tiempo de respuesta (30 ms) suficientemente rápido para medir la dinámica de las fluctuaciones de presión en el lecho. A los datos experimentales se les determinó el promedio (\bar{X}), la desviación estándar (σ), la asimetría (S), la llanura (F), la función de autocorrelación (Cxx) y la función de densidad espectral (PSD) por medio del método Welch. Con esta información se caracterizó la hidrodinámica del lecho fluidizado gas-sólido de acuerdo con consideraciones de la teoría del caos.

Palabras Clave: Fluidización, Hidrodinámica, Teoría del Caos.

Abstract

In spite of the frequent use of fluidized beds in coal and biomass combustion and gasification, few studies have experimentally characterized the hydrodynamic processes associated to fluidized beds. The non-linear character of the interaction of transport phenomena present in fluidized beds and the high number particle suggest that chaos theory can be a tool to analyze the hydrodynamics of fluidized beds. In this research we carried out experiments in an 8-cm-inner-diameter, 1.20-m height fluidized bed operated at 298 K and 86 kPa. Pressure vs. time data were recorded with a 30-ms dead time pressure transducer that was fast enough to measure the dynamic pressure fluctuations in the bed. P vs. t data were used to determine average (\bar{X}), standard deviation (σ), skewness (S), flatness (F), auto-correlation function (Cxx) and the power spectral density function (PSD) by the mean Welch method. These variables allowed characterization of the gas-solid fluidized bed hydrodynamic according to chaos theory.

Keywords: Fluidization, Hydrodynamics, Chaos Theory.

1. INTRODUCCIÓN

La fluidización es uno de los procesos en ingeniería química con múltiples componentes que implica la presencia simultánea de fases líquidas, sólidas y/o gaseosas, además de la presencia de gradientes de presión, temperatura y concentración donde coexisten fenómenos de transporte, transformación química y generación de superficie (sólidos fraccionados, gotas, burbujas, entre otros). El acoplamiento de estos fenómenos enmarca la hidrodinámica de lechos fluidizados en el contexto de los fenómenos dinámicos no lineales [Punèochå M. and Jøi D., 2003.] y [Van der Bleek, 2002]. Dada la capacidad de la Teoría del Caos para el análisis de procesos no lineales, está podría facilitar el diseño, escalado y operación de lechos fluidizados [Jhonsson et al., 2000; Van de Bleek, Coppens and Schouten, 2002; Van der Schaaf et al., 2004; Ellis et al., 2003].

El estudio del comportamiento caótico de los lechos fluidizados se puede realizar mediante el análisis de fluctuaciones de presión en el tiempo. Las variaciones de presión dentro del lecho se originan de procesos lineales y no lineales en los mismos. El propósito de este trabajo es realizar una descripción de la dinámica no lineal en el dominio del tiempo y de la frecuencia de un lecho fluidizado a partir de las series de tiempo de fluctuaciones de presión.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los experimentos se realizaron en un lecho fluidizado circulante transparente de acrílico de 8 cm de diámetro interno y 1.20 m de altura a temperatura ambiente (298 K), a presión atmosférica (86 kPa) y a diferentes velocidades superficial del gas (0.2 m/s a 0.3 m/s), en el régimen de fluidización explosiva. Se empleó como material de lecho arena de cuarzo de 350 μm y densidad de 2650 kg/m^3 con una amplia distribución de tamaño. Para obtener las señales de fluctuaciones de presión se utilizó una sonda de presión diferencial de 3 mm de diámetro interno, la cual se ubicó a diferentes posiciones a lo alto del lecho (0.03- 0.09 m sobre el plato distribuidor). La presión se midió mediante un transductor de presión (265 DS-ABB) diferencial, con un tiempo de respuesta de 30 ms. Una de las tomas de presión se dejó abierta a la atmósfera, mientras la otra se conectó con la sonda. De esta forma, la presión medida representa la diferencia de presión entre la sonda y la presión atmosférica. Las señales de voltaje-tiempo

que corresponden a las señales de presión-tiempo fueron muestreadas a una frecuencia de 33.3 Hz y almacenadas mediante un sistema de adquisición de datos en un computador utilizando una interfase gráfica que utiliza LabView y diseñada especialmente para los experimentos. El tiempo total de muestreo fue 46 s obteniendo 1536 muestras. Esta combinación de velocidad de muestreo y tiempo permite desarrollar un análisis estadístico y análisis del caos [Ruud van Ommen et al., 1999].

Para el análisis de los datos experimentales se calcularon la varianza (σ), el promedio (\bar{X}), la asimetría (S), la llanura (F) y la función de auto correlación (C_{xx}) utilizando Matlab.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Dominio del tiempo

Las Figuras 1 y 2 presentan las series de tiempo de las fluctuaciones de presión experimentales a velocidad superficial de gas 0.2 m/s y 0.3 m/s respectivamente.

Para las distintas velocidades superficiales de gas se obtuvieron burbujas grandes (de aproximadamente 1 a 3 cm) que hacían erupción sobre la superficie del lecho y que producen una amplia desviación estándar (ver Tabla 1).

En las Figuras 1 y 2 no se observa ningún comportamiento periódico de la señal y la distribución de burbuja no es uniforme, presentándose una mayor varianza cuando, como era de esperarse, para la mayor velocidad de gas ($v_g = 0.3$ m/s).

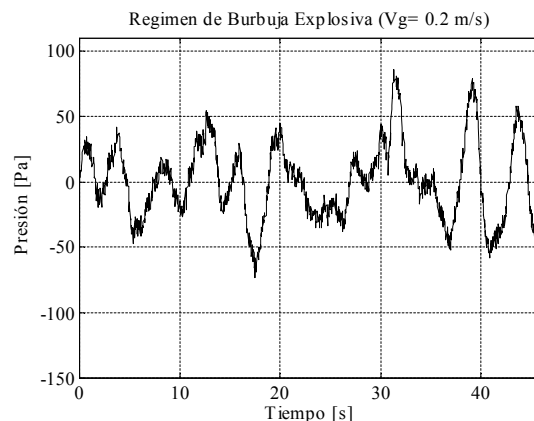


Figura 1. Variación de la presión con el tiempo.

Régimen de burbuja explosiva, $v_g = 0.2$ m/s.

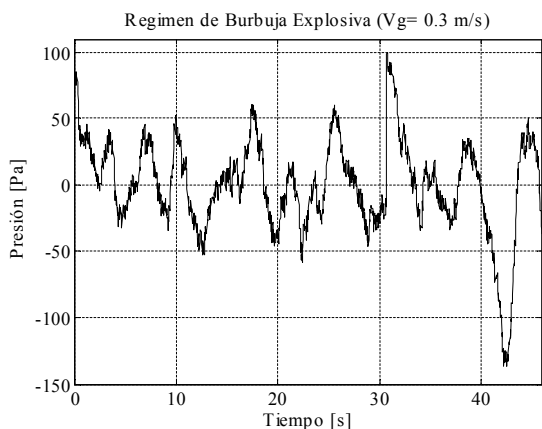


Figura 2. Variación de la presión con el tiempo. Régimen de burbuja explosiva, $v_g = 0.3$ m/s.

Tabla 1. Parámetros calculados para el Análisis en el Dominio del Tiempo.

Régimen de burbuja múltiple	$\sigma(Pa)$	S	F
$v_g = 0.2$ m/s	29.5	0.24	2.7
$v_g = 0.3$ m/s	35.3	-0.67	5.1

Para una distribución normal (Gaussiana), los valores de asimetría, S , y llanura, F , son 0 y 3 respectivamente. Para el caso de estudio hay diferencia apreciable para cada velocidad superficial de gas. Las figuras 3 y 4 muestran también desviaciones de la distribución normal (línea roja) para ambas mediciones. Sin embargo, una gran cantidad de las mediciones presenta un comportamiento similar a la distribución normal, especialmente para $v_g = 0.2$ m/s. (Figura 3).

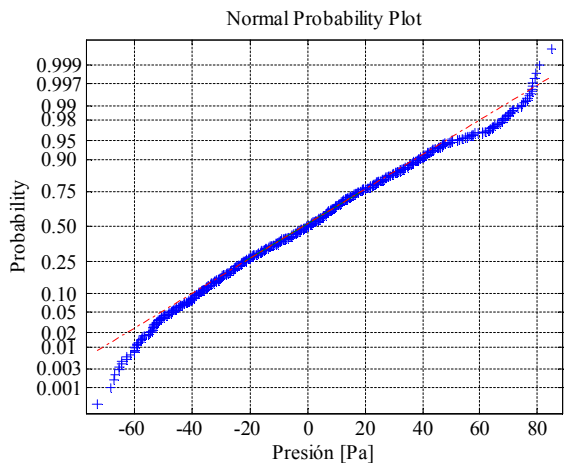


Figura 3. Probabilidad Normal Experimental $v_g = 0.2$ m/s.

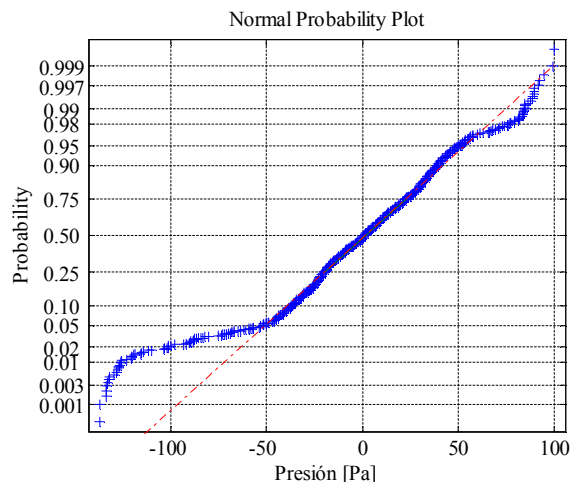


Figura 4. Probabilidad Normal Experimental $v_g = 0.3$ m/s.

A pesar de que las mediciones se realizaron todas en el régimen de fluidización explosiva, los valores de S y F son considerablemente distintos para las dos velocidades de fluidización (ver Tabla 1). Actualmente se estudia la causa de esta diferencia. Las Figuras 5 y 6 muestran la variación del coeficiente de correlación (C_{xx}) en el tiempo. Se observa que hay correlación de la señal de presión consigo misma, pero no es simétrica con respecto al origen. Existe un decaimiento rápido de la función de autocorrelación con el tiempo de retraso y hay una autocorrelación periódica de la señal que esta asociada a la formación de burbujas. Los resultados cualitativos son similares para ambas presiones.

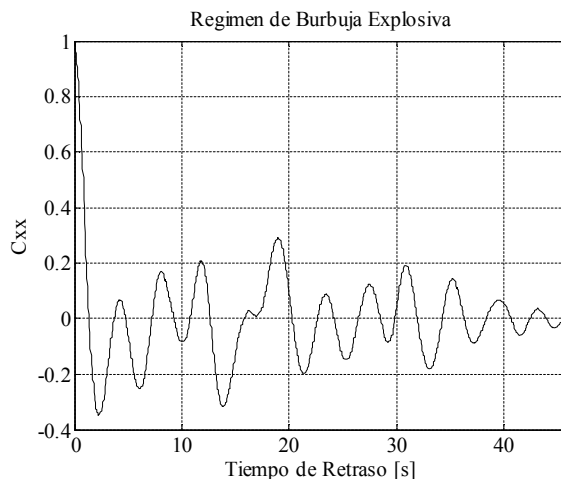


Figura 5. Función de autocorrelación (C_{xx}), $v_g = 0.2$ m/s.

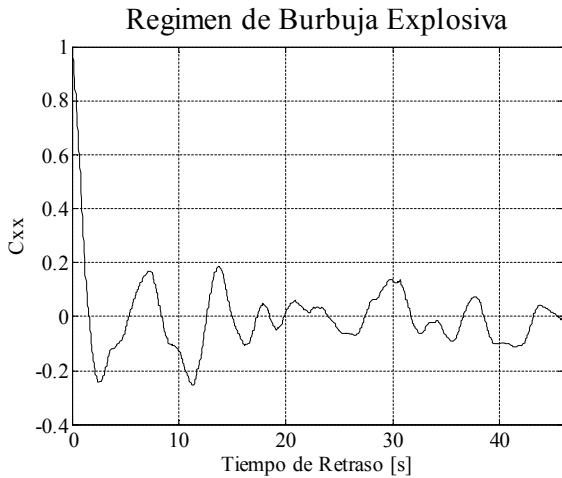


Figura 6. Función de autocorrelación, (C_{xx}), $v_g = 0.2$ m/s.

3.2 Dominio de la frecuencia

La series de tiempo experimental se dividieron en 8 subespectros, cada uno con un solapamiento del 50%, empleando el método de Welch [Proakis, J. G, 1989] y por el método del periodograma para obtener la función de densidad espectral de potencia (PSD) con una frecuencia de muestreo de 33.3 Hz.

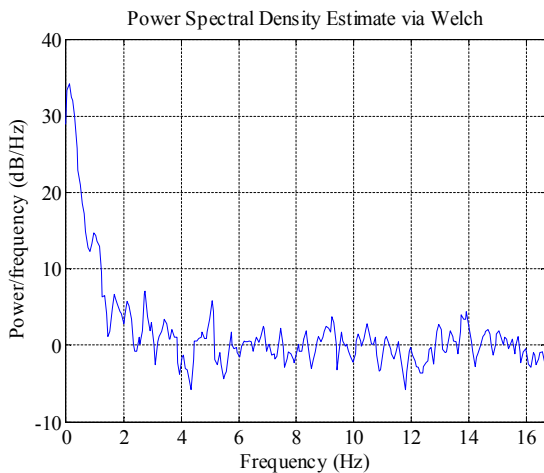


Figura 7. PSD (Welch) $v_g = 0.2$ m/s.

Para una v_g de 0.2 y 0.3 m/s se obtuvieron espectros de potencia parecidos como se puede observar en la Figura 7 a 8. Con los dos métodos empleados de análisis PSD se obtuvo que el régimen de burbuja explosiva tiene una banda ancha de frecuencias de 0 – 16 Hz, con una frecuencia dominante de 0 - 1.5 Hz (Figura 7). El periodograma presentó un alto nivel de ruido. Futuros estudios intentarán mejorar la señal.

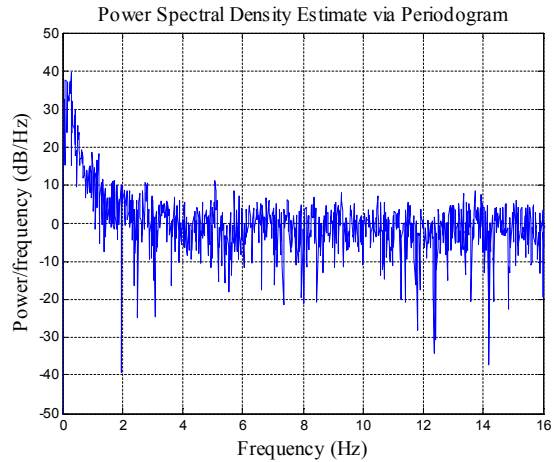


Figura 8. PSD (Periodograma) $v_g = 0.2$ m/s.

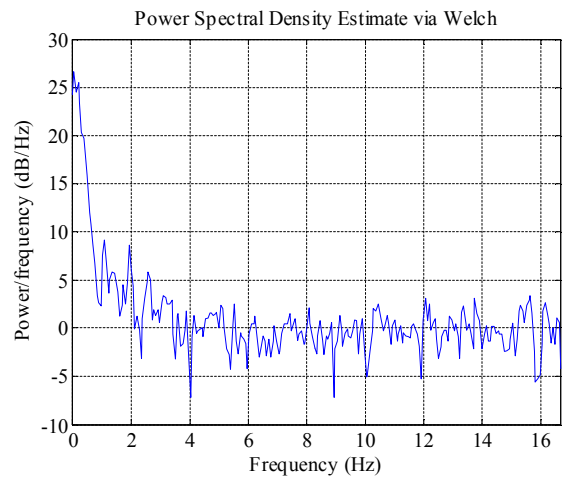


Figura 9. PSD (Welch) $v_g = 0.3$ m/s.

4. CONCLUSIÓN

Para la caracterización de la hidrodinámica de un lecho fluidizado, el análisis en el dominio del tiempo es una herramienta de análisis lineal sencilla para emplear porque da una descripción cualitativa de la dinámica del lecho, pero sin embargo no es lo suficientemente completa como método de descripción de la dinámica del lecho.

El análisis espectral es una herramienta que complementa al análisis en el dominio del tiempo, porque a partir de ella se puede identificar las transiciones entre regímenes, la frecuencia dominante del espectro, pero para ello se requiere la selección de un método adecuado de análisis espectral y la representación de la función de PSD.

El lecho fluidizado analizado muestra para régimen de fluidización explosiva que la distribución de fluctuaciones de presión se aleja de una distribución normal. El análisis de la asimetría y la llanura sugiere que la desviación de la distribución normal es mayor para mayores velocidades de fluidización. La señal de presión presenta autocorrelación, la cual se relaciona con la periodicidad de formación de las burbujas.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, y a la DIME (Dirección de investigaciones de la Universidad Nacional, sede Medellín) por el apoyo económico para esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Bendat, J.S. y Piersol, A.G., 1971. *Random Data-Analysis and Measurement Procedures*. Wiley/Interscience, New York.
- [2] Chaplin G., Pugsley T. y Winters C. Application of Chaos Analysis to Fluidized Bed Drying of Pharmaceutical Granule, in *Fluidization XI: Present and Future for fluidization Engineering*, U.
- [3] Ellis, N. et al. 2003. Characterization of Dynamic Behavior in Gas-Solid Turbulent Fluidized Bed Using Chaos Analysis and Wavelet Analyses, *Chemical Engineering Journal* 96. pp.105-116.
- [4] Johnsson, F. y Leckner, B. 1995. Vertical Distribution of Solids in a CFB-Furnace. In: Heinschel, K.J. (Ed.), *Proc. Thirteenth Int. Conf. Fluidized Bed Combustion*. American Society of Mechanical Engineers, New York. pp. 671-679.
- [5] Johnsson, F., Zijerveld, R.C., Schouten, J.C., Van de Bleek, C. y Leckner, B. 2000. Characterization of Fluidization Regimes by Time-Series Analysis of Pressure Fluctuations”, *International Journal of Multiphase Flow* 26. pp. 663-715.
- [6] Kang, Y. et al. 2000. Bubble Properties and Pressure Fluctuations in Pressurized Bubble Columns”. *Chemical Engineering Science* 55, pp. 411-419.
- [7] Kantz, H., Schreiber, T. 1997. *Nonlinear Time Series Analysis*. Cambridge Nonlinear Science Series, vol. 7. Cambridge University Press, Cambridge. 304 P.
- [8] Punèocháø, M. y Jiøi, D. 2003. Entropy of Fluidized Bed-a Measure of Particles Mixing. *Chemical Engineering Science* 58. pp. 2515-2518.
- [9] Ruud van Ommen, J. 1999. Response Characteristic of Probe-Transducer Systems for Pressure Measurements in Gas-Solid Fluidized Bed: How to Prevent Pitfalls in Dynamic Pressure Measurements. *Powder Technology* 106. pp. 199-218.
- [10] Svensson, A., Johnsson, F., Leckner, B. 1996b. Bottom Bed Regimes in a Circulating Fluidized Bed Boiler. *Int. J. Multiphase Flow* 22. pp.1187-1204.
- [11] Trnka O., Vesely V, Hartman M. 2000. Identification of the State of a Fluidized Bed by Pressure Fluctuations. *AIChE J.* 46 (3). pp.509-514.
- [12] Van den Bleek, C.M., Coppens, M.O. & Schouten, J. 2002. Application of Chaos Analysis to Multiphase Reactors”, *Chemical Engineering Science* 57. pp.4763-4778.
- [13] Van den Bleek C.M. y Schouten J. 1993. Deterministic Chaos-a New Tool in Fluidized-Bed Design and Operation. *Chemical Engineering Journal* 53. pp. 75-87.
- [14] Van der Schaaf J., et al. 2004. Similarity Between Chaos Analysis and Frequency Analysis of Pressure Fluctuations in Fluidized Beds. *Chemical Engineering Science* 59. pp. 1829-1840.

