

## Análise dinâmica das flutuações de pressão na válvula *loop-seal* de um leito fluidizado circulante

## Dynamics analysis of the pressure fluctuations in the *loop-seal* valve of a circulating fluidized bed

### RESUMO

Leitos fluidizados circulantes (LFC) são equipamentos amplamente utilizados no craqueamento catalítico fluido e na combustão de combustíveis sólidos para geração de energia térmica e elétrica. A fim de garantir a operação adequada e eficiente desses equipamentos, torna-se essencial a caracterização e o controle fluidodinâmico do escoamento gás-sólido no seu interior, o que pode ser realizado mediante diversas técnicas e métodos de análise dos sinais dinâmicos gerados durante a operação. Neste trabalho foram analisadas as flutuações de pressão obtidas no interior de uma válvula de recirculação de sólidos do tipo *loop-seal* acoplada a um LFC de pequena escala, através dos métodos do desvio médio absoluto (DMA) e do espectro de potência (PSD). Os parâmetros operacionais do LFC utilizados como variáveis de análise foram o inventário total de sólidos e a velocidade superficial do gás. Os resultados das análises indicaram que o método DMA foi mais eficaz que o método PSD na caracterização do comportamento fluidodinâmico no interior da válvula *loop-seal* para as condições experimentais testadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Desvio médio absoluto. Espectro de potência. Leito fluidizado circulante.

### ABSTRACT

Circulating fluidized beds (CFB) are systems widely used in processes such as fluid catalytic cracking and combustion of solid fuels for thermal and electrical energy generation. To ensure an efficient operation for these processes, the hydrodynamics characterization and the control of the gas-solid flow inside the equipment become essentials, somewhat can be carried out by using several methods and technics of analysis applied on dynamics signals emerged during the operation. In this work, the behavior of the pressure fluctuations signals obtained inside a *loop-seal* solids recirculation valve coupled to a small CFB system was analyzed from the point of view of the absolute mean deviation (AMD) and the power spectral density (PSD). The total inventory of solids and the fluidization velocity inside the riser were used as operating variables in the experimental runs. The AMD analysis proved to be more efficient than the PSD for characterizing the hydrodynamics behavior of a *loop seal* valve under the operating conditions here studied.

**KEYWORDS:** Absolute mean deviation. Power spectral density. Circulating fluidized bed.

Renata Tramontin da Silveira  
[renatasilveira@alunos.utfpr.edu.br](mailto:renatasilveira@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Jhon Jairo Ramirez Behainne  
[john@utfpr.edu.br](mailto:john@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Leitos fluidizados circulantes são equipamentos industriais com amplo uso nos processos de craqueamento catalítico fluido e combustão para geração de energia. Devido à alta eficiência operacional e reduzido impacto ambiental, sua utilização vem crescendo nas últimas décadas. (YANG, 2003; BASU, 2006)

Diferentes técnicas de medição têm sido aplicadas, a fim de adquirir maior conhecimento sobre os fenômenos dinâmicos que ocorrem no interior de um leito fluidizado (WERTHER, 1999; YATES e SIMONS, 1994). Entre os métodos utilizados, podem-se citar as medidas de capacitância e indutância (LOUGIE e OPPIE, 1990, BRERETON e GRACE, 1993; DU et al., 2004), as técnicas baseadas em sondas de fibra óptica (AMOS et al., 1996; ZHANG et al., 1998; CASTILHO, 2007; CASTILHO, 2011), as medições com laser (BRIONGOS e GUARDIOLA, 2003, SOLIMENE et al., 2007), a radiografia tridimensional (MUDDE et al., 2005) e as medidas eletrostáticas (CHEN e GRACE, 2007, DEMIRBAS et al., 2008).

Adicionalmente, é possível a utilização de técnicas de análise mais simples, que não comprometam a qualidade dos resultados. Um exemplo é a técnica baseada nas medidas de flutuações de pressão que ocorrem no interior do leito, com a utilização de transdutores de pressão. Através dela, tem-se custos reduzidos e uma fácil aquisição de dados, mesmo quando aplicada em condições mais severas de operação. Além disso, trata-se de uma técnica não invasiva, evitando interferências na dinâmica dentro do leito.

A análise dos sinais pelas técnicas acima descritas apresenta a possibilidade de prevenção de comportamentos indesejados do leito, como determinar o início da fluidização e as transições entre os regimes, identificar a formação e a repartição de aglomerados, estabelecer o grau de turbulência do escoamento gás-sólido e das interações partícula-partícula e partícula-parede (FONSECA, 2009; CASTILHO, 2011). Dentre os métodos de análise dos sinais destacam-se: a análise de caos, utilizada no processamento de séries temporais não lineares (BREAUULT et al., 2012), a análise espectral, envolvendo o domínio da frequência, que emprega a transformada de Fourier (SCHAFFKA, 2017); a análise estatística pura do conjunto de dados dos sinais, configurando a denominada análise no domínio do tempo, onde se utiliza o desvio padrão das flutuações dos sinais (JIANG et al., 2018); e a análise da transformada wavelet, que envolve o domínio do tempo e da frequência, permitindo apresentar os componentes de baixa frequência de um sinal sobre um longo intervalo de tempo e os componentes de maior frequência, em uma resolução maior sobre curtos intervalos de tempo (CHEW et al., 2012).

Esta pesquisa tem foco na análise das flutuações de pressão obtidas no interior de uma válvula de recirculação de sólidos do tipo *loop-seal*, acoplada a uma unidade de LFC em escala de laboratório e operada sob o modo de aeração monocâmara, com injeção vertical de ar na sua câmara de alimentação. Os métodos de análise de sinais empregados foram o desvio médio absoluto (DMA) e o espectro de potência (PSD). Estas válvulas apresentam comportamento dinâmico muito variável em relação às condições e modos de aeração aplicados nela, com pouca informação disponível na literatura em equipamentos em escala de laboratório como o aqui estudado.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados na Unidade de Fluidização Rápida a Frio (UFRAF), instalada no Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Câmpus Ponta Grossa. O registro das flutuações de pressão do escoamento gás-sólido no interior da válvula *loop-seal* foi realizado através de um transdutor de pressão instalado na base da câmara de alimentação do dispositivo de recirculação.

Durante os ensaios experimentais, a válvula *loop-seal* foi arejada verticalmente na base da sua câmara de alimentação, utilizando-se uma taxa de aeração constante de 24 L/min. Os parâmetros operacionais do LFC utilizados como variáveis de análise foram: o inventário total de sólidos ( $I_s$ ), avaliado em 4,0; 4,5 e 5,0 kg; a velocidade superficial do gás no *riser* ( $u_0$ ), analisada em 3,4; 3,8 e 4,2 m/s, e o diâmetro médio da partícula ( $d_p$ ), no valor de 196  $\mu\text{m}$ .

Em cada ensaio experimental foram coletados sinais de pressão a uma taxa de amostragem pré-estabelecida de 180 segundos. Para obtenção do fluxo mássico médio de recirculação dos sólidos ( $G_s$ ), as amostras foram tomadas com uma duração de 6 segundos. Cada ensaio foi feito em duplicata para verificar a repetibilidade dos dados coletados. Os sinais obtidos dos transdutores de pressão foram registrados por um sistema de dados e processados utilizando o *software* LabVIEW™ v. 2010.

Os dados de flutuação de pressão originalmente coletados foram representados em gráficos em termos da análise estatística do Desvio Médio Absoluto (DMA), bem como da análise da transformada de Fourier a partir do Espectro de Potência (PSD). As relações matemáticas que descrevem cada uma destas análises são representadas pela Eq. (1) e Eq. (2), respectivamente:

$$DMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}| \quad (1)$$

onde:

$x_i$ : i-ésimo valor; N: Número total de valores na amostra;  $\bar{x}$ : Média amostral; e,

$$S_{xx}(f) = X(f)X^*(f) = |X^2(f)| \quad (2)$$

onde  $X^*(f)$  é o complexo conjugado de  $X(f)$ , que deriva da transformada de Fourier, conforme Eq. (3):

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3)$$

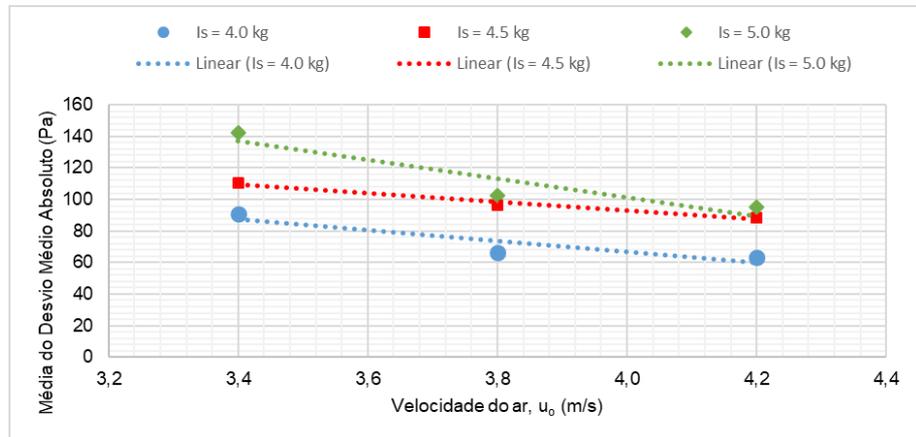
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados e discutidos os resultados obtidos de acordo com o método de análise aplicado sobre as flutuações dos sinais de pressão.

### ANÁLISE ESTATÍSTICA A PARTIR DO DESVIO MÉDIO ABSOLUTO (DMA)

Os resultados das médias do desvio médio absoluto (DMA) dos sinais de flutuação de pressão, capturados na base da válvula *loop-seal*, são apresentados nas Figuras 1 e 2.

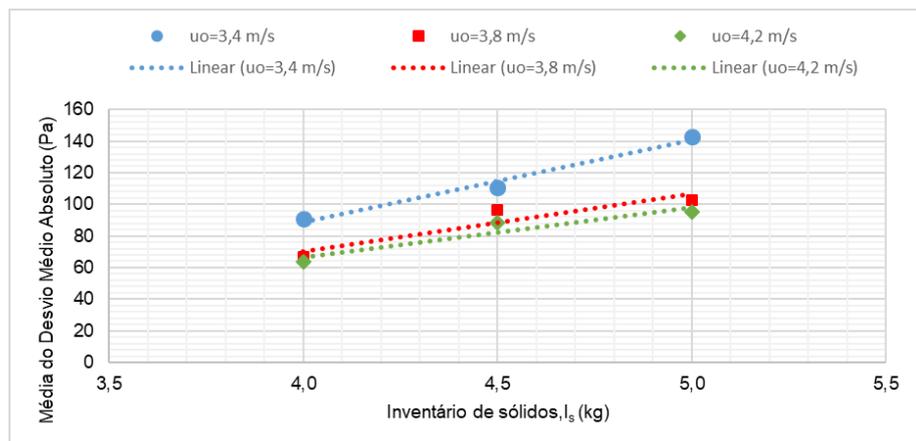
Figura 1 – Análise estatística a partir do Desvio Médio Absoluto (DMA). Efeito da velocidade superficial do ar.



Fonte: Autoria própria (2020).

É possível verificar a partir da Figura 1 que o aumento da velocidade de fluidização na coluna *riser* leva a uma diminuição na média do DMA em todos os inventários de sólidos na válvula de recirculação dos sólidos. Isto sugere a presença de um leito cada vez mais compacto no interior da *loop-seal*, devido ao crescimento da altura de sólidos acumulada no *standpipe* com o aumento no arraste líquido de sólidos no *riser*. Assim, mantendo-se a taxa de aeração constante na *loop-seal*, a quantidade de bolhas de ar através do *standpipe* tendem a diminuir pela maior restrição da coluna de sólidos à passagem do fluido, promovendo menor intensidade nas flutuações de pressão.

Figura 2 – Análise estatística a partir do Desvio Médio Absoluto (DMA). Efeito do inventário de sólidos.



Fonte: Autoria própria (2020).

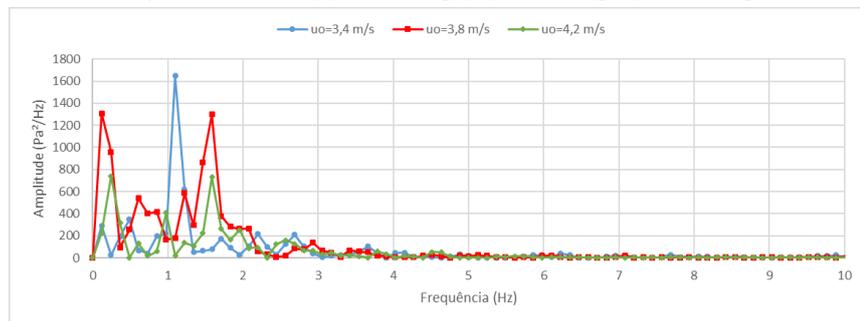
O comportamento inverso acontece em relação ao inventário de sólidos, como visto na Figura 2. Percebe-se que os valores do DMA aumentam quando a massa de partículas no interior do sistema cresce. Neste caso, mesmo com a presença de maiores alturas de sólidos no *standpipe* pelo aumento da massa, a intensidade das flutuações de pressão na *loop-seal* aumenta como resposta ao acréscimo da pressão experimentado no interior do *riser* pela maior densidade de partículas. Assim, uma vez que o sistema de LFC precisa de maior pressão e energia

do gás de fluidização para manter o movimento das partículas, as flutuações de pressão registradas crescem com maior inventário de sólidos presente.

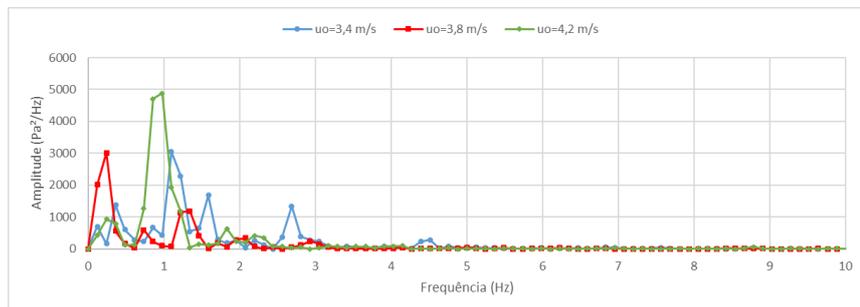
### ANÁLISE DA TRANSFORMADA DE FOURIER A PARTIR DO ESPECTRO DE POTÊNCIA (PSD)

A análise PSD é representada nas Figuras 3 e 4, em termos da velocidade de fluidização e do inventário de sólidos, para o tamanho de partícula estudado.

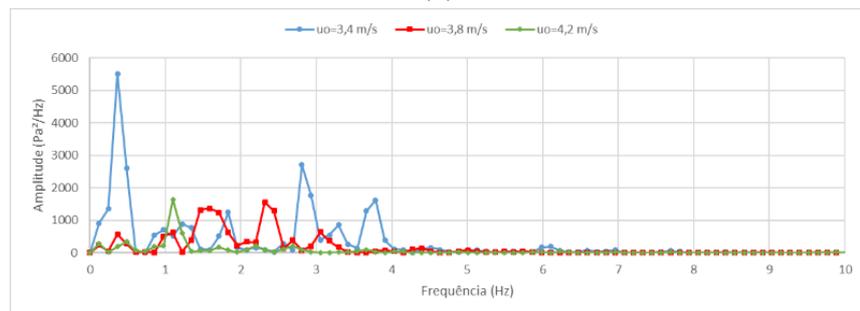
Figura 3 – Comportamento do Espectro de Potência (PSD). Efeito da velocidade superficial do ar. (a)  $I_s = 4,0$  kg; (b)  $I_s = 4,5$  kg; (c)  $I_s = 5,0$  kg



(a)



(b)



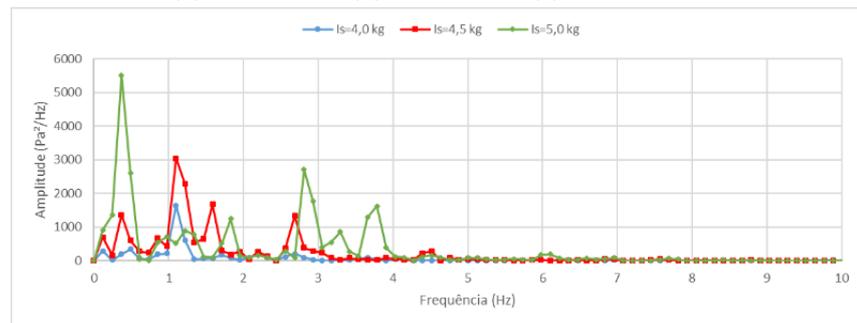
(c)

Fonte: Autoria própria (2020).

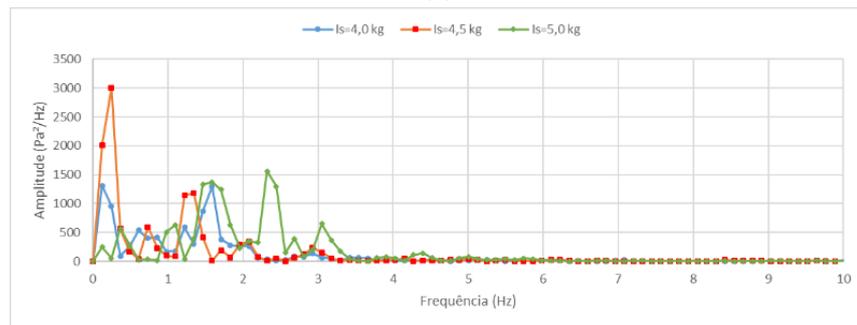
Na região da *loop-seal*, os picos de amplitude estão na faixa de 0 a 3 Hz na maioria das condições testadas. Essa faixa de frequências corresponde à esperada para um leito fluidizado borbulhante. Assim, verifica-se o domínio desse regime fluidodinâmico no dispositivo, mesmo sendo visualmente evidente apenas na câmara de reciclagem.

Da Figura 3, observa-se a tendência das maiores velocidades de fluidização em atenuar a intensidade dos picos de amplitude, assim como foi evidenciado na análise DMA. No entanto, a análise PSD proporciona adicionalmente a distribuição das frequências dominantes presentes no fenômeno. Nesse sentido, o número de picos de frequência dominante com amplitude menor parece aumentar com o incremento da velocidade de fluidização, confirmando assim a compactação do leito na *loop-seal* devido à maior massa acumulada no *standpipe*.

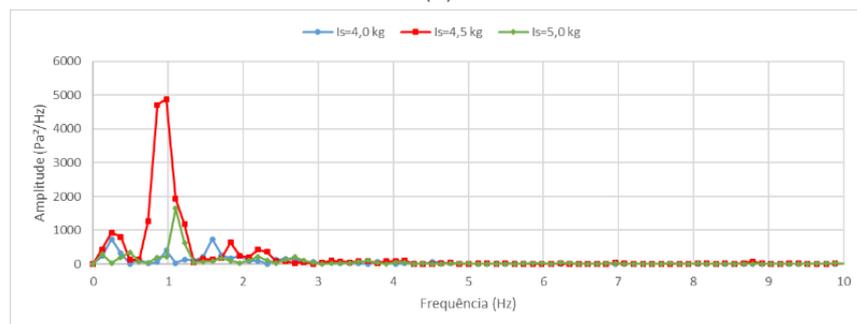
Figura 4 – Comportamento do Espectro de Potência (PSD). Efeito do inventário de sólidos.  
 (a)  $u_0 = 3,4$  m/s; (b)  $u_0 = 3,8$  m/s; (c)  $u_0 = 4,2$  m/s.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria (2020).

Ainda assim, percebem-se algumas exceções a esta regra, o que faz a análise PSD não muito precisa para estabelecer a tendência fluidodinâmica no interior da *loop-seal* em relação à mudança da velocidade de fluidização.

Por outro lado, os resultados da Figura 4 sugerem que o incremento no inventário de sólidos alonga a presença de picos dominantes para uma faixa maior de frequências, como resposta ao aumento do nível de energia do sistema de LFC

para se manter em operação. Nesse caso, mesmo que a análise PSD pareça fornecer um resultado mais claro que quando aplicado para mudanças na velocidade do ar, a estimativa em relação ao número de picos dominantes e às suas frequências não segue uma regra.

## CONCLUSÃO

Os resultados desta pesquisa mostraram que a análise DMA é útil para caracterizar o comportamento fluidodinâmico na válvula *loop-seal* em função da velocidade de fluidização e do inventário de sólidos.

Adicionalmente, ficou evidente que a análise PSD não consegue rastrear com clareza as tendências no comportamento fluidodinâmico do leito em termos das mudanças impostas na velocidade de fluidização na coluna *riser* e no inventário de sólidos.

Portanto, sob as condições experimentais aplicadas nesta pesquisa, a análise DMA se mostrou mais eficiente que a análise PSD na caracterização do comportamento fluidodinâmico do escoamento gás-sólido no interior da válvula *loop-seal*.

## REFERÊNCIAS

AMOS, G., RHODES, M.J., BENKREIRA, H. Calculation of optic fibers calibration curves for the measurement of solids volume fractions in multiphase flows. **Powder Technology**, v. 88, n. 2, p. 107-121, 1996.

BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized Beds**. New York: Taylor e Francis, 2006. p. 437

BREAULT, R. W.; CASLETON, E. M.; GUENTHER, C. P. Chaotic and statistical tests on fiber optic dynamic data taken from the riser section of a circulating fluidized bed. **Powder Technology**, v. 220, p. 151-163, abr. 2012.

BRETERON, C.M.H., GRACE, J.R. Microstructural aspects of the behavior of circulating fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, v. 48, n. 14, p. 2565-2572, 1993.

BRIONGOS, J.V., GUARDIOLA, J. Free top fluidized bed surface as a source of hydrodynamic data. **Powder Technology**, v. 134, n. 1-2, p. 133-144, 2003.

CASTILHO, G. J. **Análise de caos em leito fluidizado circulante**. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Unicamp, 2011. 183 p. Tese (Doutorado).

CASTILHO, G.J. **Determinação experimental das distribuições radial e axial de concentração de sólidos em uma seção riser utilizando sonda de fibras ópticas**.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

CHEN, A., BI, H.T., GRACE, J.R. Charge distribution around a rising bubble in a two dimensional fluidized bed by signal reconstruction. **Powder Technology**, v. 177, n. 3, p. 113-124, 2007.

CHEW, J. et al. Reverse core-annular flow of Geldart Group B particles in risers. **Powder Technology**, USA, v. 221, p. 1-12, maio 2012.

DEMIRBAS, B., NIJENHUIS, J., YURTERI, C.U., VAN OMMEN, J.R. Towards monitoring electrostatics in gas-solid fluidized beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 86, n. 3, p. 493-505, 2008.

DU, B.; WARSITO, W.; FAN, L.-S. ECT studies of the choking phenomenon in a gassolid circulating fluidized bed. **Aiche Journal**, Columbus, v. 50, n. 7, p. 1386-1406, 2004.

FONSECA, O. L. C. **Estudo preliminar da fluidodinâmica do escoamento gás sólido de um leito fluidizado circulante através da análise dos sinais dinâmicos de pressão**. 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

JIANG, H. et al. Characterization of gas–solid fluidization in fluidized beds with different particle size distributions by analyzing pressure fluctuations in wind caps. **Chemical Engineering Journal**, v. 352, p. 923-939, nov. 2018.

LOUGIE, M., OPIE, M. Measurements of the effective dielectric permittivity of suspensions, **Powder Technology**, v. 62, n. 1, pp. 85-94, 1990.

MUDDE, R.F., BRUNEAU, P.R.P., VAN DER HAGEN, T.H.J.J. Time-resolved densitometry imaging within fluidized beds. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 16, p. 6181-6187, 2005.

SCHAFFKA, F. T. S. **Análise Fluidodinâmica e térmica do processo de secagem de suspensão diluída em leito fluidizado**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SOLIMENE, R., MARZOCHELLA, A., RAGUCCI, R., SALATINO, P. Laser diagnostics of hydrodynamics and gas-mixing induced by bubble bursting at the surface of gasfluidized beds. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 1-2, p. 94-108, 2007.

WERTHER, J. Measurement techniques in fluidized beds, **Powder Technology**, v. 102, n. 1, p. 15-36, 1999.

YANG, W. C. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. Marcel Dekker: New York, 2003.

YATES, J.G., SIMONS, S.J.R. Experimental methods in fluidization research. International, **Journal of Multiphase Flow**, v. 20, p. 297-330, 1994.

ZHANG, H., JHONSTON, P.M., ZHU, J.X., DE LASA, H.I., BERGOUGNOU, M.A. Bergougnou. A novel calibration procedure for a fiber optic solids concentration probe. **Powder Technology**, v. 100, n. 2-3, p. 260-272, 1998.