

CARACTERITZACIÓ DE LA FLUÏDITZACIÓ MITJANÇANT L'ANÀLISI LINEAL DE LES FLUCTUACIONS DE LA PÈRDUA DE CÀRREGA

Miquel F. Llop i Francesc X. Llauro

Departament d'Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia Agroalimentària.
Escola Politècnica Superior. Av. Lluís Santaló, s/n, 17003, Girona.

RESUM

En aquest treball es fa una descripció dels mètodes més utilitzats per a l'anàlisi de les fluctuacions de la pèrdua de càrrega en els llits fluïditzats gas-sòlid. L'atractiu d'aquesta tècnica, molt emprada per a l'estudi dels llits fluïditzats, és la facilitat en l'obtenció de les dades i el seu tractament, ja que es poden analitzar amb mètodes establerts per a les sèries temporals. De l'anàlisi de les fluctuacions (desviació estàndard, funció d'autocorrelació i espectre de potència), es constata la valuosa informació que es pot extreure per interpretar el comportament hidrodinàmic dels llits fluïditzats. Aquesta informació permet determinar la velocitat mínima de fluïdització, identificar els règims de flux i tenir informació de l'estructura del llit.

RESUMEN

En el presente trabajo se hace una descripción de los métodos más utilizados para el análisis de las fluctuaciones de la pérdida de carga en un lecho fluidizado gas-sólido. El atractivo de su utilización radica en la facilidad de la adquisición de los datos y en que las técnicas usadas son las establecidas para el estudio de las series temporales. Del análisis de las fluctuaciones (desviación estándar, función de autocorrelación y espectro de potencia) se constata la valiosa información que se puede extraer para interpretar el comportamiento hidrodinámico de los lechos fluidizados. Se puede determinar la velocidad mínima de fluidización, identificar el régimen de flujo y obtener información de la estructura del lecho.

ABSTRACT

In this paper the more popular methods for the analysis of pressure fluctuations in gas-solid fluidized beds are described. The interest in using pressure fluctuations is due to the simplicity of data acquisition and to the fact that they use standard techniques for the time series analysis. The methods used were temporal domain analysis (standard deviation of pressure fluctuations and autocorrelation function) and frequency domain analysis (power spectral function). From the time series analysis, valuable information can be extracted to interpret the hydrodynamical behaviour of fluidized beds, giving information about the structure of the beds.

KEYWORDS: Autocorrelation function, FFT analysis, Fluidization, Pressure fluctuations, Pressure analysis

INTRODUCCIÓ

La fluïdització gas-sòlid és una tecnologia molt utilitzada en la indústria química tant com a reactor químic (síntesi, craqueig, combustió, gasificació...) com en operacions físiques (asseccament, encapsulament, granulació...). La primera aplicació industrial data del 1921, deguda a F. Winkler per a la gasificació de lignit, però no va ser fins als anys quaranta, amb la tecnologia del craqueig catalític, que va adquirir l'ímpetu suficient per esdevenir una peça important en la moderna indústria química. L'èxit d'aquesta tecnologia radica en el bon contacte entre les dues fases que hi intervenen, el sòlid i el gas. Això dóna lloc a uns coeficients de transferència de matèria i transmissió de calor elevats que els fa molt atractius per a les aplicacions esmentades. Tot i el gran desenvolupament d'aquesta tecnologia, l'estudi dels llits fluïditzats continua tenint un gran interès, tant per millorar les aplicacions existents com per desenvolupar-ne de noves. La dinàmica de la fluïdització és complexa, ja que es produeixen inhomogeneïtats que generen perturbacions en el llit en forma de bombolles de gas. Es produeix la interacció no lineal entre les partícules i el fluid, dos medis independents, amb les seves pròpies dinàmiques de moviment, i és molt difícil obtenir un model que unifiqui ambdós comportaments. Aquesta dinàmica confereix al llit fluïditzat un comportament amb característiques caòtiques (Llauró i Llop, 2006).

Existeix una gran varietat de tècniques per a l'estudi del comportament dels llits. N'hi ha que es basen en una simple observació visual. D'altres, en l'anàlisi de les fluctuacions de pressió (Johnsson et al., 2000; Llop i Arnaldos, 1999; Llop i Jand, 2003). Però també s'utilitzen sofisticades tècniques com l'anàlisi dels senyals amb sondes òptiques, raigs làser, càmeres de filmació, anàlisi d'imatges, anàlisi de raigs X i tomografia.

La mesura i anàlisi de les fluctuacions de pressió és una tècnica fàcil d'utilitzar i és relativament senzilla d'implementar en instal·lacions industrials que poden treballar en condicions extremes de pressió i temperatura. Nogensmenys, té les seves limitacions, ja que la informació que es pot extreure és limitada. Tot i això, és molt emprada i se n'obté una informació molt útil (Llop i Arnaldos, 1999; Johnson et al. 2000; Llop i Jand, 2003).

L'objectiu d'aquest treball és fer una descripció de les tècniques utilitzades per a l'anàlisi de les fluctuacions de pressió en un llit fluïditzat i posar en relleu la informació que se'n pot extreure. Es descriuen diferents mètodes utilitzats per a aquesta anàlisi, que permeten determinar paràmetres com la velocitat de fluïdització incipient, l'estructura del llit o el règim de fluïdització.

FONAMENTS

Si a través d'un llit de partícules (catalitzador, carbó per cremar...) es fa circular un flux de gas en sentit ascendent, experimenta una pèrdua de càrrega directament proporcional a la seva velocitat, comportament que es pot justificar per l'equació

d'Ergun (Ergun, 1952). Quan la velocitat del gas és suficient perquè la força de fregament sobre les partícules sigui igual al pes d'aquestes en el llit, tendeixen a ser arrossegades i se separen per deixar passar el gas. Si les partícules estan compactades, és necessària una energia addicional per separar-les. Passat aquest punt, la pèrdua de càrrega disminueix i a continuació es manté constant. En aquest moment es produeix la fluïdització de les partícules i es produeix un moviment aleatori i desordenat del sòlid. El conjunt es comporta com un fluid i té propietats similars a les d'un líquid. La velocitat del gas a la qual es produeix la fluïdització es denomina *de fluïdització incipient* (u_{mf}).

A partir d'aquí la pèrdua de càrrega es manté constant i independent de la velocitat i es pot expressar mitjançant l'expressió següent:

$$\Delta P = (1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_g)Hg \quad (1)$$

On ΔP és la pèrdua de càrrega, ε la porositat, ρ_p la densitat de les partícules, ρ_g la densitat del gas, H l'alçada del llit i g l'acceleració de la gravetat. Si a partir de la fluïdització completa es fa disminuir la velocitat del gas, la pèrdua de càrrega es manté constant fins a arribar a la velocitat de mínima fluïdització, a partir d'on el llit esdevé fix. Aquesta pèrdua de càrrega disminueix, però pren valors inferiors als que tenia per a la mateixa velocitat en sentit creixent. Aquest procés de fluïdització i desfluïdització es pot apreciar a la figura 1.

Les característiques de fluïdització depenen bàsicament del tipus de partícula i de la velocitat del gas, però també hi té influència la relació entre l'alçada del llit i el diàmetre de la columna de fluïdització. Geldart (1973) va classificar les partícules en quatre categories segons el seu comportament, que va denominar *A*, *B*, *C* i *D*. Les del tipus *A* són de petita grandària i densitat inferior a 1.400 kg/m³. Fluïditzen bé a velocitats properes a la mínima de fluïdització, i a velocitats elevades es produeixen bombolles de gas que van creixent fins a una grandària limitada. La primera fase sense bombolles es denomina *fluïdització homogènia*, i la segona, *de bombolleig*. Les partícules del tipus *B* tenen una grandària superior que pot oscil·lar entre 40 mm i 1 mm, depenent de la seva densitat, que pot variar des de 1.400 kg/m³ fins a 4.000 kg/m³. En aquest cas les bombolles apareixen des del primer instant de la fluïdització incipient. Com en el cas anterior, aquestes creixen, es produeix la seva coalescència i finalment esclaten a la superfície i escapen del llit. Les partícules del tipus *D* són grans o bé d'elevada densitat; si l'altura del llit és elevada, són difícils de fluïditzar, formen canalitzacions. Les bombolles creixen ràpidament i poden ocupar el diàmetre del llit; llavors apareix el règim de flux de pistó. Les del tipus *C* són molt petites; les partícules es cohesionen fàcilment i són molt difícils de fluïditzar.

En funció de la velocitat del gas de fluïdització s'esdevenen els diversos règims de fluïdització. Per a les partícules del tipus *A*, augmentant la velocitat del gas es passa de fluïdització homogènia a bombolleig, a continuació al flux turbulent i finalment

al transport pneumàtic. Com ja s'ha dit, per a les partícules del tipus B les bombolles apareixen en l'instant de la fluïdització incipient. A partir d'aquesta situació, augmentant la velocitat del gas, aquestes bombolles creixen de mida i, quan el seu diàmetre s'aproxima al diàmetre de la columna de fluïdització, apareix el flux de pistó (*slugging*). Continuant augmentant la velocitat del gas desapareixen les bombolles, les partícules són arrossegades a diverses alçades per sobre del llit i només hi ha una fase molt diluïda en sòlids. Correspon al flux turbulent. Si les partícules són petites o el diàmetre de la columna és gran, es passa directament de flux de bombolleig a turbulent. Si augmenta més la velocitat, es produeix el transport pneumàtic. A Kunii i Levenspiel (1991) es troben més detalls sobre la influència de les condicions d'operació i del tipus de partícula en el mapa de fluïdització.

Les bombolles generades en el llit tenen associats uns camps de pressió que provoquen unes pertorbacions en el gradient de pressions existent en el llit. Aquest efecte es tradueix en unes fluctuacions en la mesura de la pèrdua de càrrega que són més grans a mesura que augmenta la velocitat de fluïdització. Aquestes fluctuacions tenen l'origen en la formació de les bombolles en el distribuïdor, el seu pas i creixement, la coalescència i el seu esclat a la superfície del llit. També hi intervenen, encara que menys, els xocs entre les partícules i el seu retorn al llit després de ser impulsades en sentit ascendent, en esclatar les bombolles a la seva superfície. A la figura 2 es poden apreciar les fluctuacions de la pèrdua de càrrega en un llit de 7,6 cm de diàmetre per a partícules de sorra silfícia del tipus B.

Així doncs, en les fluctuacions de pressió hi ha una apreciable informació referent a les propietats del llit, fins al punt que s'ha dit que representa una empremta digital del seu comportament. Per aquest motiu nombrosos investigadors han intentat inferir amb més o menys èxit propietats de les bombolles a partir de l'estudi d'aquestes fluctuacions (Fan et al. 1983; Clark et al. 1991). També s'han utilitzat amb èxit per determinar la velocitat mínima de fluïdització (Puncochár et al. 1985), l'estructura del llit (Llop i Arnaldos, 1999), les velocitats de transició dels règims de fluïdització (Perales et al. 1991; Chehbouni et al., 1994) i les característiques dels diferents règims de fluïdització (Zijerveld, 1998; Johnsson et al., 2000).

La localització de les sondes de pressió tenen importància, però una sonda que mesuri la pèrdua de càrrega diferencial en tot el llit reflecteix el seu comportament global.

EXPERIMENTACIÓ

Les dades experimentals s'han obtingut en diverses instal·lacions experimentals per aconseguir les diferents condicions i fluxos de fluïdització. Les característiques d'aquestes instal·lacions es mostren a la taula I. Les dades a elevades pressions i temperatures procedeixen d'un gasificador de carbó en llit fluiditzat. S'ha operat des de la temperatura ambient fins a 600 °C i des de la pressió atmosfèrica fins a 12

bar. En aquest cas s'ha fluïditzat sorra silícia de diàmetres 213, 450, 728, 1.085 i 1.460 μm. Per a pressions inferiors a l'atmosfèrica s'ha utilitzat una instal·lació dissenyada expressament per a aquestes condicions per a l'assecatge de sòlids termolàbils. Les pressions absolutes de treball s'han variat des de 4 kPa fins a 101,3 kPa a temperatura ambient. El sòlid fluïditzat ha estat sorra silícia de diàmetres 225, 300 i 475 μm. Per poder operar en flux turbulent s'han emprat dues instal·lacions en què s'ha treballat a pressió atmosfèrica i temperatura ambient. En la primera, de 9,5 cm de diàmetre, només s'han utilitzat les dades obtingudes amb sorra silícia d'un diàmetre d'entre 250 i 400 μm, i en la segona, de 5 cm de diàmetre, han estat les de sorra silícia de 100 μm i catalitzador de craqueig catalític (FCC) de 60 μm.

La mesura de les fluctuacions de pressió es realitza mitjançant un transductor de pressió diferencial, que mesura la diferència de pressió entre dues posicions del llit. El transductor genera un senyal de voltatge proporcional al valor de la pressió diferencial en el tram del llit. Aquest senyal es digitalitza en un convertidor analògic-digital (A/D) de 16 bits, i les dades, en forma de sèrie temporal, són adquirides i emmagatzemades per ser posteriorment tractades i analitzades amb MATLAB versió 5.3. Les freqüències significatives en llits fluïditzats estan per sota dels 10 Hz i una freqüència de mostreig de 100 Hz és suficient. En tots els casos s'han utilitzat com a mínim 4.096 dades.

ANÀLISI DE LES FLUCTUACIONS

L'anàlisi de les fluctuacions es pot fer en tres dominis diferents: el temporal, el de freqüències i el de l'espai d'estat (anàlisi no lineal). En aquest treball es tractaran els dos primers mètodes utilitzant conegudes eines estadístiques i procediments típics per a l'anàlisi lineal de senyals temporals.

Anàlisi en el domini temporal

L'anàlisi més senzilla consisteix a representar la seqüència de les dades temporals de pressió respecte del temps, que dona una idea de la complexitat del flux (figura 2). L'amplitud del senyal dona més informació, ja que està relacionada amb la grandària de les bombolles. Aquesta pot ser definida per la desviació estàndard, σ_p , (moment estadístic de segon ordre):

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta P_i - \overline{\Delta P})^2} \tag{2}$$

on N és el nombre de dades, ΔP_i el valor de la pèrdua de càrrega i $\overline{\Delta P}$ la seva mitjana aritmètica. La desviació estàndard de la pèrdua de càrrega depèn linealment de la velocitat (Sawley i Davidson, 1975):

$$\sigma_p = A_i + B_i u \tag{3}$$

En l'instant de la fluïdització incipient la desviació estàndard és nul·la ($\sigma_p = 0$), ja que no es produeixen bombolles, origen de les fluctuacions. La regressió lineal de σ_p de les dades experimentals respecte de la velocitat de fluïdització talla l'abscissa en la velocitat mínima de fluïdització (figura 3). Aquest és un mètode per a la determinació de la velocitat mínima de fluïdització.

La desviació estàndard de les fluctuacions s'ha considerat com un indicador de la qualitat de fluïdització. Valors elevats de la desviació estàndard són conseqüència de bombolles més grans, cosa que implica un major *bypass* del gas que no contacta amb el sòlid, i té una qualitat de fluïdització baixa. En canvi, per a valors més baixos de σ_p , la qualitat de fluïdització seria més alta. Però en realitat la qualitat de fluïdització és un concepte erràtic, ja que, per contra, una major desviació estàndard implica una major barreja de sòlids, que afavoreix la transferència de matèria i la transmissió de calor.

S'ha observat, mitjançant aquesta anàlisi, que no hi ha un canvi significatiu en la qualitat de fluïdització en augmentar la temperatura per a partícules del tipus A i B (Rapagná et al., 1994). En canvi, sí que s'observa un augment de la qualitat en augmentar la pressió de treball per a partícules del tipus B i D (Llop i Arnaldos, 1999), ja que, com s'observa a la figura 4, la desviació estàndard disminueix en augmentar la pressió. Aquest comportament s'explicaria pel fet que, en operar a pressions elevades, disminueix la grandària de les bombolles, però augmenten en nombre (Cai et al., 1994), i disminueix la quantitat de gas que escapa al contacte amb el sòlid. Tot i la relació entre σ_p i qualitat de fluïdització, s'ha d'anar amb compte en la seva interpretació, ja que es pot donar el cas que, disminuint la desviació, també disminueixi la qualitat de fluïdització, com van observar Llop i Jand (2003) en treballar a pressions reduïdes a causa de l'evolució a flux de pistó.

La desviació estàndard augmenta amb la velocitat de fluïdització, però per a velocitats elevades l'amplitud de les fluctuacions experimenta un màxim, després disminueix i a continuació es manté constant. Aquest màxim correspon a la velocitat a la qual el flux passa de règim de bombolleig al de transició al turbulent (u_c). Quan les fluctuacions arriben a un valor constant s'inicia el flux turbulent (u_k). A la figura 5 es pot apreciar aquesta evolució per a partícules de sorra silícia. Aquesta disminució de σ_p en la transició es pot explicar pel fet que, en passar a flux turbulent, desapareix la fase de bombolles i apareix una fase diluïda en sòlids molt més homogènia que l'anterior. Aquest mètode ha estat utilitzat per molts investigadors per determinar la velocitat a la qual es produeix aquesta transició, ja que les aplicacions en llit circulant tenen un notable interès (Perales et al.; 1991; Chehbouni et al., 1994).

La funció d'autocorrelació permet estimar el temps de retard entre successos similars en el llit. En el cas del flux de pistó, correspon al pas del front de gas (pistó) i per un llit de bombolleig permet determinar el període d'oscil·lació del llit:

$$C_{xx}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\Delta P(t) - \overline{\Delta P})(\Delta P(t+k) - \overline{\Delta P}), k = 0, \dots, N \quad (4)$$

La característica periòdica dels llits fluïditzats és prou evident, com s'aprecia a la figura 2. La causa és el pas periòdic de les bombolles en travessar el llit. Aquesta periodicitat queda reflectida en la funció d'autocorrelació. El màxim d'aquesta funció correspon al retard de temps o període del fenomen. A la figura 6 s'observa l'evolució de les funcions d'autocorrelació per a una mateixa velocitat relativa del gas en passar de flux de bombolleig a flux de pistó (*slugging*).

Com es pot observar per al cas de flux de bombolleig, la funció té un component periòdic molt feble i un període petit. En canvi, per al flux de pistó el component periòdic és molt més acusat i té un període més llarg (menor freqüència). Aquesta diferència es pot explicar pel fet que en el flux de bombolleig hi ha moltes bombolles i es produeix una barreja molt intensa en el llit; en canvi, en el flux de pistó es produeix el pas alternatiu de la fase gas i la d'emulsió o densa. Aquesta alternança dona lloc a un component fortament periòdic típic d'aquest règim de flux (Clarck et al., 1991; Llop i Jand, 2003).

Anàlisi en el domini de freqüències

La densitat espectral de potència (P_{xx}) dona informació de com es distribueix l'energia de fluïdització en el llit. Es calcula mitjançant la transformada de Fourier (FFT) de la sèrie temporal de càrrega de càrrega:

$$P_{xx}(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N \Delta P_i e(-j2\pi fn) \right|^2 \tag{5}$$

En règim de bombolleig, la freqüència dominant en l'espectre de potència correspon a la freqüència amb què passen les bombolles a través del llit. En el cas del règim de flux de pistó, correspon a la freqüència amb què passa el pistó a través del llit.

L'evolució dels espectres de potència en passar de flux de bombolleig a flux de pistó es pot observar a la figura 7. Les dades s'han obtingut en un llit de 76 cm de diàmetre, una altura de 13 cm i a pressions d'entre 4 kPa (flux de pistó) (Llop i Jand, 2003) i 101,3 kPa (flux de bombolleig). Per al flux de bombolleig s'observa una banda ampla sense una freqüència clarament dominant perquè l'energia de fluïdització es distribueix en una àmplia banda de freqüències. Aquest fet és degut a l'existència de moltes bombolles que travessen el llit amb un moviment intens i una bona barreja entre les fases d'emulsió i de bombolles. Els valors de les freqüències oscil·len entre 4 Hz i 6 Hz. Quan el llit evoluciona al flux de pistó, les bombolles disminueixen en nombre, però augmenten en grandària. Com es pot apreciar a la figura 7, la banda és molt estreta, amb un pic d'un valor molt alt de l'espectre de potència, cosa que indica que l'energia de fluïdització es concentra en una única freqüència. La freqüència dominant és molt més baixa, cosa que indica un major període de pas de la fase gas (pistó).

En passar de règim de bombolleig a règim turbulent hi ha un canvi en la distribució

de les freqüències en l'espectre, i la distribució pel règim turbulent és molt més ampla (Svensson et al., 1996). La diferència entre els espectres de potència pel flux de bombolleig i el flux turbulent es pot apreciar a la figura 8 (a) i (b), respectivament. Pel flux de bombolleig, com ja s'ha vist anteriorment, apareix una àmplia banda amb freqüències dominants. En aquest cas apareix un màxim del voltant de 7 Hz. Les fluctuacions de pressió estan influenciades per un gran nombre de bombolles en el llit. Per les condicions de flux turbulent no hi ha cap freqüència dominant i la major energia està localitzada al voltant de 6 Hz. En aquest règim de flux no hi ha bombolles i la distribució del sòlid és uniforme en temps i espai en el llit. Aquesta característica es reflecteix en l'espectre de la figura 8 (b).

CONCLUSIONS

Les fluctuacions de pressió en els llits fluïditzats contenen una informació valuosa que, convenientment tractada i interpretada, es pot utilitzar per a l'estudi hidrodinàmic dels llits fluïditzats gas-sòlid. La desviació estàndard de les fluctuacions de pressió pot ser una mesura indirecta de la qualitat de la fluïdització. La representació de la desviació estàndard de les fluctuacions respecte de la velocitat permet determinar la velocitat mínima de fluïdització (u_{mf}). El màxim de la desviació estàndard, a velocitats més altes, correspon a la velocitat d'inici del pas del règim de bombolleig a la transició al flux turbulent (u_c), i quan aquest valor esdevé constant, correspon a la velocitat de pas a flux turbulent (u_k). La funció d'autocorrelació dona informació de la periodicitat del sistema i permet determinar la freqüència de pas de les bombolles.

L'anàlisi en el domini de freqüències dona informació de la distribució de l'energia de fluïdització en el llit. Pel flux de pistó aquesta es concentra en una única freqüència, mentre que pel flux de bombolleig es distribueix en diverses freqüències a causa de les nombroses bombolles existents en el llit. En canvi, en el cas del flux turbulent, com que la distribució de les dues fases és uniforme en tot el llit, no s'aprecia cap freqüència dominant. Tot i les limitacions dels mètodes, ja que no permeten quantificar paràmetres com la grandària de les bombolles, per exemple, l'anàlisi de les fluctuacions de pressió fa possible extreure una considerable informació en l'estudi del comportament dels llits fluïditzats.

Bibliografia

- Cai, P., Schiavetti, M., De Mchele, G., Grazzini, G. C., i Miccio, M. 1994. Quantitative estimation of bubble size in PFBC, Powder Technol. 80, 99-109.
- Chehbouni, A., Chaouki, J., Guy, C. i Klvana, D. 1994. Characterization of the flow transition between bubbling and turbulent fluidization. Ind. Eng. Chem. Res. 33, 1889-1896.
- Clark, N. N., McKenzie Jr. E. A., Gautam, M. 1991. Differential pressure measurements in a slugging fluidized bed. Powder Technol. 67, 187-199.

- Ergun, S. 1952. Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog.* 48, 89-95.
- Fan, L. T., Ho, T. i Walawender, W. P. 1983. Measurements of the rise velocities of bubbles, slugs and pressure waves in a gas-solid fluidized bed using pressure fluctuation signals *AIChE J.* 29, 33-39.
- Geldart, D. 1973. Types of gas fluidization. *Powder Technol.* 7, 285-292.
- Johnsson, F., Zijerveld, R. C., Schouten, J. C., van der Bleek, C. M., Leckner, B. 2000. Characterization of fluidization regimes by time series analysis of pressure fluctuations. *Int. J. Multiphase Flow* 26, 663-715.
- Kunii, D. i Levenspiel, O. 1991. *Fluidization Engineering*. Butterworth-Heinemann. Boston.
- Llauró, F. X. i Llop, M. F., 2006. Characterization and classification of fluidization regimes by non-linear analysis of pressure fluctuations, *Int. J. Multiphase Flow* 32, 1397-1404.
- Llop, M. F. i Arnaldos, J. 1998. Influencia de la presión sobre las fluctuaciones de pérdida de carga en lechos sólido-gas. *Información Tecnológica.* 110, 51-58.
- Llop, M. F. i Jand, N., 2003. The influence of low pressure operation on fluidization quality, *Chem. Eng. J.* 95, 25-31.
- Perales, J. F., Coll, T., Llop, M. F., Puigjaner, L., Arnaldos, J. I., Casal, J. 1991. On the transition from bubbling to fast fluidization regimes. A: Basu, P., Horio, M. I., Hasatani, M. (ed.) *Circulating Fluidized Bed Technology III*. Pergamon Press. Oxford, pàg. 73-78.
- Puncochár, M., Drahos, J., Cermák, J. i Selucky, K. 1985. Evaluation of minimum fluidizing velocity in gas fluidized bed from pressure fluctuations. *Chem. Eng. Commun.* 35, 81-87.
- Rapagná, S., Foscolo, P. U. i Gibilaro, L. G. 1994. The influence of temperature on the quality of gas fluidization, *Int. J. Multiphase Flow.* 20, 305-313.
- Svensson, A, Johnsson, F. i Leckner, B. 1996. Bottom bed regimes in a circulating fluidized bed boiler. *Int. J. Multiphase Flow.* 22, 1187-1204.
- Zijerveld R. C., Johnsson, F., Marzocchella, A., Schouten, J. C., Van den Bleek, C. M. 1998. Fluidization regimes and transition from fixed bed to dilute transport flow. *Powder Technol.* 95, 185-204.

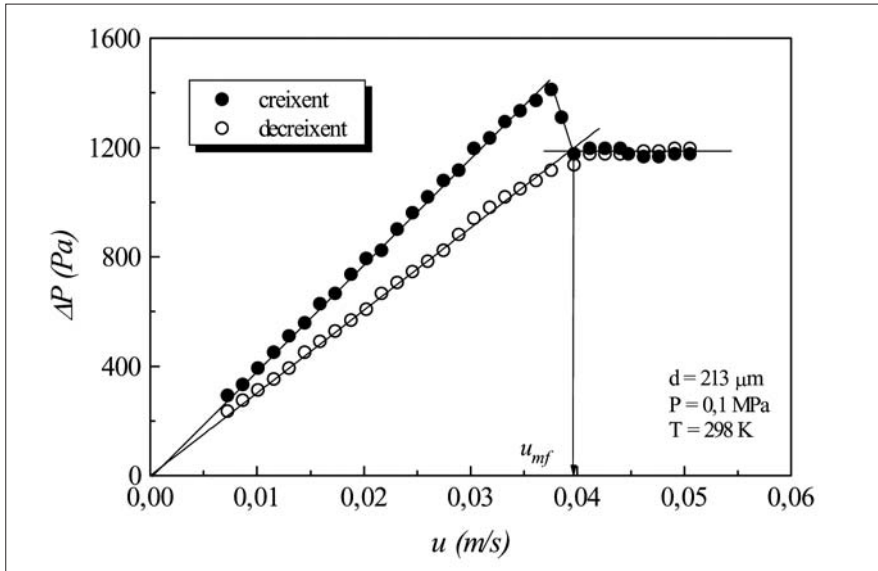


Figura 1. Representació de la pèrdua de càrrega en funció de la velocitat del gas per a partícules de sorra silícia del tipus B.

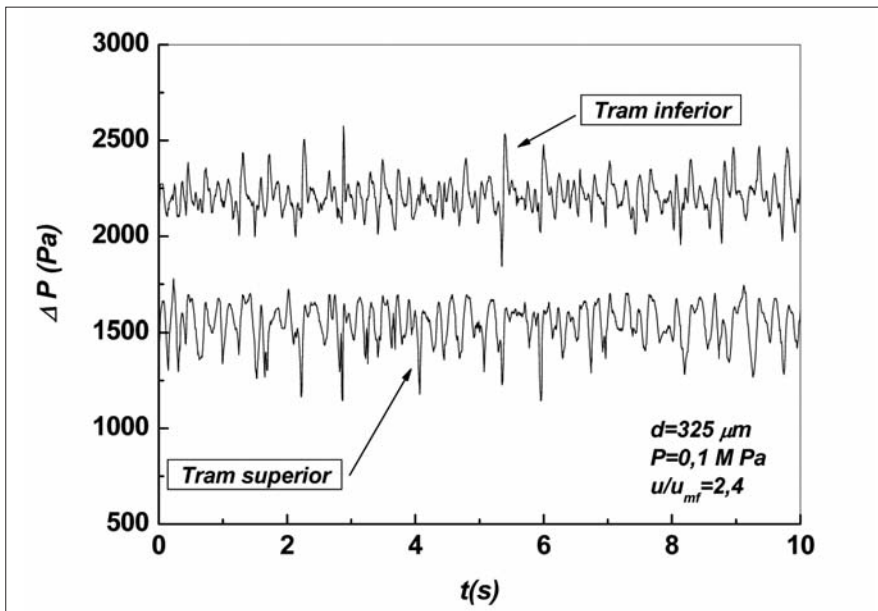
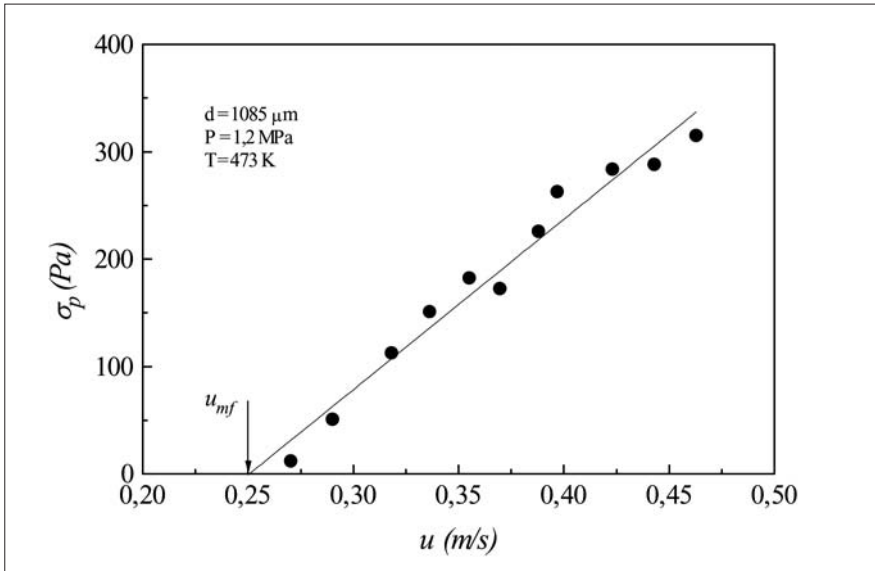


Figura 2. Fluctuacions de la pèrdua de càrrega en dos trams d'un llit de partícules de sorra

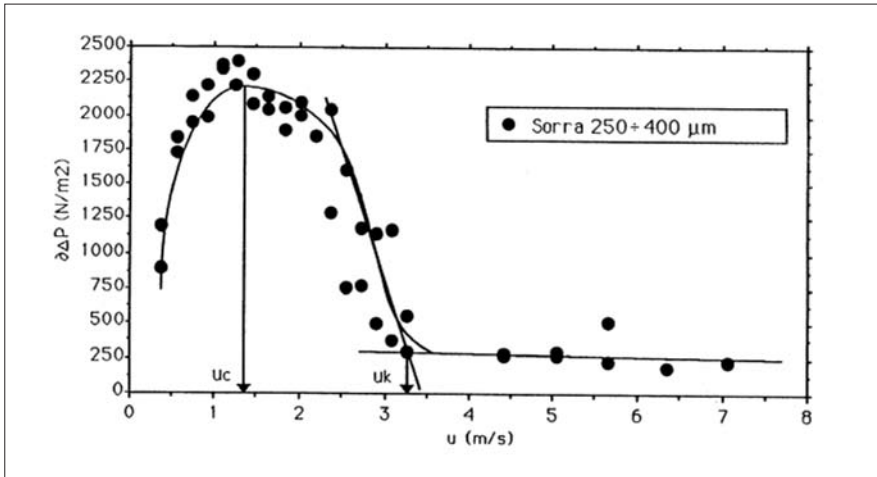


silícia.

Figura 3. Representació de la desviació estàndard de les fluctuacions de la pèrdua de càrrega respecte de la velocitat del gas per determinar la velocitat mínima de fluïdització (partícules de sorra silícia).



Figura 4. Variació de la desviació estàndard de les fluctuacions de pressió per diverses pres-



sions de treball (partícules de sorra sílicia).

Figura 5. Fluctuacions de la pèrdua de càrrega respecte de la velocitat del gas en la transició de flux de bombolleig a flux turbulent.

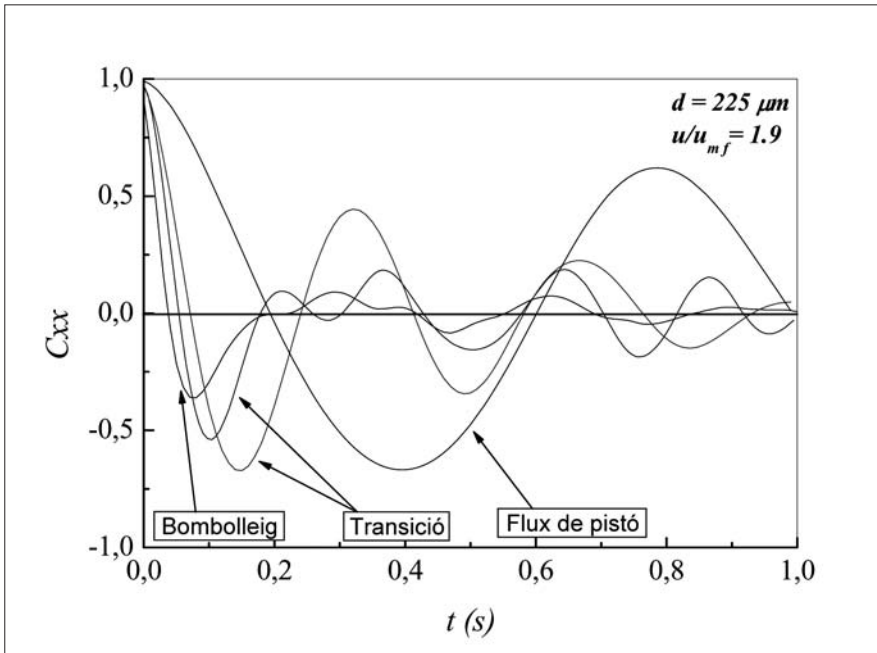


Figura 6. Funció d'autocorrelació de les fluctuacions de pressió de flux de bombolleig a flux de pistó per a partícules de sorra sílicia de 225 μm diàmetre.

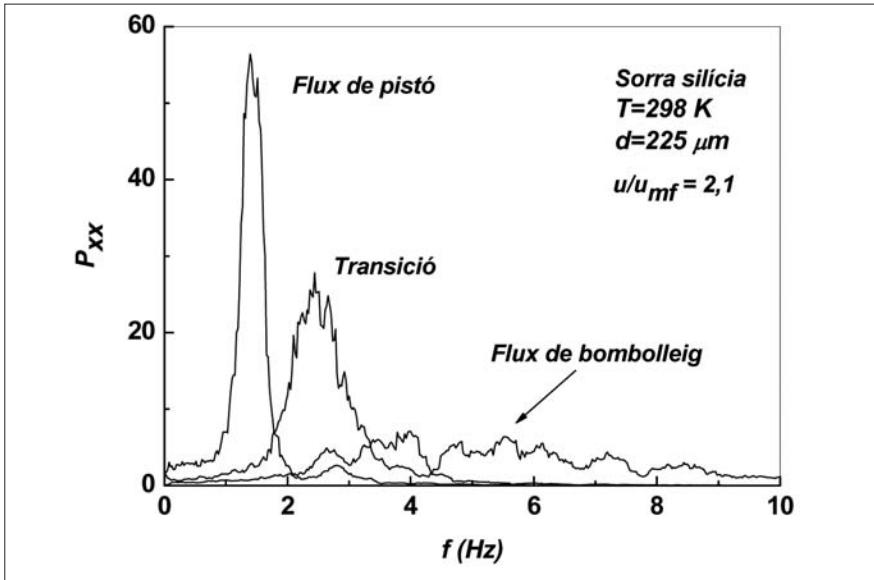
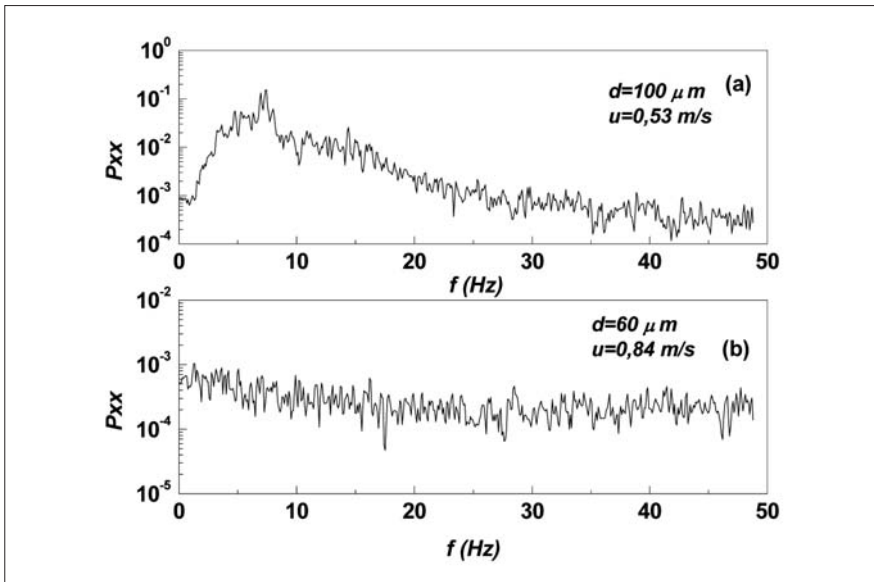


Figura 7. Espectres de potència per als règims de bombolleig i de flux de pistó per a



partícules de sorra sílicia de $225\ \mu\text{m}$ diàmetre (diàmetre de la columna de 7,6 cm).

Figura 8. Espectre de potència per als règims (a) de bombolleig, (b) de turbulent per a partícules de sorra sílica (diàmetre de la columna de 5 cm).

Equip	Dc (cm) ⁽¹⁾	L (m) ⁽²⁾	P	T (°C)
Gasificador	10	0,4	1-12 bar	20-600
Assecador al buit	7,6	0,6	4-101,3 kPa	20
Llit circulant I	9,5	3	atm	20
Llit circulant II	5	1,5	atm	20

⁽¹⁾ Dc, diàmetre del llit

⁽²⁾ L, altura de la columna

Taula I. *Característiques de les instal·lacions experimentals*