



## ANÁLISE DOS REGIMES DE ESCOAMENTO GÁS-SÓLIDO EM UM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

### **Luciano Vieira de Souza**

Aluno bolsista CNPq do Departamento de Engenharia Mecânica, EESC/USP

### **Paulo Seleglim Júnior**

Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Mecânica, EESC/USP

### **Josmar Davilson Pagliuso**

Prof. Dr. do Departamento de Hidráulica e Saneamento, EESC/USP

Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos

Escola de Engenharia de São Carlos, USP

Av. Dr. Carlos Botelho, 1465

CEP 13560-970 – São Carlos, SP

**Resumo.** *Reatores de leito fluidizado estão se tornando cada vez mais frequentes nos processos de produção de energia e de produtos. Sabe-se que um leito fluidizado pode apresentar diferentes comportamentos fluidodinâmicos conforme determinadas condições de trabalho ou parâmetros de projeto são alterados. Este trabalho analisa a transformada de Gabor (plano tempo-frequência) como ferramenta de caracterização do comportamento hidrodinâmico do leito. Para isso, analisou-se sinais de pressão manométrica do leito no plano tempo-frequência. O leito fixo e os dois primeiros regimes de fluidização, bem como suas transições ( $U_{mf}$  e  $U_{mb}$ ), foram analisadas e caracterizadas naquele plano de estudo.*

**Palavras-chave:** Leito fluidizado, Regimes de fluidização, Transições, Análise tempo-frequência, Transformada de Gabor.

## 1. INTRODUÇÃO

O interesse em leitos fluidizados tem crescido muito nos últimos anos. Além de inúmeras aplicações práticas, reatores de leito fluidizado têm surgido como uma forte opção no processo de produção de energia. A possibilidade de aproveitar o carvão mineral brasileiro, considerado problemático devido ao seu alto teor de cinza e enxofre, para a produção de energia elétrica, tem levado muitos pesquisadores a estudar sua combustão em leito fluidizado. Em outros lugares do mundo, onde a regulamentação ambiental é até bem mais severa que no Brasil, reatores de leito fluidizado já são amplamente utilizados na combustão de carvão e de outros combustíveis poluentes.

Um leito de partículas sólidas se torna fluidizado quando o gás que o atravessa alcança uma velocidade superficial tal que provoca a suspensão de todas as partículas. Nesse ponto, a queda de pressão através do leito iguala-se ao peso do leito por unidade de área (GELDART,

1986). Esse é o ponto de fluidização mínima e a velocidade superficial do gás correspondente é denominada de velocidade de fluidização mínima ( $U_{mf}$ ).

A partir de  $U_{mf}$ , o comportamento hidrodinâmico dos leitos fluidizados é caracterizado em regimes de fluidização. À medida que se aumenta gradualmente a velocidade do gás, os regimes tendem a ocorrer de forma ordenada como: fluidização homogênea, fluidização borbulhante, fluidização turbulenta e fluidização rápida. Caso o fluxo de gás continue subindo, chega-se num ponto onde não há mais acúmulo de sólidos no fundo do reator. A partir desse ponto não se tem mais uma condição de leito fluidizado, mas sim de transporte pneumático.

O regime de fluidização homogênea é semelhante ao comportamento observado na fluidização de partículas sólidas com líquido, onde se observa uma expansão gradual do leito com o aumento da velocidade do fluido e uma dispersão uniforme das partículas, com pouca interação entre elas (KWAUK & LI, 1996). Na fluidização gás/sólido, a expansão homogênea e contínua do leito ocorre dentro de uma faixa de velocidades, ou seja, se inicia em  $U_{mf}$  e termina em  $U_{mb}$  (velocidade de borbulhamento mínimo), ponto onde começa a surgir as primeiras bolhas na superfície do leito. O regime de fluidização homogênea é característico de leitos de pequenas partículas. Para leitos pertencentes ao grupo A de Geldart, por exemplo,

tem-se  $\frac{U_{mb}}{U_{mf}} > 1$ . À medida que o tamanho de partícula aumenta,  $U_{mb}$  se aproxima de  $U_{mf}$ ,

ou seja, o intervalo de velocidade que caracteriza o regime homogêneo diminui. Para partículas do grupo D de Geldart (incluindo os sólidos de maiores tamanho e/ou densidade do grupo B),  $U_{mb}$  é praticamente igual a  $U_{mf}$ , ou seja, as bolhas na superfície do leito aparecem logo no início da fluidização ( $U_{mb}=U_{mf}$ ).

O comportamento dos leitos fluidizados em regime de fluidização borbulhante é dominado pela subida de vazios de gás, usualmente chamados de bolhas. Nesse regime de fluidização pode-se distinguir duas fases no leito: a fase bolha (ou fase vazio), que compreende os vazios de gás que não contém virtualmente nenhuma partícula do leito, e a fase particulada (também conhecida como fase densa ou emulsão), que consiste das partículas sólidas fluidizadas pelo gás intersticial. Como sugerido por CLIFT (1986), um leito fluidizado em regime de fluidização borbulhante pode ser definido como um leito em que a fase bolha é dispersa e a fase particulada é contínua. As bolhas subindo através do leito provocam o movimento da fase particulada que é a principal causa da mistura dos sólidos nos leitos borbulhantes.

Quando em um leito fluidizado borbulhante a velocidade do gás é gradualmente aumentada, a turbulência originada pelas bolhas também aumenta. Esta turbulência influencia diretamente as oscilações de queda de pressão. A transição para a fluidização turbulenta é caracterizada pela velocidade superficial  $U_c$  em que a amplitude das flutuações de queda de pressão alcança um máximo, e que corresponde ao desarranjo do padrão borbulhante devido à rápida coalescência e divisão das bolhas a partir desse ponto (LIM, ZHU e GRACE, 1995).

Acima de  $U_c$ , quando as maiores bolhas começam a quebrar, as flutuações de pressão diminuem rapidamente com o aumento da velocidade superficial do gás ( $U_o$ ). Esse comportamento é representativo do regime de fluidização turbulenta onde a competição entre o processo de formação e o processo de quebra das grandes bolhas continua presente até o completo desaparecimento das bolhas e o começo da fluidização rápida (BAI et al., 1996).

A transição da fluidização turbulenta para a fluidização rápida corresponde a uma velocidade superficial crítica do gás,  $U_{tr}$ , que corresponde ao começo de significativo arraste de partículas para fora do leito (LIM, ZHU e GRACE, 1995). No regime de fluidização rápida, devido ao desaparecimento das bolhas, a estrutura de fluidização torna-se mais homogênea quando comparada ao regime turbulento. Além disso, devido a diminuição na formação de aglomerados de sólidos, as flutuações de pressão tornam-se menores e diminuem

ainda mais com o aumento de  $U_o$  (considerando o fluxo mássico de sólidos  $G_s$  constante). No entanto, ainda existe uma significativa heterogeneidade no leito, devido ao movimento dos aglomerados de sólidos que se encontram suspensos pelo fluido e movimentam-se de forma aleatória dentro do reator (ARNALDOS & CASAL, 1996). Mesmo com velocidade elevada do fluido, partículas ainda se movem para baixo conservando um pequeno leito de sólidos no fundo do reator.

A fluidização rápida corresponde ao último (tomando como referência a velocidade superficial do gás) regime hidrodinâmico possível de ocorrer sob condição de leito fluidizado. Com contínuo aumento da velocidade do gás (considerando  $G_s$  constante), alcança-se um ponto onde não há mais acúmulo de sólidos no fundo do reator. A velocidade  $U_{CA}$  representa a transição entre leito fluidizado e transporte pneumático.

HERVIEU & SELEGHIM (1998) e SELEGHIM, HERVIEU e SANTOS (1998) caracterizaram com sucesso os diferentes regimes de escoamento bifásico horizontal ar/água e suas respectivas transições, utilizando o método de análise dos sinais nos planos temporal, frequencial e tempo-frequência. Utilizaram no estudo uma sonda não-intrusiva de condutividade elétrica. Neste trabalho procura-se fazer um estudo similar, porém voltado para o processo bifásico gás/sólido de um leito fluidizado, analisando-se os sinais provenientes de uma sonda de pressão inserida dentro do leito. Por ora, apenas os dois primeiros regimes de fluidização foram investigados, juntamente com suas transições ( $U_{mf}$  e  $U_{mb}$ ). A transformada de Gabor foi a ferramenta matemática utilizada para fazer a junção tempo-frequência.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

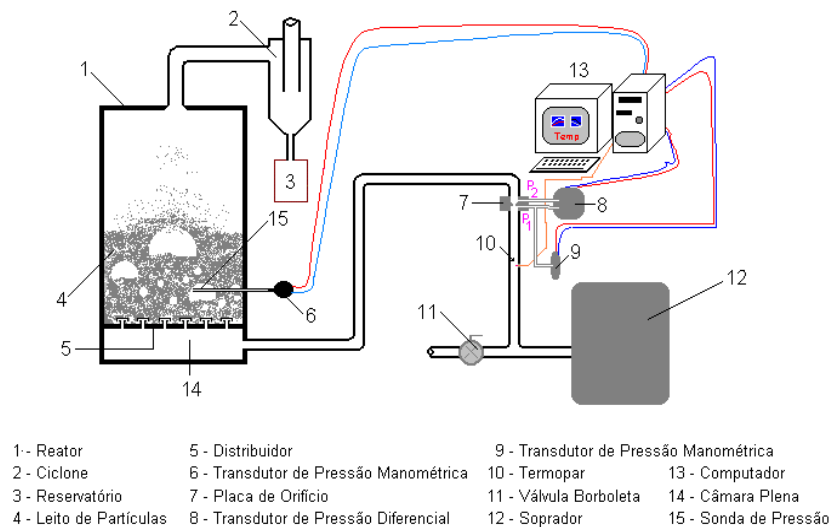


Figura 1 – Esquema do circuito experimental de testes.

O circuito experimental utilizado nesse trabalho está mostrado esquematicamente na Fig. 1. O reator é feito de aço com seção transversal quadrada de 0,5 x 0,5 m e altura de 1,80 m. A placa distribuidora é constituída de injetores tipo torre. O soprador de ar é capaz de fornecer uma vazão de até 20 m<sup>3</sup>/h com uma pressão de aspiração de 4000 mmH<sub>2</sub>O (39,22 KPa). O controle da vazão de ar enviada ao reator é feita manualmente através de uma válvula borboleta. A vazão do ar foi medida através de uma placa de orifício construída segundo a norma ASME (1959) e suas pressões são lidas por dois transdutores de pressão. Um termopar, posicionado na parede interna da tubulação, acompanhou a temperatura do ar para cálculo da densidade e da viscosidade necessárias para a correta determinação da vazão.

A sonda de pressão está posicionada próximo ao eixo central do reator, a uma altura de 175 mm a partir da base da placa do distribuidor (ver Fig. 2(a)). Essa sonda tem volume morto em torno de 8 cm<sup>3</sup> e está ligada a um transdutor de pressão manométrica da MOTOROLA ref. MPX2050GP (tempo de resposta de 1 ms). Os sinais provenientes dos três transdutores de pressão e do termopar foram registrados e analisados em um computador com auxílio da placa de aquisição (AT-MIO-16DE10) e software (LABVIEW) da National Instruments.

O sólido utilizado na composição do leito foi areia com 99% de quartzo e densidade de 2650 Kg/m<sup>3</sup>. Sua distribuição granulométrica, com diâmetro médio de partícula  $\bar{d}_p = 0,166\text{mm}$  calculado segundo KUNII & LEVENSPIEL (1991), pode ser visto na Fig. 2b, caracterizando um sólido do grupo B de Geldart. A altura do leito foi de 0,545 m (ver Fig. 2a) na condição estática.

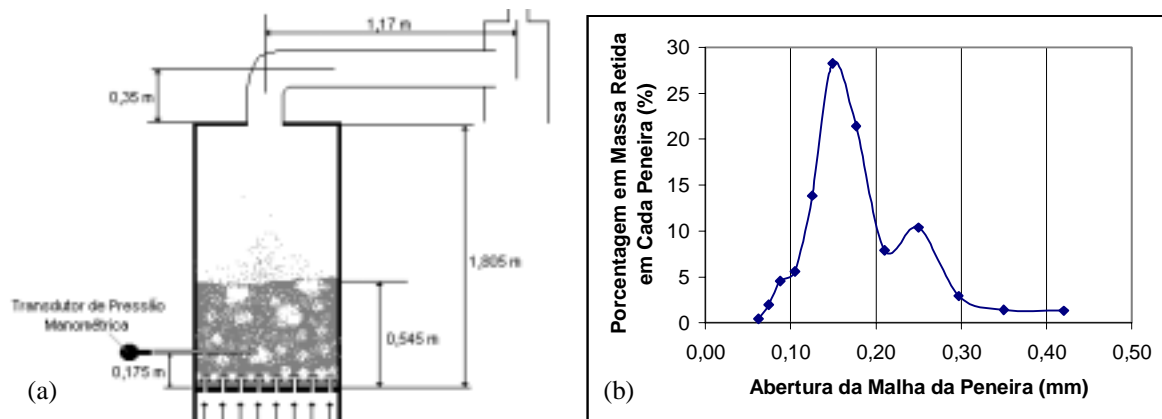


Figura 2 – (a) Esquema de posicionamento da sonda de pressão, alturas do leito (condição estática) e do reator e posicionamento do ciclone em relação ao eixo. (b) Distribuição de tamanho das partículas de areia do leito.

## 2.1. Análise dos sinais

A Análise de Sinais é o estudo e caracterização das propriedades básicas dos sinais. Um sinal é normalmente caracterizado apenas em função do tempo. Algumas vezes, no entanto, é vantajoso estudar o sinal numa representação diferente da temporal, ou seja, analisá-lo no plano das frequências. A transformada de Fourier de um sinal  $s(t)$  qualquer é dada como (COHEN, 1995):

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

onde  $j = \sqrt{-1}$ . A transformada de Fourier identifica e distingue as ondas senoidais de diferentes frequências (e suas respectivas amplitudes) que se combinam para formar o sinal. Logo,  $S(\omega)$  é o espectro de  $s(t)$ , ou seja, ela representa  $s(t)$  no domínio das frequências.

A energia por unidade de tempo (ou densidade de energia por unidade de tempo) de um sinal é geralmente dado por  $|s(t)|^2$ . Da mesma forma  $|S(\omega)|^2$  é definido como sendo a densidade de energia por unidade de frequência. A energia total do sinal é independente do método usado para calculá-lo. Assim:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |S(\omega)|^2 d\omega \quad (2)$$

O sinal (domínio do tempo) e o espectro (domínio da frequência) às vezes não são suficientes sozinhos para descrever a situação física devido a não descreverem completamente o que está acontecendo. Em particular, a partir do espectro sabe-se quais frequências estavam presentes no sinal, mas não quando elas existiram. É importante então que se faça uma análise tipo tempo-frequência.

O objetivo básico da análise tempo-frequência é descobrir uma função que descreva a densidade de energia de um sinal simultaneamente no tempo e na frequência, e que possa ser usada e manipulada da mesma maneira como qualquer densidade. De posse de tal distribuição (ou função), pode-se saber qual a fração de energia existente em uma determinada faixa temporal e frequencial, pode-se calcular a densidade de frequência em um tempo particular, pode-se determinar momentos global e local no plano tempo-frequência, dentre outros.

Para se avaliar as propriedades do sinal no tempo  $t$ , dá-se ênfase ao sinal naquele tempo e oculta-o em outros tempos. Isso é feito multiplicando o sinal por uma função janela  $h(t)$  para produzir um sinal modificado do tipo (COHEN, 1995):

$$s_t(\tau) = s(\tau).h(\tau - t) \quad (3)$$

O sinal modificado  $s_t(\tau)$  é uma função de dois tempos: o tempo fixado  $t$  (tempo desejado) e o tempo corrente  $\tau$ . A função janela  $h$  (também chamada função analisante) é a função escolhida para levar o sinal de forma inalterada em torno de  $t$  e de forma oculta para os tempos distantes do tempo de interesse.

Desde que o sinal modificado enfatiza o sinal em torno do tempo  $t$ , a transformada de Fourier de  $s_t(\tau)$  refletirá a distribuição de frequências em torno daquele tempo:

$$S_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} . s_t(\tau) d\tau = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} . s(\tau).h(\tau - t) d\tau \quad (4)$$

A densidade de energia espectral no tempo  $t$  é:

$$P_{SP}(t, \omega) = |S_t(\omega)|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} s(\tau)h(\tau - t) d\tau \right|^2 \quad (5)$$

Para cada tempo  $t$  diferente consegue-se um diferente espectro e a totalidade desses espectros é a distribuição tempo-frequência  $P_{SP}(t, \omega)$ . A transformada de Gabor, utilizada nesse trabalho para determinação de  $P_{SP}(t, \omega)$ , utiliza a função gaussiana como a função analisante  $h$ .

### 3. RESULTADOS

A Figura 3a apresenta a curva de pressão manométrica média no leito em função da velocidade superficial do ar. A Figura 3b apresenta o desvio padrão das flutuações do sinal (em volts) proveniente do transdutor de pressão manométrica do leito em função da velocidade  $U_o$  do ar. Cada ponto da Fig. 3a representa a média aritmética da pressão (durante 25 segundos) a um fluxo de gás constante. Cada ponto da Fig. 3b representa o desvio padrão

do sinal (8192 amostras, numa taxa de 80 Hz) para diferentes fluxos de gás mantidos constantes.

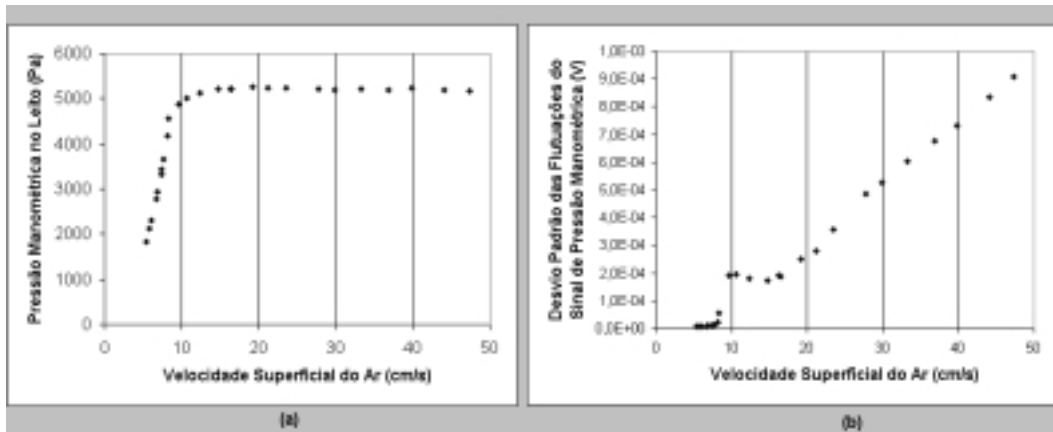


Figura 3 – (a) Variação da pressão manométrica média no leito em função da velocidade superficial do ar. (b) Desvio padrão das flutuações do sinal de pressão em função da velocidade superficial do ar.

Através da Fig. 3a pode-se determinar graficamente a velocidade  $U_{mf}$  de início de fluidização utilizando o método da interseção das duas retas (KUNII & LEVENSPIEL, 1991). Por esse método encontra-se  $U_{mf} \approx 9$  cm/s. A Figura 3b mostra três situações hidrodinâmicas diferentes: uma onde as flutuações do sinal de pressão são quase nulas; outra onde essas flutuações se mantêm aproximadamente constante; e a última, onde o desvio padrão das flutuações do sinal aumenta com a velocidade superficial do ar. Essas três situações hidrodinâmicas correspondem respectivamente a: leito fixo, leito fluidizado em regime homogêneo (fortemente provável) e leito fluidizado borbulhante. As velocidades de transição  $U_{mf}$  e  $U_{mb}$  são facilmente determinadas a partir da Fig. 3b:  $U_{mf} \approx 9$  cm/s e  $U_{mb} \approx 17$  cm/s.

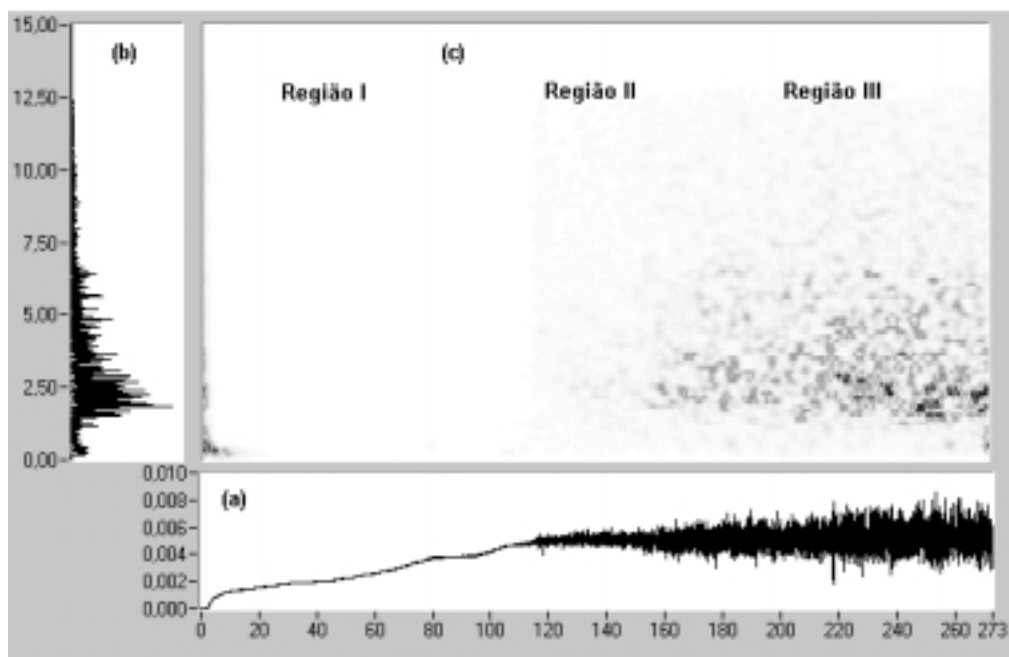


Figura 4 – Análise dos sinais de pressão do leito: (a) sinal (volts) versus tempo (s); (b) frequência (Hz), (c) frequência (Hz) versus tempo (s).

A Figura 4 é um diagrama representativo de análise tempo-frequência dos sinais de pressão do leito de um dos vários testes realizados no circuito experimental. Esses testes foram executados com a vazão de ar sendo continuamente aumentada através do fechamento, lento e contínuo, da válvula borboleta. Por ser uma operação manual, a velocidade superficial do ar não cresceu linearmente com o tempo durante a aquisição dos dados (equivalente a duração de um teste). A frequência de aquisição dos dados utilizada foi de 30 Hz, considerando 8192 amostras (o que produz um tempo de duração para cada teste de 273,1 s).

A Figura 4 apresenta três gráficos. O gráfico (a) representa a variação do sinal de pressão no tempo (volts versus segundo). O gráfico (b), disposto verticalmente, representa o espectro do sinal (a frequência em Hz está na vertical). O gráfico (c) representa a transformada de Gabor do sinal, ou seja, apresenta a energia do sinal em função da frequência (disposta no eixo vertical, em Hz) e do tempo (disposto no eixo horizontal, em segundos). Quanto mais escuro, mais forte é a densidade de energia.

Numa primeira análise da Fig. 4, observa-se três regiões diferentes presentes no plano tempo-frequência (gráfico c). A Região I (ver Fig. 4c) apresenta pouquíssima energia. A Região II apresenta a energia, numa quantidade maior que a região anterior, espalhada sobre uma ampla faixa frequencial (de 0 a 12 Hz). A Região III também apresenta a energia espalhada na faixa de 0 a 12 Hz porém, à medida que se avança no tempo, a energia aumenta e tende a ser cada vez mais intensa em torno das frequências principais (a frequência de 2,3 Hz é uma delas).

Para se estabelecer a ligação das três regiões visualizadas no plano tempo-frequência com as três situações hidrodinâmicas do leito, analisou-se o comportamento da energia do sinal e de quatro variáveis estatísticas (frequência média, desvio padrão das frequências, escondidade e kurtose) calculadas no plano tempo-frequência em função da velocidade superficial do ar. Cada ponto das Figuras 5 e 6 representa um teste a vazão de ar constante, onde os cálculos foram feitos no plano tempo-frequência resultante de cada vazão (taxa de 80 Hz para um total de 8192 amostras).

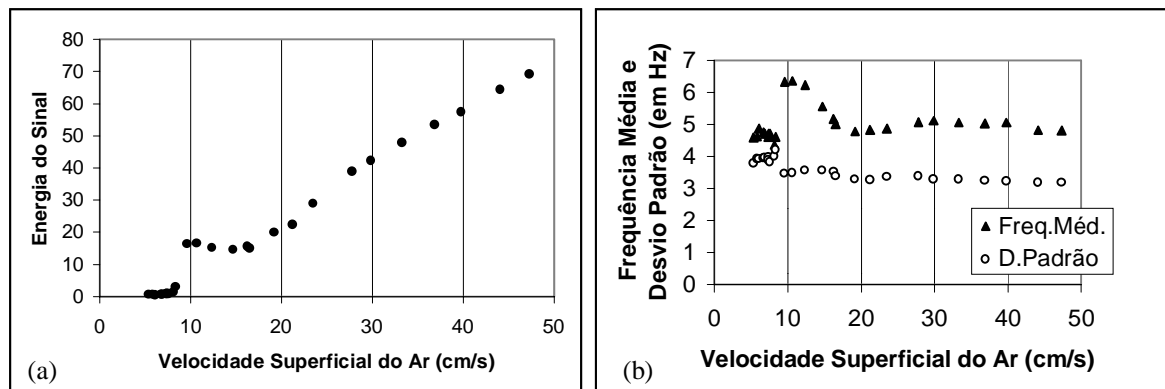


Figura 5 – (a) Energia do sinal em função da velocidade superficial do ar. (b) Frequência média e desvio padrão das frequências, calculadas no plano tempo-frequência, em função da velocidade superficial do ar.

Como se sabe, a energia de um sinal é a mesma, seja ela calculada no plano temporal, frequencial ou tempo-frequência. O comportamento da energia (dado pela Eq.(2)) em função de  $U_0$  é mostrado na Fig. 5a. A variação da frequência média ( $\bar{\omega}$ ) e do desvio padrão das frequências ( $\sigma_{\omega}$ ), ambos calculados no plano tempo-frequência, em função da velocidade

superficial do ar é apresentada na Fig. 5b. Essas duas variáveis estatísticas são definidas matematicamente como (SELEGHIM, 1996):

$$\bar{\omega} = \frac{1}{E} \int \int_{-\infty}^{+\infty} \omega |P_{SP}(t, \omega)|^2 dt d\omega \quad (6)$$

$$\sigma_{\omega} = \sqrt{\frac{1}{E} \int \int_{-\infty}^{+\infty} (\omega - \bar{\omega})^2 |P_{SP}(t, \omega)|^2 dt d\omega} \quad (7)$$

A Figura 6 apresenta o comportamento de dois momentos estatísticos da distribuição no plano tempo-frequência: a esconsidade e a kurtose. A esconsidade (também conhecida como terceiro momento) caracteriza o grau de assimetria de uma distribuição em torno da média ( $\bar{\omega}$ ). Um valor positivo da esconsidade significa que a distribuição se concentra mais à direita da frequência média  $\bar{\omega}$ . Uma esconsidade negativa significa que a distribuição se encontra mais concentrada à esquerda de  $\bar{\omega}$ . A esconsidade de uma distribuição no plano tempo-frequência é definida como (SELEGHIM, 1996):

$$\xi_{\omega} = \sqrt[3]{\frac{1}{E} \int \int_{-\infty}^{+\infty} (\omega - \bar{\omega})^3 |P_{SP}(t, \omega)|^2 dt d\omega} \quad (8)$$

A kurtose (ou quarto momento) mede o achatamento de uma distribuição em relação a uma distribuição normal (função gaussiana). Quanto maior o valor da kurtose, mais a distribuição se aproxima de uma função impulso. A kurtose de uma distribuição no plano tempo-frequência é definida como (SELEGHIM, 1996):

$$X_{\omega} = \sqrt[4]{\frac{1}{E} \int \int_{-\infty}^{+\infty} (\omega - \bar{\omega})^4 |P_{SP}(t, \omega)|^2 dt d\omega} \quad (9)$$

A Figura 6a apresenta o comportamento da kurtose  $X_{\omega}$  em função de  $U_0$ . A Figura 6b apresenta a esconsidade  $\xi_{\omega}$  variando em função da velocidade superficial do ar.

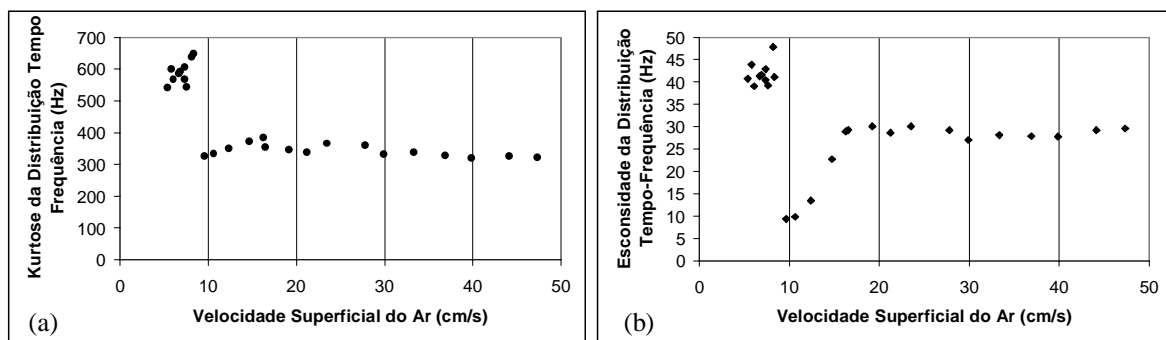


Figura 6 – (a) Kurtose da distribuição no plano tempo-frequência versus a velocidade  $U_0$  do ar. (b) Esconsidade em relação à frequência média da distribuição no plano tempo-frequência versus a velocidade  $U_0$  do ar.



O gráfico da energia (Fig. 5a) tem um comportamento semelhante ao do desvio padrão do sinal (Fig. 3b). Para  $U_o < 9$  cm/s, a energia é mínima (próxima ao zero). Para  $9 < U_o < 17$  cm/s, a energia se mantém estabilizada em torno de 15,5. Para  $U_o > 17$  cm/s, a energia cresce rapidamente com a velocidade superficial do ar. Aqui verifica-se que as três fases da energia estão associadas as três situações hidrodinâmicas do leito, ou seja: leito fixo, leito fluidizado em regime homogêneo e leito fluidizado borbulhante.

A frequência média  $\bar{\omega}$  (ver Fig. 5b) se localiza entre 4 e 5 Hz em situação de leito fixo ( $0 < U_o < 9$  cm/s). O desvio padrão  $\sigma_\omega$  nessa faixa de velocidades se encontra próxima a 4 Hz. Quando o leito fluidiza,  $\bar{\omega}$  sobe para 6,3 Hz e  $\sigma_\omega$  cai para 3,5 Hz. Durante o regime de fluidização homogênea, à medida que se aumenta gradualmente a velocidade do ar, a frequência média diminui com  $U_o$  e o desvio padrão se mantém próximo de 3,5 Hz. Quando  $U_o$  atinge 17 cm/s,  $\bar{\omega}$  se estabiliza em torno de 5 Hz e  $\sigma_\omega$  segue diminuindo muito lentamente com o fluxo de ar (ver Fig. 5b).

O gráfico da kurtose  $X_\omega$  versus a velocidade superficial do ar define claramente o início da fluidização (Fig. 6a). A kurtose mostra que o leito fixo produz uma distribuição no plano tempo-frequência bem mais aguda que a distribuição produzida quando o leito se encontra fluidizado. Pelo menos nos dois primeiros regimes de um leito fluidizado, a kurtose mostrou se estabilizar dentro de um intervalo com a velocidade  $U_o$  aumentando.

O comportamento da esconsidade  $\xi_\omega$  (Fig. 6b) foi bem mais claro que a kurtose na definição das duas transições. Em leito fixo, a distribuição tempo-frequência se mostra altamente assimétrico em relação a  $\bar{\omega}$ . Quando o leito fluidiza ( $U_o = U_{mf}$ ), a esconsidade se torna mínima. Para  $9 < U_o < 17$  cm/s, em regime de fluidização homogênea, a esconsidade aumenta com  $U_o$ . No regime de fluidização borbulhante, o valor da esconsidade se mantém estabilizado em torno de  $\xi_\omega = 29$  Hz.

Da análise das Figuras 5 e 6 conclui-se que as três regiões da Fig. 4c estão associadas as três situações hidrodinâmicas do leito, ou seja: leito fixo, leito fluidizado em regime homogêneo e leito fluidizado borbulhante, respectivamente.

#### 4. CONCLUSÕES

O sinal de pressão e o seu desvio padrão variando com a velocidade (Fig. 3) mostram que o leito pode apresentar três situações de comportamento hidrodinâmico: leito fixo, leito fluidizado em regime homogêneo e leito fluidizado borbulhante. Tudo leva a crer que a segunda situação hidrodinâmica seja o leito fluidizado em regime homogêneo devido: estar entre o leito fixo e o leito borbulhante; o tamanho médio de partícula do leito  $\bar{d}_p$  ser pequeno (próximo de ser enquadrado no grupo A de Geldart); e o desvio padrão do sinal permanecer equilibrado em todo um intervalo de velocidades (sugerindo não haver passagem de bolhas).

A análise dos sinais de pressão no plano tempo-frequência (transformada de Gabor do sinal) mostrou-se de grande potencial para a caracterização dos regimes e suas transições. Ficou provado, através da análise das Figura 5 e 6, que as três regiões visualizadas no plano tempo-frequência (Fig. 4c) correspondem as três situações hidrodinâmicas do leito citadas acima.

Dos dois regimes de fluidização analisados, a análise tempo-frequência mostrou que:

- No provável regime de fluidização homogênea, a energia do sinal se mantém constante. A frequência média  $\bar{\omega}$  é elevada no início da fluidização ( $U_o = U_{mf}$ ) porém, à medida que a velocidade aumenta, ela diminui até a frequência média de borbulhamento.
- No regime de fluidização borbulhante, a energia aumenta rapidamente com a velocidade. A frequência média  $\bar{\omega}$  permanece de certa forma estabilizado com o

aumento da velocidade  $U_0$ , caracterizando, provavelmente, uma frequência média de borbulhamento.

### ***Agradecimentos***

Ao CNPq, pela bolsa de mestrado e pelo auxílio à pesquisa; à Mineração Jundu, pela areia doada a esse trabalho; e ao Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos da EESC/USP.

### **REFERÊNCIAS**

- AMERICAN SOCIETY FOR MECHANICAL ENGINEERING (1959). Fluid meters: their theory and application. 15.ed. New York. (Report of ASME Research Committee on Fluid Meters).
- ARNALDOS, JOSEP; CASAL, JOAQUIM (1996). Prediction of transition velocities and hydrodynamical regimes in fluidized beds. Powder Technology, vol. 86, pp. 285-298.
- BAI, D.; SHIBUYA, E.; NAKAGAWA, N.; KATO, K. (1996). Characterization of gas fluidization regimes using pressure fluctuations. Powder Technology, vol. 87, pp. 105-111.
- CLIFT, H. (1986). Hydrodynamics of bubbling fluidized beds. IN: GELDART, D. (1986). Gas fluidization technology, 1.ed., New York, John Willey & Sons, Chapter 4, pp. 53-95.
- COHEN, LEON (1995). Time-frequency analysis. New Jersey, Prentice Hall.
- GELDART, D. (1986). Gas fluidization technology. 1.ed., New York, John Willey & Sons. Chapter 2 – Single particles, fixed and quiescent beds.
- HERVIEU, ERIC; SELEGHIM, PAULO Jr. (1998). An objective indicator for two-phase flow pattern transition. Nuclear Engineering and Design, vol. 184, pp.421-435.
- KUNII, DAIZO; LEVENSPIEL, OCTAVE (1991). Fluidization engineering. 2.ed., Boston, Butterworth-Heinemann. Chapter 3 – Fluidization and Mapping of regimes.
- KWAUK, M.; LI, J. (1996). Fluidization regimes. Powder Technology, vol. 87, pp. 193-202.
- LIM, K. S.; ZHU, J. X.; GRACE, J. R. (1995). Hydrodynamics of gas-solid fluidization. International Journal of Multiphase Flow, vol. 21, pp. 141-193.
- SELEGHIM, PAULO Jr. (1996). Caracterisation des changements de configuration d'un écoulement diphasique horizontal par l'application de methodes d'analyse temps-frequence. Grenoble, France. THESE. Docteur De L'Institut National Polytechnique De Grenoble.
- SELEGHIM, PAULO Jr.; HERVIEU, ERIC; SANTOS, ANTONIO MOREIRA (1998). Time frequency characterisation of two-phase horizontal air-water flow regimes. Journal of the Brazilian Society Mechanical Sciences (RBCM), vol. 20, n. 1, pp. 39-50.

### **GAS-SOLID FLOW ANALYSIS ON A BUBBLING FLUIDIZED BED REACTOR**

**Abstract.** *Fluidized bed reactors are becoming more and more utilised for energy production and other applications. A fluidized bed may have different behaviours according to its operational and design parameters. This work uses the Gabor transform on the time-frequency plane as a tool for characterisation of the hydrodynamic behaviour of the bed. In order to accomplish this, a pressure signal obtained from an intrusive probe was analysed in the time-frequency plane. The fixed bed as well as the two first fluidization regimes and their corresponding transitions were analysed and characterised on that plane.*

**Key-words:** Fluidized beds, Flow regimes, Transitions, Time-frequency analysis, Gabor transform.