

AVALIAÇÃO FLUIDODINÂMICA DA SECAGEM DE SUSPENSÃO DILUIDA EM LEITO FLUIDIZADO UTILIZANDO ANÁLISE ESPECTRAL GAUSSIANA

F.T.S. SCHAFFKA¹, C.A.M. SILVA², F.C. JANZEN³, M.R. PARISE^{4*}

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná- Campus Ponta Grossa, Departamento de Engenharia Mecânica

²Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná- Campus Ponta Grossa, Departamento de Engenharia Eletrônica

⁴Universidade Tecnológica Federal do Paraná- Campus Ponta Grossa, Departamento de Engenharia Química

*email:parise@utfpr.edu.br

RESUMO

O presente trabalho consiste em avaliar as transições de regime de fluidização durante o processo de secagem de suspensão diluída utilizando a análise espectral Gaussiana, que se baseia na medição das flutuações de pressão no leito. Os ensaios experimentais foram realizados em escala laboratorial composto por uma coluna de acrílico de 0,11 m de diâmetro interno e 1,0 m de altura. O equipamento experimental foi instrumentado com transdutores de pressão de resposta rápida, termopares e termohigrômetros acoplados a um sistema de aquisição e processamento de sinais, composto por uma placa de aquisição de dados, um microcomputador e pelo *software* LabView 10.0TM. Esferas de alumínio com diâmetro médio de partícula de 1,55 mm foram usadas como material inerte, e suspensão de carbonato de cálcio com concentração de 9%, em massa, foi utilizada como material pastoso pulverizado sobre o leito. A vazão de atomização da suspensão foi de 12 e 15 mL/min. Os resultados mostraram que a transição dos regimes de fluidização durante o processo de secagem de suspensão aquosa pode ser monitorada com a técnica da análise espectral Gaussiana.

1 INTRODUÇÃO

As indústrias de alimentos, químicas e farmacêuticas têm usado extensivamente leitos fluidizados em diversos tipos de processamento, devido ao contato efetivo entre as partículas sólidas e um gás ou líquido, permitindo um processo com altas taxas de transferência de calor e de massa.

Nos processos que utilizam leito fluidizado gás-sólido é fundamental manter a estabilidade do estado de fluidização, de modo a obter uma boa mistura das fases gasosa e sólida e, consequentemente, alto desempenho nos processos.

Porém, temperaturas elevadas, alto conteúdo de umidade de partículas, e até mesmo, em processos em que uma solução

tem de ser atomizada diretamente em um leito fluidizado, como é o caso da secagem de suspensão diluída, revestimento das partículas e granulação, pode ser difícil garantir a qualidade de fluidização, devido ao alto conteúdo de umidade no leito tender à aglomeração das partículas e acelerar a condição de defluidização (MARONGA, 1998).

Vários métodos têm sido estudados para quantificar os regimes de fluidização, e assim avaliar a qualidade do movimento das partículas (BOOK et al., 2011; SILVA et al., 2014; SHABANIAN et al., 2015; SILVA, 2015). Dentre esses estão inseridas as análises no domínio do tempo, espectral, *wavelet* e de caos. PARISE (2007) e PARISE et al. (2008) desenvolveram a análise espectral Gaussiana para identificar a região de defluidização do leito, utilizando medidas de flutuação de pressão no *plenum*. Com essa técnica é possível avaliar o momento em que o leito está tendendo à defluidização através de alterações significativas dos valores da frequência central. SILVA et al. (2009) e SILVA et al. (2011) aplicaram essa técnica no processo de recobrimento de partículas de celulose microcristalina em leito fluidizado atomizando água e suspensão polimérica, respectivamente. Com a técnica empregada, a defluidização do leito foi facilmente detectada em ambos os estudos.

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo a realização de um estudo do comportamento fluidodinâmico no processo de secagem de suspensão diluída de carbonato de cálcio com concentração em massa de 9% em um leito composto por partículas inertes de esferas de alumínio ($d_p = 1,55$ mm), utilizando análise espectral Gaussiana, que é uma técnica utilizada em medidas de flutuação de pressão no leito.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados em um secador de leito fluidizado em escala de laboratório como mostrado na Figura 1. O sistema é composto por uma coluna de acrílico de 0,11 m de diâmetro interno e 1,0 m de altura. O ar utilizado para a fluidização das partículas foi fornecido por um soprador radial da marca Elan®, modelo CRE04, acoplado a um motor de 4 cv. Este soprador está conectado ao leito através de uma tubulação de aço com 0,038 m de diâmetro interno. A rotação do motor do soprador foi regulada com auxílio de um inversor de frequência da marca WEG®, modelo CFW080160T2024POA1Z. A vazão mássica do ar destinado ao leito de partículas foi determinada mediante uma placa de orifício (construída a partir da Norma NBR-ISO 5167-1, ABNT, 1994). Para isso, a pressão manométrica na linha e a queda de pressão através da placa de orifício foram obtidas utilizando transdutores de pressão (Cole Parmer®, modelo 98073-14, de 0 a 12442 Pa, e do modelo 68071-14, de 0 a 6227 Pa, respectivamente). O ar fluidizante era aquecido através de resistências elétricas e um regulador tipo PID (NOVUS®, modelo N1100) foi utilizado para controlar a temperatura do ar no plenum. Os sinais de pressão provenientes do *plenum* foram obtidos utilizando um transdutor diferencial de pressão (Cole Parmer®, modelo 68071-14, com faixa de 0 a 6227 Pa). Todos os transdutores de pressão utilizados foram acoplados a um sistema de aquisição de dados (National Instruments™, modelo NI USB 6211). Foram utilizados dois sensores de umidade relativa do ar e temperatura de bulbo seco (Novus, modelos: RHT-XS e N322 RHT). Para as medidas de temperatura na coluna de fluidização, foram utilizados termopares tipo T, conectados a um sistema de aquisição de dados (National Instruments™, modelo NI USB 9213). Os sinais de pressão, umidade e temperatura foram visualizados e processados a partir de

um microcomputador com *software* LabView™ versão 10.0. Foram coletados 2048 pontos de pressão no *plenum* a uma taxa de amostragem de 400 Hz. Um bico atomizador do tipo duplo fluido (Spraying Systems®, SU11-SS) foi utilizado para atomizar a suspensão diluída provinda de uma bomba peristáltica (Vallair®, modelo SVP4H2B1SZAA). O ar de atomização foi fornecido por compressor do tipo pistão (Schulz®, modelo 821410, 2 cv) o qual passava por um regulador de pressão (Fluir®, modelo AW200002U). Os pós secos eram coletados por um ciclone *Swift* conectado a um filtro de mangas tipo jato pulsante (Multiman®).

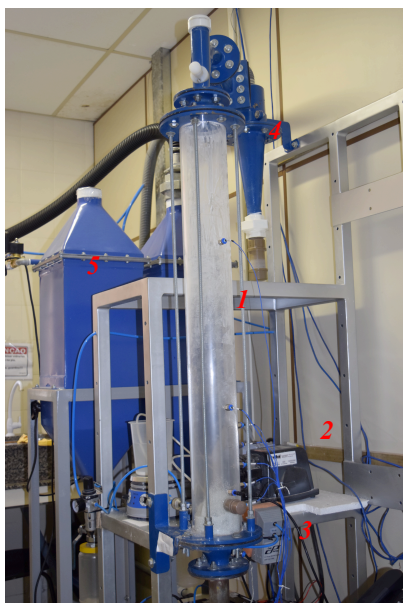


Figura 1 - Fotografia do sistema experimental. 1: coluna de fluidização; 2: bomba peristáltica; 3: transdutor de pressão; 4: ciclone; 5: filtro de mangas.

O material inerte utilizado nos experimentos foi esferas de alumínio e a suspensão diluída pastosa é composta por carbonato de cálcio e água destilada. As características físicas da esfera de alumínio são ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características físicas do material inerte.

Material	Diâmetro médio das partículas (mm)	Densidade aparente (kg/m³)
Esferas de alumínio	1,55 (+1,4 -1,7)	2692,60

Em todos os ensaios experimentais, a altura de leito fixo manteve-se 0,10 m e a massa de material inerte foi de 1,60 kg. A Tabela 2 mostra as condições operacionais utilizadas.

Tabela 2 - Condições experimentais dos experimentos.

Ensaio	u_o/u_{mf}	$C_{suspensão}$ (%)	$Q_{suspensão}$ (mL/min)
1	1,4	9,0	12,0
2	1,4	9,0	15,0

2.1 Análise espectral Gaussiana

A metodologia de análise espectral Gaussiana foi desenvolvida por Parise (2007) e será utilizada para identificar a transição de regime fluidodinâmico durante processo de secagem de suspensão diluída em leito fluidizado. Para essa finalidade, inicialmente, são coletados 2048 pontos de pressão manométrica no *plenum* a uma frequência de amostragem de 400 Hz (este valor de frequência tem sido usado por vários pesquisadores, como por exemplo, BRIENS et al, 2003; BAI et. al, 2005, PARISE, 2008; PARISE et. al. 2009, SILVA et. al. 2011 e SILVA 2015). Após esse procedimento, esses sinais de pressão são filtrados utilizando filtro digital (IRR- resposta de impulso infinito - do tipo passa baixa, com topologia *Butterworth*, frequência de corte de 20 Hz) e realiza-se a centralização na média (*mean centring*). A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é aplicada neste sinal de pressão centralizada, produzindo um espectro de pressão. Em seguida, é realizado um ajuste deste sinal na curva dada pela Equação 1:

$$G(f_k) = Ae^{\frac{-(f_k - f_m)}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

Aplicando o logaritmo natural na Equação 1 e utilizando o método dos mínimos quadrados, dado pela Equação 2, a frequência central, f_c , pode ser determinada.

$$e_k = \sum_{k=0}^{N-1} \{ \ln[A_e(f_k)] - \ln[G(f_k)] \}^2 \quad (2)$$

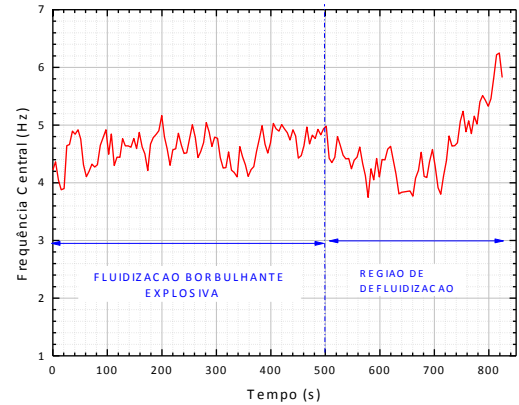
O valor da frequência central é o parâmetro utilizado para o estudo da transição de regimes de fluidização do presente trabalho.

2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3 e 4 mostram o perfil da frequência central ao longo do tempo de secagem de suspensão diluída de carbonato de cálcio para a vazão de atomização de 12 e 15 mL/min, respectivamente.

Na Figura 3, verifica-se que durante os primeiros 500 s de ensaio, a fluidização manteve-se estável em regime explosivo, com a frequência central permanecendo na faixa de 4,0 a 5,0 Hz. A partir desse instante, através de observações visuais realizadas no decorrer do ensaio, verificou-se uma redução do número de bolhas no interior do leito, pois a atomização da suspensão diluída provocou a elevação da umidade no interior do leito, resultando na diminuição gradativa do movimento das partículas até a completa estagnação das mesmas, atingindo assim o regime de leito fixo. Nesta condição de fluidização, o valor da frequência central atinge valores próximos a 6,0 Hz, concordando com outros trabalhos da literatura, tais como PARISE (2008); PARISE et. al. (2009), SILVA et. al. (2011).

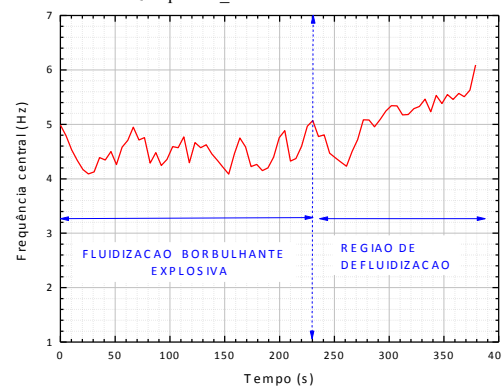
Figura 3 - Perfil da frequência central ao longo do processo de secagem de solução diluída de CaCO_3 . Dados operacionais: $m_{\text{esferas_alumínio}} = 1,6$ kg, $u_0/u_{mf} = 1,4$, $T_{ar} = 70^\circ\text{C}$; $P_{\text{atomização}} = 0,1$ MPa, $C_{\text{CaCO}_3} = 9\%$, $Q_{\text{suspensão_CaCO}_3} = 12$ mL/min.



(2)

No caso da Figura 4, a fluidização estável foi observada somente por aproximadamente 230 s de secagem, devido a uma maior vazão de atomização utilizada em relação à da Figura 3. A partir desse momento, observou-se uma queda gradual na movimentação das partículas, atingindo o regime de leito fixo após 350 s de ensaio, onde o valor da frequência central permaneceu na faixa de 5 a 6 Hz.

Figura 4 - Perfil da frequência central ao longo do processo de secagem de solução diluída de CaCO_3 . Dados operacionais: $m_{\text{esferas_alumínio}} = 1,6$ kg, $u_0/u_{mf} = 1,4$, $T_{ar} = 70^\circ\text{C}$; $P_{\text{atomização}} = 0,1$ MPa, $C_{\text{CaCO}_3} = 9\%$, $Q_{\text{suspensão_CaCO}_3} = 15$ mL/min.

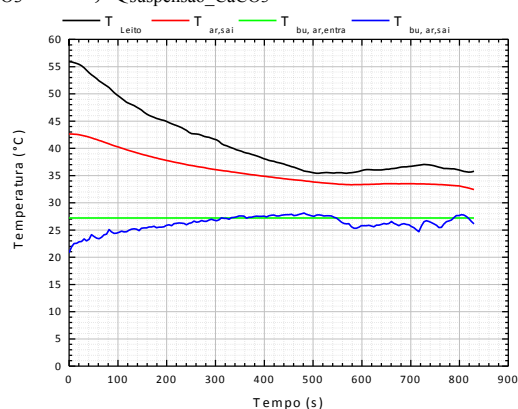


A Figura 5 ilustra a temperatura do leito e das temperaturas obtidas através de balanços

psicrométricos (bulbo úmido de entrada e saída do ar), e da temperatura de bulbo seco do ar na saída da coluna, referente o ensaio 1 (Tabela 2). A redução no potencial de secagem do leito pode ser verificada em função do abaixamento das temperaturas do leito e do ar de saída e ainda pela aproximação da temperatura de bulbo úmido do ar de saída com o ar de entrada. Do tempo 350 s ao tempo 550 s, esta aproximação é constante, indicando a secagem da suspensão a taxa constante de evaporação da água. A partir dos 550 s, os sinais de defluidização foram mais pronunciados e a oscilação com tendência de queda da temperatura de bulbo úmido da saída indica também o surgimento de instabilidades no leito.

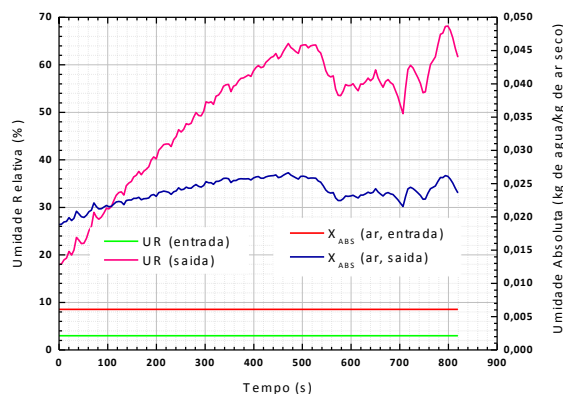
Figura 5 - Perfil de temperatura do ar e do leito.

Dados operacionais: $m_{\text{esferas_alumínio}} = 1,6 \text{ kg}$, $u_o/u_{mf} = 1,4$, $T_{\text{ar}} = 70^\circ\text{C}$; $P_{\text{atomização}} = 0,1 \text{ MPa}$, $C_{\text{CaCO}_3} = 9\%$, $Q_{\text{suspensão_CaCO}_3} = 12 \text{ mL/min}$.



Na Figura 6 são apresentados os perfis das umidades relativa e absoluta na entrada e saída da coluna de fluidização. Verifica-se que, em torno de 500 s de experimento, as umidades relativa do ar e absoluta na saída da coluna de fluidização alcançam valores máximos de 64% e 0,026 kg de água/kg de ar seco, respectivamente. A partir desse instante, o leito encontra-se na região de defluidização e observa-se uma oscilação pronunciada dessas umidades, que pode ser ocasionada pela redução da movimentação das partículas.

Figura 6 - Perfil de umidade do ar. Dados operacionais: $m_{\text{esferas_alumínio}} = 1,6 \text{ kg}$, $u_o/u_{mf} = 1,4$, $T_{\text{ar}} = 70^\circ\text{C}$; $P_{\text{atomização}} = 0,1 \text{ MPa}$, $C_{\text{CaCO}_3} = 9\%$, $Q_{\text{suspensão_CaCO}_3} = 12 \text{ mL/min}$.



3 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo da fluidodinâmica do leito fluidizado durante o processo de secagem de suspensão diluída de carbonato de cálcio, através da análise espectral Gaussiana. Partindo o processo em regime de fluidização do tipo borbulhante explosiva, onde os valores de frequência central permaneceram na faixa de 4,0 e 5,0 Hz, foi possível verificar a alteração do estado fluidodinâmico na região de defluidização utilizando a análise espectral Gaussiana, atingindo o leito fixo, com frequência central em torno de 6,0 Hz. Adicionalmente, pode-se observar a redução potencial de secagem pelo decréscimo das temperaturas do leito e do ar de saída e através da tendência de aproximação da temperatura de bulbo úmido do ar de saída com o ar de entrada. Verificou-se que na região de fluidização estável, as umidades relativa do ar e absoluta na saída da coluna alcançaram valores máximos de 64% e 0,026 kg de água/kg de ar seco, respectivamente.

NOMENCLATURA

A	Amplitude de modulação
$A_e(f_k)$	Amplitude espectral medida (Pa)
C	Concentração (massa de sólido/volume de suspensão)
d_p	Diâmetro médio das partículas (mm)
e_k	Resíduo da curva de ajuste
f_k	Frequência do sinal (Hz)
f_m	Frequência central (Hz)
G (f_k)	Curva de distribuição normal
m	Massa (kg)
$P_{\text{atomização}}$	Pressão de atomização (Pa)
Q	Vazão volumétrica (mL/min)
u_o	Velocidade superficial do gás (m/s)
u_{mf}	Velocidade de mínima fluidização (m/s)
T_{ar}	Temperatura do ar na entrada do leito (°C)
$T_{ar,sai}$	Temperatura do ar na saída da coluna (°C)
T_{bu}	Temperatura de bulbo úmido (°C)
T_{leito}	Temperatura do leito (°C)
UR	Umidade relativa do ar (%)
X_{abs}	Umidade absoluta ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{ar seco}}$)
σ	Desvio padrão da distribuição espectral (Hz)

REFERÊNCIAS

- BAI, B., et al. Characterization of the void size distribution in fluidized beds using statistics of pressure fluctuations. **Powder Technology**, v.160, p. 81 – 92, 2005
- BOOK, G. et al. On-line detection of bed fluidity in gas-solid fluidized beds with liquid injection by passive acoustic and vibrometric methods. **Powder Technology**, v. 205, p.126-136, 2011.
- BRIENS, C. et al. On-line detection of bed fluidity in a fluidized bed coker. **Powder Technology**, v. 138, p. 160-168, 2003
- MARONGA, S. **On the Optimization of the Fluidized Bed Particulate Coating Process**. 1998. 78 f. Ph.D.Thesis - Course of Chemical Engineering, Department Of Chemical Engineering And Technology, Royal Institute Of Technology, Stockholm, 1998.
- PARISE, M. R. **Aplicação Da Distribuição Espectral Normal Em Leito Fluidizado Gás-Sólido**. 2007. 131 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- PARISE, M. R. et al. Detection of the minimum gas velocity region using Gaussian spectral pressure distribution in a gas-solid fluidized bed. **Powder Technology**, Campinas, v. 182, n. 3, p.453-458, 10 mar. 2008.
- SHABANIAN, J. CHAOUKI, J. Hydrodynamics of a gas-solid fluidized bed with thermally induced interparticle forces, **Chemical Engineering Journal**, v. 259, p.135-152, 2015.
- SILVA, C.A.M. et al. Monitoramento do fenômeno da defluidização no processo de recobrimento em leito fluidizado gás-sólido. In: XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS. 2009. Campinas. **Anais...**Campinas: SP, 2009.
- SILVA, C. A. M. et al. Control of fluidized bed coating particles using Gaussian spectral pressure distribution. **Powder Technology**, Campinas, v. 212, p.445-458, 25 out. 2011.
- SILVA, C. A. M. et al. Monitoring and control of coating and granulation processes in fluidized beds – A review. **Advanced Powder Technology**, v. 25, p.195-210, 2014.



XXXVII ENEMP
18 a 21 de Outubro de 2015
Universidade Federal de São Carlos

SILVA, C.A.M. **Aplicação de tecnologias analíticas de processo e inteligência artificial para monitoramento e controle de processo de recobrimento de partículas em leite fluidizado.** 2015. 301 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação Araucária e Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Ponta Grossa pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.