

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Estudo e validação de um leito fluidizado borbulhante composto por gás-areia

AUTORES:

M. C. S. SANT'ANNA¹, W. R. S. CRUZ², R. A. MEDRONHO³, G. F. SILVA⁴, S. LUCENA⁵

INSTITUIÇÃO:

^{1,5} Universidade Federal de Pernambuco, ²Universidade Tiradentes, ³Universidade Federal do Rio de Janeiro, ⁴ Universidade Federal de Pernambuco.

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8º PDPETRO.

ESTUDO E VALIDAÇÃO DE UM LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE COMPOSTO POR GÁS-AREIA

Abstract

Fluidized beds may be used in many industrial processes, in which, stands out: the gasification of biomass. These devices promote a higher solid-gas contact. Understand the hydrodynamics in these systems is important to optimize the gasification process, so in this computational experiments it is remade work [1] aiming to validate the setup of the fluidized bed. A 2D geometry was constructed after the validation was possible to apply these conditions, the dimensions of the actual equipment (keeping the 2D simplification). As results were obtained values for pressure drop and bed expansion as well as the longitudinal profiles of pressure and volume fraction. The relative errors between the simulations and the experimental data [1] were less than 5.00% during the bubbling fluidization. Comparing the two geometries (A and B), the maximum relative error for fluid dynamic parameters: pressure drop, final bed height (H) and the ratio between the final and the initial heights of the bed (H / H_0) remained in less than 12.00%. Therefore, the build setup serves as a basis for analyzing the bubbling fluidization this equipment, which enables other changes in the conditions of operation of the bed.

Introdução

Gaseificadores de leito fluidizado são caracterizados por apresentarem um excelente contato entre as fases sólidas e gasosa, promovendo uma circulação vigorosa das partículas envolvidas no processo, possibilitando ainda, uma uniformidade da temperatura do leito (Andrade, 2007). Os gaseificadores de leito fluidizado podem ser do tipo borbulhante ou circulante.

Nestes equipamentos 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. A biomassa é introduzida no leito sendo queimada assim que entra em contato com as partículas que o constitui.

Segundo Tagliaferri et al. (2013) a tecnologia de leito fluidizado gás-sólido é adotada em muitos processos industriais, tais como a secagem, congelamento, mistura, bem como em processos catalíticos e térmicos (Bruni et al., 2002; Reuge et al., 2008). A dinâmica do leito é a principal característica de reatores de leito fluidizado. As bolhas induzem um excelente contato gás-sólido e altas taxas de transferências de calor e massa. O comportamento dinâmico do leito fluidizado determina se as partículas (de diferentes tamanhos e/ou densidade) misturam-se ou segregam-se, dependendo da aplicação do leito, uma destas duas condições é desejável. Por exemplo, a segregação é importante para desenvolver classificadores onde é necessário a separação das partículas (Oliveira 2012), enquanto que a mistura é útil em processos que requerem contato íntimo gás-sólido ou sólido-gás. Compreender e prever os fenômenos que ocorrem nestes equipamentos é importante para a concepção, melhoria e otimização das instalações industriais.

Nas últimas décadas com o intuito de otimizar estes processos foi intensificado o uso de técnicas computacionais como a Fluidodinâmica Computacional-CFD (ferramenta para simulação numérica) que resolve as equações de conservação através do método da discretização dos volumes finitos. O grande avanço ocorrido na capacidade de cálculo computacional nos últimos anos possibilitou a modelagem numérica em escoamentos complexos com boa exatidão.

O objetivo geral deste trabalho é validar o modelo hidrodinâmico refazendo o trabalho de Taghipour et al (2005) e usar este modelo de setup na simulação da geometria de dimensões reais do gaseificador de leito fluidizado.

Metodologia

O *software* comercial utilizado foi o ANSYS FLUENT 15.0 e ANSYS CFX 15.0. As simulações foram realizadas em um computador com configuração básica de processador de Intel (R) Xeon (R) CPU E31240 @ 3,30 GHz e memória RAM de 16 Gb.

Para este estudo, foram construídas duas geometrias em 2D e estas foram avaliadas de diferentes formas ao longo deste trabalho. Foram desenvolvidas as geometrias A e B para realizar as simulações hidrodinâmicas, a geometria A foi adotada com a finalidade de validar as simulações. A geometria B é um perfil longitudinal (2D) com as dimensões reais do reator de leito fluidizado do gaseificador existente no Laboratório de Controle Avançado e Otimização de Processos da Universidade Federal de Pernambuco. As dimensões das geometrias estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1- Dimensões das geometrias

Geometria	Altura (h)	Base (d)	Altura do leito (H_0)
A	1,00 m	0,28 m	0,40 m
B	2,00 m	0,58 m	0,40 m

As propriedades do ar estavam disponíveis no banco de dados do FLUENT. As propriedades da areia foram coletadas na literatura (Tabela 2).

Tabela 2 - Propriedades das fases.

Propriedades	Valores	Referência
Densidade do ar	$1,225 \text{ kg m}^{-3}$	ANSYS FLUENT (2011)
Capacidade calorífica do ar	$994 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	ANSYS FLUENT (2011)
Viscosidade do ar	$1,789 \cdot 10^{-05} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$	ANSYS FLUENT (2011)
Diâmetro da areia	275 μm	Taghipour et al. (2005)
Densidade da areia	2500 kg m^{-3}	Kuipers et al. 1992; Adamczyk et al. (2013)

A interação entre as fases em um escoamento granular é dada através da força de arraste e do coeficiente de restituição entre partículas. Nesta etapa do trabalho, a função de arraste foi determinada pela equação de Syamlal-O'Brien (1989) e o valor do coeficiente de restituição partícula-partícula foi igual a 0,9 como utilizado por Pain et al. (2001); Taghipour et al. (2005); Cornelissen et al. (2007); Faísca (2013) e Adamczyk et al. (2013). A viscosidade das partículas foi calculada pela teoria cinética granular adotando-se as correlações descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Modelos utilizados para o cálculo das viscosidades

Viscosidade	Modelo utilizado	Referência
Viscosidade Granular	Syamlal-Obrien	Taghipour et al. (2005); Cornelissen et al. (2007); Faísca (2013)
Viscosidade Colisional	Gidaspow et al.	Cornelissen et al. (2007); Faísca (2013); Adamczyk et al. (2013)

Viscosidade Cinética	Syamlal et al.	Taghipour et al. (2005); Cornelissen et al. (2007); Faísca (2013)
Viscosidade Friccional	Schaeffer	Cornelissen et al. (2007); Faísca (2013); Adamczyk et al. (2013)
Viscosidade global	Lun et al.	Cornelissen et al. (2007); Faísca (2013); Adamczyk et al. (2013)

A resolução do problema foi realizada de forma segregada utilizando o método Phase Coupled SIMPLE para solução do acoplamento pressão-velocidade. Foi utilizada a discretização espacial de segunda ordem para todas as equações, exceto para a fração volumétrica que foi discretizada usando o método QUICK. Para a discretização temporal foi utilizada a discretização de segunda ordem implícita.

Foram realizados testes para alcançar um valor de *time-step* de modo a obter o menor número de Courant (próximo a um), que fornece um cálculo eficiente e estável. Convencionou-se o passo de tempo (*time-step*) fixo de $5 \cdot 10^{-5}$ segundos com 100.000 iterações (5,00 s de simulação). O resumo dos métodos de solução foi apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Resumo dos métodos de solução.

Parâmetros	Método ou valores
Regime	Transiente
Modelo de turbulência	$k-\epsilon$
Acoplamento pressão-velocidade	Phase-Coupled SIMPLE
Gradiente	Least Square Cell-Based
Pressão	Second Order Upwind
Momento	Second Order Upwind
Energia Cinética Turbulenta	Second Order Upwind
Taxa de Dissipação turbulenta	Second Order Upwind
Energia	Second Order Upwind
Fração Volumétrica	QUICK

Para validar as simulações hidrodinâmicas do leito fluidizado borbulhante, foi necessário realizar simulações em diferentes velocidades de entrada de gás (as mesmas utilizadas por Taghipour et al., 2005). A validação dos resultados obtidos foi realizada comparando os resultados obtidos via CFD para a Geometria A com os resultados experimentais encontrados pelo autor. A velocidade do ar na entrada do leito foi variada nos valores de 0,03; 0,10; 0,38; 0,46 e 0,51 ms^{-1} .

Após a validação, foram realizadas simulações para a Geometria B, utilizando-se as mesmas condições utilizadas na geometria A. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados

obtidos para a geometria A. Foram avaliadas as principais diferenças que ocorrem nos parâmetros ao se alterar o tamanho do equipamento. Os parâmetros avaliados foram: queda de pressão, altura final do leito e expansão do leito.

Resultados e Discussão

Geometria A

Objetivando validar o setup do leito fluidizado borbulhante, refez-se as simulações realizadas por Taghipour et al. (2005), utilizando as mesmas condições, exceto o tamanho da malha. E utilizou-se os valores experimentais encontrados pelo autor para comparar os parâmetros da queda de pressão e expansão do leito.

Os resultados simulados foram comparados com os resultados experimentais obtidos pelo autor (Tabela 5), os resultados das simulações não foram comparados tendo em vista que o autor utilizou uma malha mais grosseira, que a utilizada neste trabalho, esta foi obtida através de um teste de malha descrito em Sant'Anna (2014).

Tabela 5. Comparação dos resultados experimentais de Taghipour et al. (2005) com os resultados para a geometria A

Parâmetros Avaliados	Velocidade de entrada do gás (m/s)				
	0,03	0,10	0,38	0,46	0,51
Queda de pressão simulada para a geometria A [Pa].	5424,41	5329,49	5700,05	5706,27	5588,37
Queda de pressão experimental de Taghipour et al. (2005) [Pa].	3630,09	4492,16	5479,62	5746,08	5902,82
Erro relativo entre o valor simulado da geometria A e o valor experimental para a queda de pressão.	49,43%	18,64%	4,11%	0,69%	5,33%
Altura final do leito na geometria A (H) (cm)	0,40	0,44	0,61	0,62	0,67
Altura final do leito experimental de Taghipour et al. (2005) (cm).	0,41	0,46	0,60	0,64	0,66
Erro relativo entre o valor simulado da geometria A e o experimental para a altura do leito.	2,44%	4,35%	1,67%	3,12%	1,51%
Relação de expansão do leito simulado da geometria A (H/H_0).	1,00	1,10	1,52	1,55	1,67
Relação de expansão do leito experimental (H/H_0) de Taghipour et al. (2005).	1,03	1,15	1,49	1,60	1,64

Erro relativo entre o valor simulado da geometria A e o experimental para a expansão no leito.	2,91%	4,35%	2,01%	3,12%	1,83%
--	-------	-------	-------	-------	-------

Os maiores erros relativos para a queda de pressão são observados nas velocidades de 0,03 e 0,10 ms^{-1} , esta discrepância pode ser atribuída as partículas sólidas, que são dominadas pelas forças inter-partículas. O modelo multifásico utilizado para a força de arraste (Syamlal-'Brien) não prediz a simulação das fases gás-sólido com precisão antes de iniciar a fluidização. A Figura 1 ilustra a curva com os valores experimentais para a queda de pressão e os valores obtidos nas simulações realizadas para a geometria A.

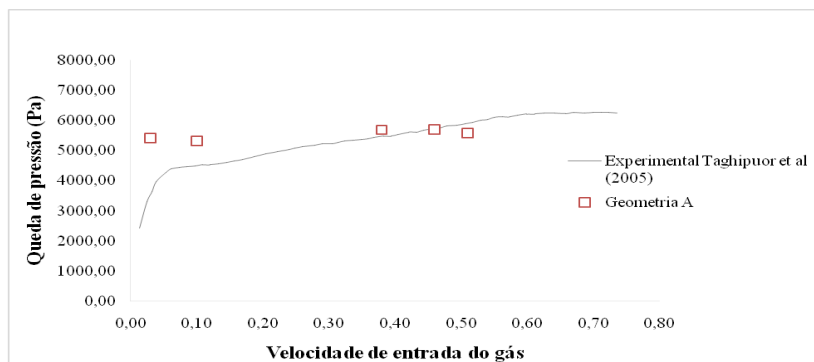


Figura 1 - Queda de pressão experimental versus simulada para a geometria A

Os menores erros relativos para a queda de pressão foram observados quando o leito encontrava-se no regime de fluidização, nas velocidades de 0,38; 0,46 e 0,51 ms^{-1} .

A Figura 2 ilustra a expansão do leito para a curva experimental encontrada por Taghipour et al. (2005) e para os valores simulados para a geometria A.

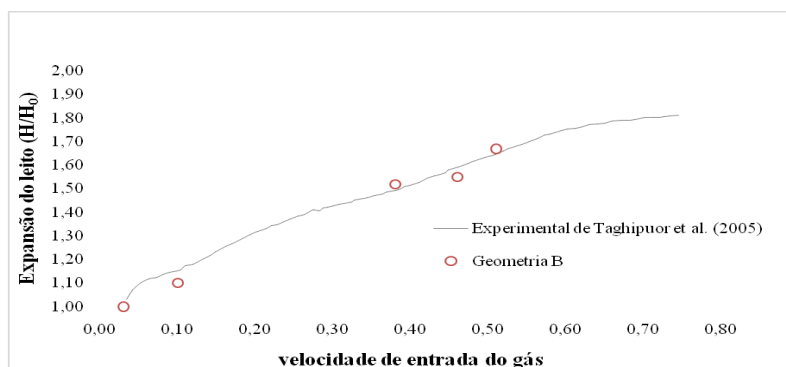


Figura 2. Expansão do leito experimental versus leito simulado na geometria A

Os erros relativos para a altura final do leito e para a expansão do leito nas diferentes velocidades de entrada de gás foram inferiores a 4,35%. Esta simulação teve o intuito de validar a modelagem construída para o estudo hidrodinâmico gás-sólido. Como os resultados estão em concordância com os valores experimentais, é possível aumentar o sistema, para as dimensões utilizadas no processo real.

Geometria B

Após a validação do setup das simulações, foram realizadas simulações com a geometria B, que representa o leito real do processo. Os resultados estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados simulados para a geometria B

Parâmetros Avaliados	Velocidade de entrada do gás (ms^{-1})				
	0,03	0,10	0,38	0,46	0,51
Queda de pressão [Pa]	5701,07	5830,08	6378,41	6098,16	5963,31
Altura final do leito (H) (cm)	0,40	0,44	0,61	0,62	0,67
Expansão do leito (H/H_0) (cm.cm^{-1})	1,00	1,00	1,52	1,67	1,77

Os erros relativos máximos entre a geometria A e B para os parâmetros de queda de pressão, altura final do leito e expansão do leito foram de 11,90%, 9,09% e 9,09 %, respectivamente. A Figura 3 apresenta os perfis longitudinais de fração volumétrica da areia para as diferentes velocidades de entrada de gás (0,03; 0,10; 0,38; 0,46 e 0,51 ms^{-1}).

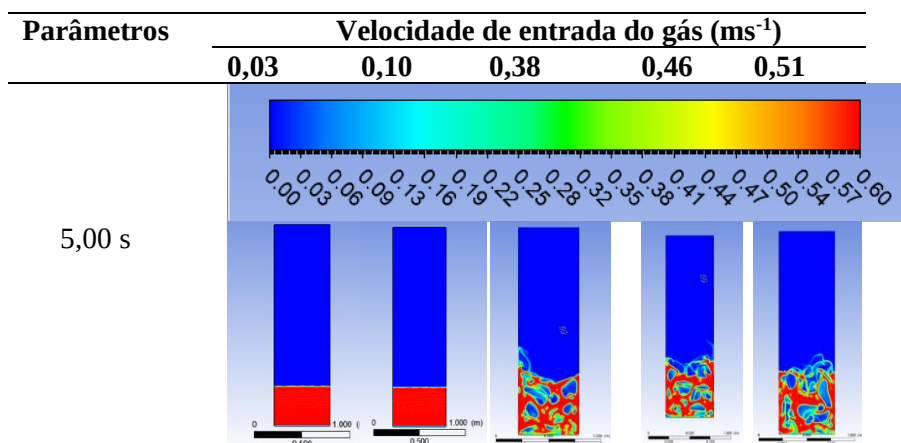


Figura 3. Perfis longitudinais de fração volumétrica (geometria B)

Na Figura 3 é possível visualizar que o leito que se encontra fixo no início da simulação, com o passar do tempo de simulação, passa para um regime borbulhante em velocidades de entrada do gás iguais ou superiores a 0,38 ms^{-1} . As velocidades de 0,03 e 0,10 ms^{-1} não são capazes de promover fluidização borbulhante no leito para o sistema gás-areia.

Conclusões

Este trabalho apresentou resultados significativos, pois conseguimos refazer e validar um setup para um modelo hidrodinâmico de um leito fluidizado, com erros inferiores a 4,35% para o regime borbulhante. Os resultados encontrados nesta simulação apresentaram-se em concordância com os dados encontrados por Taghipuor et al. (2005). Foi então possível, utilizar este setup em um sistema maior, verificamos a modificação nos valores da queda de pressão e expansão do leito, quando se altera as dimensões do equipamento, neste item encontramos os erros relativos máximos para a queda

de pressão, altura final do leito e expansão do leito foram de 11,90%, 9,09% e 9,09 %, respectivamente.

Esse trabalho foi importante, pois é a base de uma série de trabalhos que estamos desenvolvendo, com a utilização de um modelo adequado é possível alterar inúmeras condições e avaliar como esses novos parâmetros interferem na dinâmica do leito.

Referências Bibliográficas

ADAMCZYK, W. P., KLIMANEK, A., BIAŁECKI, R. A., WECEL, G., KOZOŁUB, P., CZAKIERT, T. Comparison of the standard Euler–Euler and hybrid Euler–Lagrange approaches for modeling particle transport in a pilot-scale circulating fluidized bed. *Particuology*. 2013.

ANSYS FLUENT 13.0. Theory Guide. Ansys Inc. USA, 2011.

ANDRADE, R. B. Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2007.

BRUNI, G.; SOLIMENE, R.; MARZOCHELLA, A.; SALATINO, P.; YATES, J. G.; LETTIERI, P. FIORENTINO, M. Self segregation of high volatile fuel particles during devolatilization in a fluidized bed reactor. *Powder Technology*, n.128, p.11–21. 2002.

CORNELISSEN, J. T., TAGHIPOUR, F., ESCUDIÉ, R., ELLIS, N., GRACE, J. R. CFD modelling of a liquid–solid fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, n. 62, p. 6334-6348, 2007.

FAISCA, A. T. A influência da geometria de saída na erosão em risers de fcc: um estudo com CFD. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013.

KUIPERS, J. A. M., PRINS, W. and VAN SWAAIJ, W. P. M. Numerical Calculation of Wall-to-Bed Heat Transfer Coefficients in Gas-Fluidized Beds", Department of Chemical Engineering, Twente University of Technology, in *AIChE Journal*, Vol. 38, n. 7.1992.

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.

PAIN, C.C., MANSOORZADEH, S., DE OLIVEIRA, C. R. E. A study of bubbling and slugging fluidized beds using the two-fluid granular temperature model. *International Journal of Multiphase Flow*, n.27, p.527–551. 1984.

REUGE, N.; CADORET, L.; PANNALA, S.; SYAMLAL, M.; CAUSSAT, B. Multifluid Eulerian modeling of dense gas–solids fluidized bed hydrodynamics: influence of the dissipation parameters. *Chemical Engineering Science*. n.6, p.22, 2008.

SYAMLAL, M., O'BRIEN, T.J. Computer simulation of bubbles in a fluidized bed. *A.I.Ch.E. Symposium Series*, n. 85, p. 22–31. 1989.

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

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.