

## ESTUDO DA DINÂMICA DE FLUIDIZAÇÃO DE UM SISTEMA COMPOSTO AREIA-GÁS-BIOMASSA

M. C. S. SANT'ANNA<sup>1\*</sup>, M. L. A. TAVARES<sup>1</sup>, S. M. SARMENTO<sup>1</sup>, G. F. SILVA<sup>2</sup>, R. A. MEDRONHO<sup>3</sup>, S. LUCENA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Química

<sup>2</sup>Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Química

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Departamento de Engenharia Química

\*e-mail: mikelecandida@gmail.com

### RESUMO

Leitos fluidizados podem ser utilizados em inúmeros processos industriais, dentro dos quais, destacam-se a combustão e/ou gaseificação de biomassa, estes equipamentos promovem um maior contato sólido-gás. Objetivando entender a dinâmica das partículas durante a fluidização, foram realizadas simulações para dois sistemas contendo gás-biomassa-areia, onde variou-se o diâmetro das partículas da fase sólida, verificando a influência desta alteração na fluidização das partículas. Para realizar as simulações foi utilizado o software ANSYS FLUENT 15.0, foi adotada a abordagem Euleriana, com a teoria cinética granular. A velocidade de entrada do gás foi mantida a  $0,38 \text{ ms}^{-1}$ . Entre os sistemas simulados, o sistema A apresentou fluidização difícil quando comparado com o sistema B, onde a fluidização ocorreu mais facilmente e os efeitos da segregação foram atenuados. Compreender a hidrodinâmica nestes sistemas é importante para otimizar os processos.

### 1 INTRODUÇÃO

A hidrodinâmica de reatores de leito fluidizados tem atraído diversos pesquisadores por décadas para entender as complexas interações entre gás e partículas Berruti et al., 1995; Samuelsberg e Hjertager, 1995; Benyahia, 2000; Goldschmidt, 2001; Almuttahir e Taghipour, 2008; Armstrong et al., 2010; Tagliaferri et al. (2013).

Segundo Hodapp (2009) a terminologia fluidização provém do fato de um sólido, quando finamente dividido, se comportar como um fluido quando arrastado por um gás ou um líquido. Porém este é um fenômeno bastante complexo, podendo ser caracterizado pelo grau de influência do fluido sobre a fase sólida de um leito.

Neste tipo de equipamento utiliza-se um elemento como a areia para servir de leito, o qual será aquecido e mantido em suspensão (fluidizado) por um fluido, que pode ser o ar.

Na fluidização a força da gravidade agindo nas partículas é compensada pelas forças de arraste exercidas pelo escoamento local do fluido. O escoamento local do fluido é diferente para cada partícula, fazendo o comportamento de cada partícula único (GIBILARO, 2001; MARINI, 2008).

Estes equipamentos podem ser utilizados para a conversão de biomassa em energia.

Avaliar o comportamento da fluidização levando em consideração a presença do material a ser gaseificado foi um diferencial abordado neste trabalho, na literatura os autores Taghipour et al. (2005),

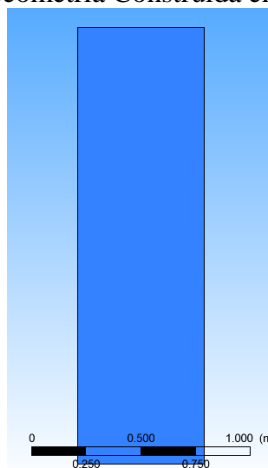
Herzog et al. (2012), Tagliafferri et al. (2013) realizam uma simplificação e avaliam o sistema de fluidização utilizando técnicas de CFD somente levando em consideração a presença da areia, já que esta é a mais densa, apresenta-se em maior quantidade no leito e é a responsável pela homogeneização da queima durante o processo de gaseificação. A simplificação objetiva reduzir a complexidade do experimento em CFD.

## 2 METODOLOGIA

O *software* comercial utilizado foi o ANSYS FLUENT 15.0 e ANSYS CFX 15.0.

A geometria é uma simplificação 2D do gaseificador de leito fluidizado borbulhante disponível no Laboratório de Controle Avançado e Otimização de Processos (LACO-UFPE) (Figura 1). A largura do leito e altura do leito foram de 0,58 e 2,00 m, respectivamente. A malha utilizada nas simulações possui 72.500 elementos e foi obtida através de um teste de independência de malha descrito em Sant'Anna (2015).

**Figura 1** – Geometria Construída em 2D



Fonte: Autor (2015).

Para avaliar a dinâmica de fluidização, a fase sólida foi composta por material inerte (areia) e o combustível (biomassa) e pelo gás na fase fluida. As propriedades da biomassa,

da areia e do gás foram apresentadas na Tabela 1. A velocidade de entrada do gás utilizada nestas simulações foi fixada em  $0,38 \text{ ms}^{-1}$ . Os dados para areia e gás estavam disponíveis no ANSYS FLUENT (2011) e para a Biomassa foi utilizado os citados por Oliveira (2012).

**Tabela 1-** Propriedades das fases sólida e gasosa a 300K e 1 atm.

Material	Propriedade	Valor
Areia	Densidade ( $\text{kg m}^{-3}$ )	$2,50 \times 10^3$
	Diâmetro da partícula ( $\mu\text{m}$ )	250/275
Biomassa	Densidade ( $\text{kgm}^{-3}$ )	$1,43 \times 10^3$
	Diâmetro da partícula ( $\mu\text{m}$ )	350 /500
Air	Densidade ( $\text{kg m}^{-3}$ )	$0,13 \times 10^1$
	Calor específico ( $\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	$1,01 \times 10^3$
	Condutividade Térmica ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	$2,40 \times 10^{-2}$
	Viscosidade ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	$7,89 \times 10^{-5}$

Nos dois sistemas simulados foram mantidas as frações de sólido ( $\phi$ ) e vazios ( $\epsilon$ ) respectivamente iguais a 60% e 40%. Nestes estudos, fixou-se a composição da fase sólida, porém variou-se o diâmetro das partículas (Tabela 2) visando-se verificar o efeito deste parâmetro sobre a dinâmica do leito fluidizado.

**Tabela 2-** Composição da fase sólida para o Sistema ar-areia-biomassa

		Propriedade		
Material	$\phi$ (%)	Densidade ( $\text{kg m}^{-3}$ )	Diametro ( $\mu\text{m}$ )	
A	Areia	51,00	$2,50 \times 10^3$	$2,75 \times 10^2$
	Biomassa	0,90	$1,41 \times 10^3$	$5,00 \times 10^2$
B	Areia	51,00	$2,50 \times 10^3$	$2,50 \times 10^2$
	Biomassa	0,90	$1,41 \times 10^3$	$3,50 \times 10^2$

O modelo de turbulência utilizado foi o k- $\epsilon$ , escolhido através da realização de um

teste de modelo, onde se avaliou o comportamento dos modelos k-ε e SST, descrito em Sant'Anna (2015).

A simulação do leito fluidizado foi realizada resolvendo as equações da conservação de massa, momentum e energia através da utilização do software de CFD.

A abordagem Euleriana foi adotada neste trabalho, juntamente com a Teoria Cinética Granular descrita em ANSYS FLUENT (2011).

Equação da conservação de massa (o subscrito i pode ser para fase gás ou sólida):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) = 0 \quad (1)$$

Equação da conservação de momentum para fase gás (g) e fase sólida (s):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g^2) = \\ -\alpha_g \nabla p + \nabla \vec{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \vec{g} + K_{gs}(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s^2) = \\ -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \vec{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + K_{gs}(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (3)$$

As equações constitutivas foram necessárias para o fechamento das equações governantes. A viscosidade da partículas foi calculada pela Teoria Cinética Granular, as correlações foram descritas na Tabela 3.

**Tabela 3-** Equações de viscosidade

Viscosidade	Modelo
Viscosidade cisalhante	Syamlal-Obrien, 1989
Viscosidade Colisional	Gidaspow et al., 1994
Viscosidade cinética	Syamlal et al., 1993
Viscosidade cisalhante friccional	Schaeffer, 1987
Viscosidade global	Lun et al., 1984

Segundo Ansys (2011) é preferível a utilização do modelo Syamlal-O'Brien (1989) para a força de arraste quando a viscosidade cinética e cisalhante são modeladas pelas equações de Syamlal et al. (1993). Este modelo é baseado em medidas de velocidade terminal das partículas em leitos fluidizados com correlações em função da fração volumétrica e do número de Reynolds relativo.

As equações utilizadas pelo modelo de Syamlal-O'Brien (1989) encontram-se descritas em ANSYS FLUENT (2011).

O valor do coeficiente de restituição partícula-partícula foi igual a 0,9 como utilizado por Taghipuor et al. (2005), Adamczyk et al. (2013), Cornelissen et al. (2007), Pain et al. (1984) e Faísca (2013).

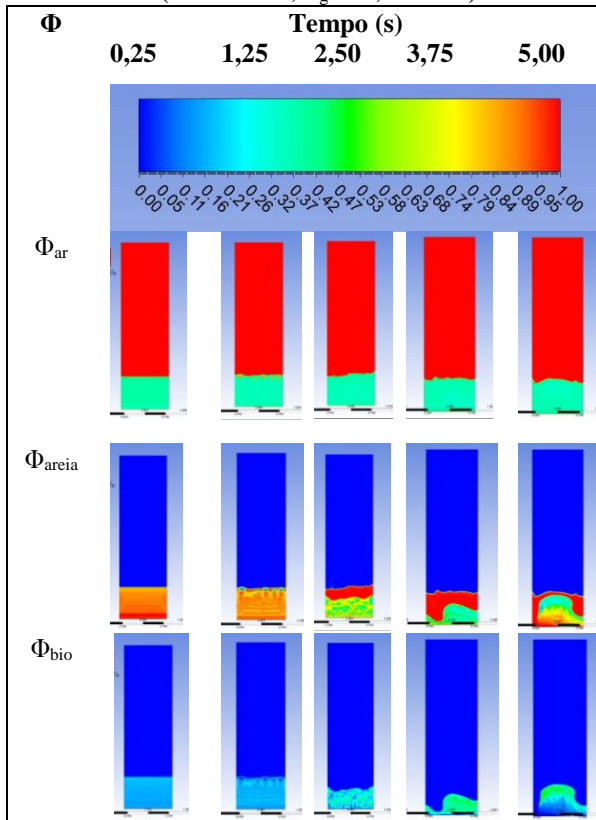
A areia utilizada no leito do gaseificador é do tipo quartzosa, este material é necessário para melhorar a estabilidade térmica e dinâmica do sistema.

A resolução do problema foi realizada de forma segregada utilizando o método Phase Coupled SIMPLE para solução do acoplamento pressão-velocidade. Foram realizados testes para alcançar um valor de *time-step* de modo a obter o menor número de Courant. Convencionou-se o passo de tempo (*time-step*) fixo de  $5 \cdot 10^{-5}$  segundos com 100.000 iterações (5,00 s de simulação).

### 3. RESULTADOS

A Figura 2 apresenta os perfis longitudinais de fração volumétrica do ar, areia e biomassa para os diferentes tempos de simulação (0,02; 1,25; 2,50; 3,75 e 5,00 s), para o sistema A (apresentado na Tabela 2). A velocidade utilizada foi de  $0,38 \text{ ms}^{-1}$ .

**Figura 2-** Perfis longitudinais de fração volumétrica (Sistema A,  $v_g = 0,38 \text{ ms}^{-1}$ ).

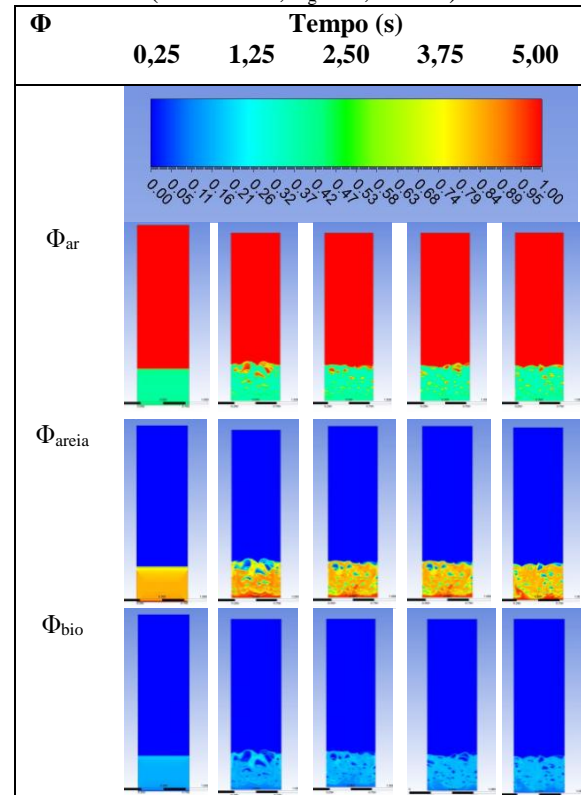


Fonte: Autor (2015).

É possível observar que com o passar do tempo ocorre a segregação entre a areia e a biomassa. Segundo Oliveira (2012) para misturas em que as diferenças entre os diâmetros da biomassa e areia são maiores, ocorre forte segregação destas misturas, a queda de pressão não atinge um patamar ao longo da fluidização. A fluidização é considerada “pobre”, com formação de canais preferenciais, formação de slugging (grandes bolhas) e forte segregação. Este fato foi verificado experimentalmente pelo autor através das fortes oscilações na queda de pressão do leito na região de fluidização completa.

A Figura 3 apresenta os perfis longitudinais de fração volumétrica do ar, areia e biomassa para os diferentes tempos de simulação (0,02; 1,25; 2,50; 3,75 e 5,00 s).

**Figura 3-** Perfis longitudinais de fração volumétrica (Sistema B,  $v_g = 0,38 \text{ ms}^{-1}$ ).

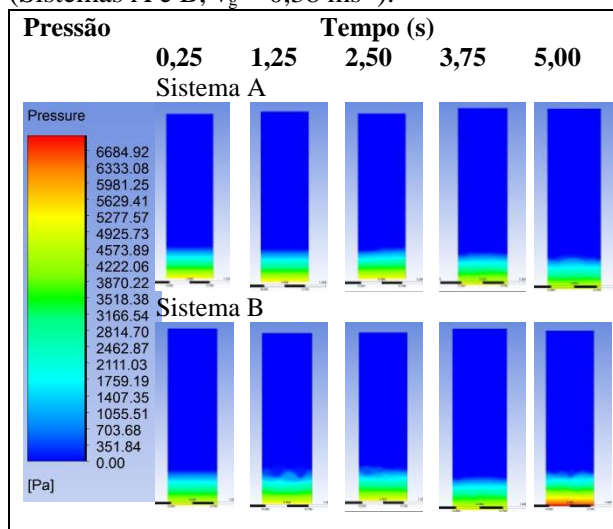


Fonte: Autor (2015).

É possível verificar neste sistema que a fluidização ocorre mais facilmente que no sistema A. Segundo Oliveira (2012) misturas que possuem diâmetros de biomassa e areia próximos tem por consequência o efeito da segregação atenuado.

A Figura 4 apresenta os perfis longitudinais pressão e os valores para a queda de pressão para os diferentes tempos de simulação (0,02; 2,50 e 5,00 s), para o sistema A e B (apresentado na Tabela 3.8). A velocidade utilizada foi de  $0,38 \text{ ms}^{-1}$ .

**Figura 4-** Perfis de longitudinais de pressão (Sistemas A e B,  $v_g = 0,38 \text{ ms}^{-1}$ ).



Fonte: Autor (2015).

Segundo Oliveira (2012) uma das condições necessárias para a operação do leito fluidizado é a obtenção de uma mistura que mantenha uma boa homogeneidade entre a biomassa e a areia. A utilização da técnica de fluidodinâmica é importante para se analisar o efeito da mistura de biomassa e areia e para que o efeito da segregação seja minimizado.

O conhecimento da velocidade de mínima fluidização está ligada a eficiência do leito fluidizado, pois uma vez abaixo da velocidade mínima o leito não fluidiza e muito acima da velocidade mínima ocorre o arraste das partículas presentes no leito.

Ainda segundo Oliveira (2012) nenhuma das equações convencionais de  $U_{mf}$  foram capazes de fornecer previsões confiáveis, especialmente para misturas de biomassa e areia. Clarke et al. (2005) relataram que as correlações existentes na literatura não foram capazes de prever a  $U_{mf}$  de misturas binárias de esferas de vidro e serragem. Essas correlações podem depender fortemente das partículas utilizadas especificamente no desenvolvimento das expressões.

## REFERÊNCIAS

- ALMUTTAHAR, A.; TAGHIPOUR, F. Computational fluid dynamics of high density circulating fluidized bed riser: study of modelling parameters, **Powder Technol**, v.185, p.11–23, 2008.
- ANDRADE, R. B. **Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2007.
- ANSYS FLUENT 13.0 – Theory Guide. Ansys Inc. USA, 2011.
- ARMSTRONG, L.M.; GU, S.; LUO, K.H. Study of wall-to-bed heat transfer in a bubbling fluidised bed using the kinetic theory of granular flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.53, p.4949–4959, 2010.
- BENYAHIA, S.; ARASTOPOUR, H.; KNOWLTON, T.; MASSAH, H. Simulation of particles and gas flow behaviour in the riser section of a circulating fluidized bed using the kinetic theory approach for the particulate phase, **Powder Technol**, v.112, p. 24–33, 2000.
- BERRUTI, F.; CHAOUKI, J.; GODFROY, L.; PUGSLEY, T.; PATIENCE, G. Hydrodynamics of circulating fluidized bed risers: a review, **Can. J. Chem. Eng**, v.73 (5), p.579– 602, 1995.
- GIBILARO, L. G. **Fluidization Dynamics**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- GOLDSCHMIDT, M.; KUIPERS, J.; VAN SWAAIJ, W. Hydrodynamic modelling of dense gas-fluidized beds using the kinetic theory of granular flow: effect of restitution coefficient on bed dynamics, **Chem. Eng. Sci**, v.56, p.571, 2001.
- HERZOG, N.; SCHREIBER, M.; EGBERS, C.; KRAUTZ, H. J. A comparative study of different CFD-codes for numerical simulation of gas–solid fluidized bed hydrodynamics. **Computers and Chemical Engineerin**, v.39, p.41– 46, 2012.

HODAPP, M. J. **Modelagem e simulação de um leito fluidizado: um estudo comparativo.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas. Campinas – SP. 2009.

MARINI, F. **Simulação de um leito fluidizado aplicando a técnica CFD baseada na teoria cinética do escoamento granular.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Campinas – SP. 2008.

SAMUELSBERG, A.; HJERTAGER, B. An experimental and numerical study of flow patterns in a circulating fluidized bed reactor, *Int. J. Multiphase Flow*, v.22, p.575–591, 1995.

TAGLIAFERRI, A.; MAZZEI, L.; LETTIERI, P.; MARZOCHELLA, A.; OLIVIERI, G.; SALATINO, P. CFD simulation bubbling fluidized bidispese mixtures: Effect of integration method sand restitution coefficient. *Chemical Engineering Science*, n.102, p.324-334, 2013.

TAGHIPOUR, F.; ELLIS, N.; WONG, C. Experimental and computational study of gas–solid fluidized bed hydrodynamics. *Chemical Engineering Science*, v.60, p.6857- 6867, 2005.

OLIVEIRA, T. J. P. **Aspectos fluidodinâmicos de misturas binárias de resíduo de tabaco e areia em Leito Fluidizado.** Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG, 2012.