



Hidrodinâmica de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante: validação da simulação

Hydrodynamics of a bed fluidized gasifier bubbly: validation of the simulation

M. C. S. Sant'Anna^{1*}; W. R. S Cruz²; S. M. Sarmiento¹; G. F. Silva³; R. A. Medronho⁴; S. Lucena¹

¹*Departamento de Engenharia Química/Laboratório de Controle Avançado e Otimização de Processos/ Universidade Federal de Pernambuco, 50670-901, Recife-PE, Brasil*

²*Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos/ Universidade Tiradentes/ Universidade Tiradentes, 49032-490, Aracaju-SE, Brasil*

³*Departamento de Engenharia Química/Laboratório de Tecnologias Alternativa/ Universidade Federal de Sergipe, 49200-000, São Cristóvão-SE, Brasil*

⁴*Escola de Química/Laboratório de Fluidodinâmica Computacional/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, 21941-901, Rio de Janeiro-RJ, Brasil*

[*mikelecandida@gmail.com](mailto:mikelecandida@gmail.com)

(Recebido em 10 de julho de 2015; aceito em 30 de dezembro de 2015)

Leitos fluidizados podem ser utilizados em inúmeros processos industriais, dentro dos quais, destaca-se a gaseificação de biomassa. Estes equipamentos promovem um maior contato sólido-gás. Compreender a hidrodinâmica nestes sistemas é importante para otimizar o processo de gaseificação. Neste trabalho, foram empregados resultados experimentais da literatura na validação do modelo computacional utilizado na simulação do leito fluidizado, usando uma geometria 2D. Após a validação, foi possível aplicar as mesmas condições para o equipamento real (mantendo-se a simplificação 2D). Como resultados, foram obtidos valores para queda de pressão e expansão do leito, bem como os perfis longitudinais de fração volumétrica e pressão. Os erros relativos entre as simulações realizadas e os dados experimentais foram inferiores a 5,0 % durante a fluidização borbulhante. Na comparação entre duas geometrias distintas, os erros relativos máximos para os parâmetros fluidodinâmicos: queda de pressão, altura final do leito e razão entre as alturas final e inicial do leito mantiveram-se abaixo de 12,0 %. Portanto, o modelo computacional empregado serve de base para analisar a fluidização borbulhante, o que possibilita outras modificações nas condições de operação do leito.

Palavras-chave: validação, fluidodinâmica, fluidização

Fluidized beds may be used in many industrial processes, such as gasification of biomass. These beds promote a higher solid-gas contact. Understanding the hydrodynamics of these systems is important to optimize the gasification process. In this work, experimental data from the literature was employed to validate the computational model of the fluidized bed using a 2D geometry. After the validation, it was possible to apply the same conditions to the actual equipment (keeping the 2D simplification). It was then possible to estimate pressure drop and bed expansion as well as the profiles of pressure and volume fraction. The relative errors between the simulations and the experimental data were less than 5.0% during the bubbling fluidization. Comparing two different geometries, the maximum relative error for fluid dynamic parameters: pressure drop, final bed height and the ratio between the final and the initial heights of the bed remained under 12.0%. Therefore, the computational model used in this work serves as a basis for analyzing the bubbling fluidization, which enables the study of other changes in the operational conditions of the fluidized bed.

Keywords: validation, fluid dynamics, fluidization

1. INTRODUÇÃO

Gaseificação é um processo de conversão térmica dos componentes carboníferos do material em produtos gasosos, como gás de síntese [1]. O gás de síntese pode ser utilizado como combustível, gás natural sintético, entre outras aplicações. Os equipamentos que realizam essa conversão são os gaseificadores, e podem ser de vários tipos, destacando-se: os gaseificadores de leito fluidizado borbulhante e o de leito fluidizado circulante.

A composição do gás produzido é afetada pelas condições de operação do gaseificador como a temperatura e a pressão, pelas características do combustível como a umidade, densidade,

granulometria, a composição e o teor de oxigênio no agente de gaseificação [2]. No caso particular de gaseificadores de leito fluidizado a composição ainda pode ser alterada pela dinâmica de fluidização no leito.

A hidrodinâmica de reatores de leito fluidizado tem atraído a atenção de diversos pesquisadores por décadas para entender as complexas interações entre o gás e as partículas [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

A tecnologia de leito fluidizado gás-sólido é adotada em muitos processos industriais, tais como a secagem, mistura, bem como em processos catalíticos e térmicos [11]. A dinâmica do leito é a principal característica de reatores de leito fluidizado. As bolhas promovem o contato gás-sólido e elevadas taxas de transferências de calor e massa.

O comportamento da fase sólida no leito fluidizado determina se as partículas (de diferentes tamanhos e/ou densidade) misturam-se ou segregam-se, dependendo da aplicação do equipamento, uma dessas condições é desejável. Por exemplo, a segregação é importante para desenvolver classificadores onde é necessário a separação das partículas [12], 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 se faz necessário para a concepção, melhoria e otimização das instalações industriais.

Visando simular as condições de operação de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante instalado no Laboratório de Controle Avançado e Otimização de Processos do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco (LACO-DEQ-UFPE), iniciou-se o estudo fluidodinâmico para compreender os fatores que afetam a dinâmica do leito. Sendo o foco desse trabalho a construção e validação de um modelo para realização das simulações hidrodinâmicas desse gaseificador.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Geometria e Condições de Simulação

O ANSYS CFX 15.0 foi utilizado para criação da geometria, malha e visualização dos resultados. O ANSYS FLUENT 15.0 foi utilizado para a instalação das condições de contorno e parâmetros de simulação no setup e para a resolução do problema no solver.

Para a validação do modelo hidrodinâmico do gaseificador recriou-se a geometria utilizada por Taghipour e colaboradores [7], para simplificar as simulações a geometria foi construída em 2D, (Figura 1), sendo denominada de Geometria A. Tal geometria possui as mesmas dimensões da utilizada pelos autores citados em [7]. Os resultados obtidos nas simulações para Geometria A foram comparados com os resultados experimentais dos autores citados em [7].

A geometria B é uma simplificação do tipo 2D feita para o gaseificador de leito fluidizado borbulhante disponível no LACO-UFPE (Figura 2), a malha construída para essa geometria possui 72.500 e foi elaborada conforme a realização de um teste de malha, descrito [13]. O teste de malha consistiu primeiramente na elaboração de uma malha grosseira, em seguida foram criadas malhas mais refinadas, aumentando o número total de elementos, esse teste foi realizado a fim de minimizar a influência da malha no resultado [13].

As dimensões e as principais diferenças nas geometrias A e B encontram-se descritas na Tabela 1.

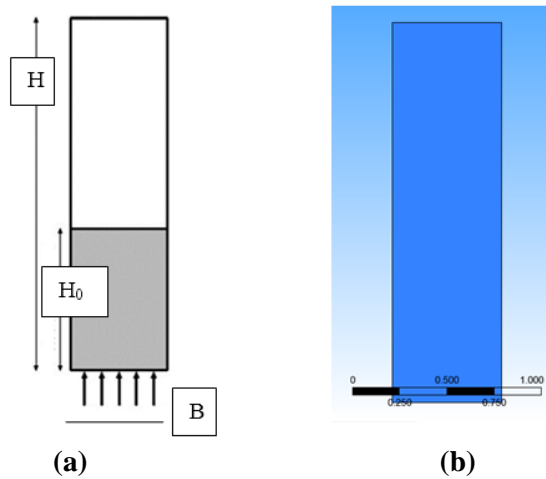


Figura 1: Esquema das geometrias 2D: a) Desenho esquemático, b) Geometria construída no software



Figura 2: Fotografia da planta piloto contendo leito fluidizado borbulhante montado no LACO-DEQ-UFPE (Dimensão do leito 0,58x2,00 m)

Valores para a fração de sólidos (ϕ), o diâmetro das partículas da fase sólida (d_p), e a densidade da fase sólida (ρ) estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Dimensão das geometrias e propriedade físicas da fase sólida

Geometria	H (m)	B (m)	H ₀ (m)	ϕ (cm ³ cm ⁻³)	d _p (μ m)	ρ (Kg.m ⁻³)
A*	1,00	0,28	0,40	60,00	250	2500
B**	2,00	0,58	0,40	60,00	250	2500

A*: Geometria construída com as mesmas dimensões utilizadas por [7].

B**: Geometria construída com as mesmas dimensões do leito fluidizado do LACO-UFPE.

Os sistemas com Geometrias A e B foram simulados para ar-areia, sendo a areia do tipo quartzosa. As propriedades físicas do ar estavam disponíveis no banco de dados do ANSYS FLUENT 15.0 enquanto que as da areia foram obtidas na literatura [7, 14, 15]. As propriedades do gás encontra-se disponíveis na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades físicas da fase gasosa

Propriedades	Valores	Referência
Densidade do ar (kgm^{-3})	$1,23 \times 10^0$	[16]
Capacidade calorífica do ar ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	$9,94 \times 10^2$	[16]
Viscosidade do ar ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)	$1,79 \times 10^{-5}$	[16]
Temperatura (K)	$3,00 \times 10^2$	

A interação entre as fases em um escoamento granular é feita através da força de arraste e do coeficiente de restituição entre partículas. No presente trabalho, a função de arraste foi determinada pela Equação de Syamlal-O'Brien (1989) [17], sendo o valor do coeficiente de restituição partícula-partícula igual a 0,9 [7, 14, 18, 19, 20]. As viscosidades (granular, colisional, cinética, friccional e global) das partículas foram obtidas através da teoria cinética de escoamento granular (Tabela 3).

Tabela 3: Modelos para as viscosidades

Parâmetro	Modelo	Referência
Viscosidade Granular	Syamlal-Obrien	[07, 18, 19]
Viscosidade Colisional	Gidaspow et al.	[14, 18, 19]
Viscosidade Cinética	Syamlal et al.	[07, 18, 19]
Viscosidade Friccional	Schaeffer	[14, 18, 19]
Viscosidade Global	Lun et al.	[14, 18, 19]

A resolução do sistema de equações gerado pelos balanços de massa e de momento foi realizada de forma segregada através do método *Phase Coupled SIMPLE* para solução do acoplamento pressão-velocidade. Foi utilizada a discretização espacial de segunda ordem para todas as equações, exceto para referente fração volumétrica, sendo esta discretizada pelo método QUICK. Para a discretização temporal foi utilizada a discretização de segunda ordem implícita. O *time-step* foi estabelecido em $5,0 \times 10^{-5}$ segundos, resultando em com 100.000 iterações e o tempo total de simulação de 5,0 segundos. Esta condição foi obtida em testes de simulação preliminares (Número de Courant \rightarrow 1,0). O resumo dos métodos de solução está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Resumo dos métodos de solução.

Parâmetros	Método ou valores
Regime	Transiente
Passo de tempo	5.10^{-5} segundos
Tempo total da simulação	5,00 segundos
Modelo de turbulência	k- ϵ
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

O efeito da velocidade superficial do ar sobre parâmetros hidrodinâmicos (queda de pressão, razão entre as alturas final e inicial do leito, fração volumétrica da fase sólida e regime de fluidização) foi avaliado em todas as simulações referentes à hidrodinâmica dos leitos fluidizados borbulhantes realizadas nas Geometrias A e B (sistema ar-areia). A velocidade superficial do ar variou na faixa de $0,03 \text{ m.s}^{-1}$ a $0,51 \text{ m.s}^{-1}$, como foi reportado por [7].

Os estudos foram realizados na seguinte ordem de execução: a) validação do *setup* hidrodinâmico para Geometria A (comparada com dados experimentais obtidas por [7]; b)

simulação da hidrodinâmica do sistema com a Geometria B nas mesmas condições operacionais de [7]; c) comparação entre os valores dos parâmetros hidrodinâmicos simulados para as Geometrias A e B, para se analisar como o aumento das dimensões da altura e base do leito fluidizado influenciam os parâmetros hidrodinâmicos.

Os valores estimados para a queda de pressão para as Geometrias A e B foram comparados com aqueles obtidos teoricamente pela equação de pressão. (Equação 1). Os perfis dinâmicos para queda de pressão e fração de sólidos foram obtidos nos seguintes tempos de simulação: 0,25; 1,25; 2,50; 5,00 s.

$$P = \frac{m_s g}{A} \quad 01$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Validação da Geometria A

Os valores estimados para parâmetros hidrodinâmicos (queda de pressão e expansão do leito) foram comparados com aqueles experimentais obtidos na literatura [7] (Tabela 5).

Tabela 5: Comparação entre parâmetros hidrodinâmicos obtidos com a Geometria A e em [7]

V_g ($m.s^{-1}$)	ΔP (Pa)			H_f (m)			H_f/H_o ($m.m^{-1}$)		
	GA*	T**	Erro Relativo	GA	T	Erro Relativo	GA	T	Erro Relativo
0,03	5424,41	3630,09	49,43%	0,40	0,41	2,44%	1,00	1,03	2,91%
0,10	5329,49	4492,16	18,64%	0,44	0,46	4,35%	1,10	1,15	4,35%
0,38	5700,05	5479,62	4,11%	0,61	0,60	1,67%	1,52	1,49	2,01%
0,46	5706,27	5746,08	0,69%	0,62	0,64	3,12%	1,55	1,60	3,12%
0,51	5588,37	5902,82	5,33%	0,67	0,66	1,51%	1,67	1,64	1,83%

*GA: Geometria A

**T: Taghipour e colaboradores [7]

Como pode ser observado na Tabela 5, os parâmetros hidrodinâmicos avaliados (Δp , H_f e H_f/H_o) dependem da velocidade superficial de entrada do gás. Ao comparar-se os valores obtidos na simulação com os valores experimentais relatados por [7], nas velocidades superficiais do gás de $0,03 m.s^{-1}$ e $0,10 m.s^{-1}$ os erro relativos são maiores (49,43% e 18,64%) que os obtidos para as demais (faixa: 0,69% a 5,33%). A possível causa dessa alta discrepância entre os valores obtidos para queda de pressão para a simulação da Geometria A e os dados experimentais da literatura foi devido a utilização do modelo de Syamlal-O'Brien para a força de arraste, tal modelo não prediz a queda de pressão com precisão, na simulação das fases gás-sólido onde o leito ainda não encontra-se fluidizado, bem como próximo ao início da fluidização, para o parâmetro da pressão. Isso foi observado na literatura para os três modelos utilizados para a força de arraste: Syamlal-O'Brien; Gidaspow e Wen e Yu [7,10].

As comparações entre os comportamentos da queda da pressão e expansão do leito para Geometria A, obtidos por simulação, e aqueles experimentais reportados em [7], em relação à velocidade de entrada do gás podem ser observadas nas Figuras 3 e 4.

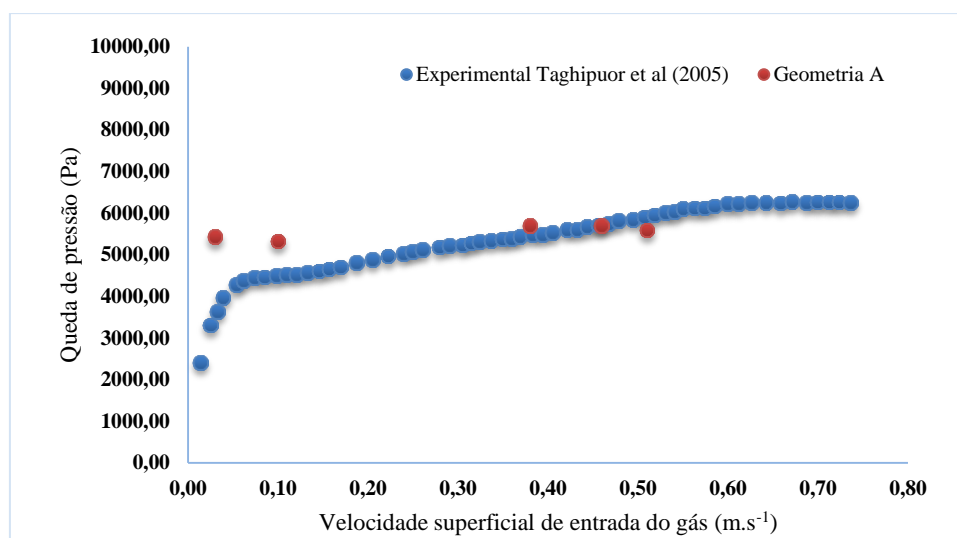


Figura 3: Queda de pressão experimental versus simulada para a Geometria A

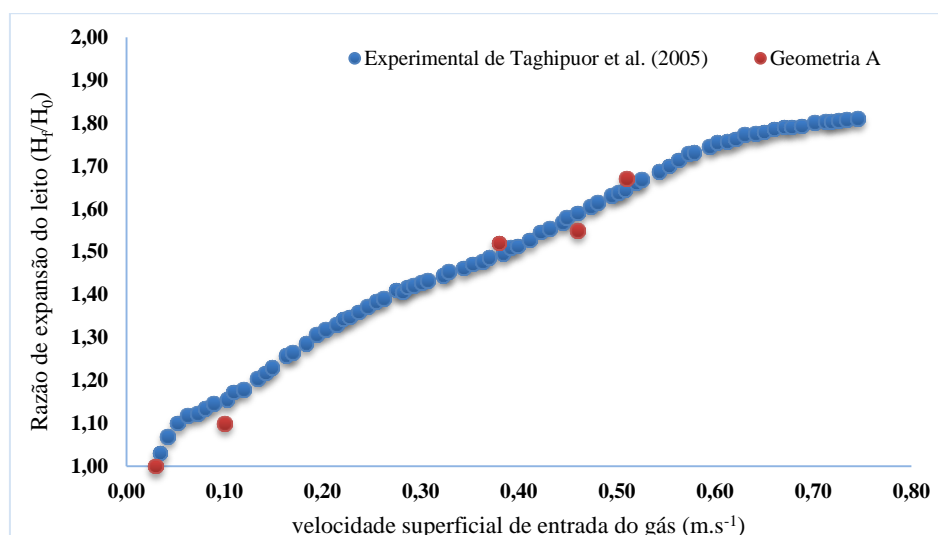


Figura 4: Expansão do leito experimental versus leito simulado para a Geometria A

Os menores erros relativos para a queda de pressão (faixa: 0,69% a 5,33%, descrito na Tabela 5) foram observados quando o leito encontra-se em regime de fluidização borbulhante (velocidades na faixa de 0,38 - 0,51 m.s^{-1}) sendo possível a validação da simulação para essas condições.

Os erros relativos para a altura final do leito e para a razão de expansão do leito nas diferentes velocidades de entrada de gás foram inferiores a 4,35% (conforme descrito na Tabela 5). É possível concluir que o modelo hidrodinâmico simulado pode ser utilizado para o estudo do regime borbulhante.

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 para o regime borbulhante, é possível aumentar a dimensão do sistema, para as dimensões utilizadas no processo real.

3.2 Geometria B

Após a validação das simulações obtidas para a Geometria A, foram realizadas simulações com a Geometria B, que representa o leito real do processo. Estas simulações foram realizadas para diferentes velocidades superficiais de entrada do gás (faixa: 0,03-0,51 m.s^{-1}). Os resultados

estão descritos na Tabela 6. Reapresentam-se os valores obtidos para a Geometria A com intuito de observar os parâmetros avaliados e a modificação desses com a alteração do tamanho do reator.

Tabela 6: Comparação dos resultados obtidos com as geometrias B e A

V_g ($m.s^{-1}$)	ΔP (Pa)			H (m)			H_f/H_0 ($m.m^{-1}$)		
	GA*	GB**	Erro Relativo	GA	GB	Erro Relativo	GA	GB	Erro Relativo
0,03	5424,41	5701,07	5,10%	0,40	0,40	0,00%	1,00	1,00	0,00%
0,10	5329,49	5830,08	9,50%	0,44	0,40	9,09%	1,10	1,00	9,09%
0,38	5700,05	6378,41	11,90%	0,61	0,61	0,00%	1,52	1,52	0,00%
0,46	5706,27	6098,16	6,87%	0,62	0,67	8,06%	1,55	1,67	7,74%
0,51	5588,37	5963,31	6,71%	0,67	0,61	5,97%	1,67	1,77	5,99%

*GA: Geometria A

**GB: Geometria B

A realização dessa comparação foi necessária para identificarmos as mudanças que ocorrem na fluidização borbulhante com o aumento nas dimensões do sistema. Os erros relativos máximos para ΔP , H_f e H_f/H_0 foram de 11,90%, 9,09% e 9,09 %, respectivamente.

A queda de pressão calculada para as Geometrias A e B apresentaram o mesmo valor de 5.888 Pa para ambas as geometrias, por serem quase simétricas. Esse valor foi calculado (através da Equação 1) enquanto o leito estava fixo e a porosidade foi mantida a 0,40. A queda de pressão se altera durante o período de fluidização devido a distribuição de sólidos que se modifica em função da alteração do volume de sólidos e consequentemente da porosidade do leito em um determinado instante.

A Figura 5 apresenta os perfis longitudinais de fração volumétrica da areia para os diferentes tempos de simulação (0,02 e 5,00 s) e para as diferentes velocidades superficiais do gás (0,03; 0,10; 0,38; 0,46 e 0,51 $m.s^{-1}$).

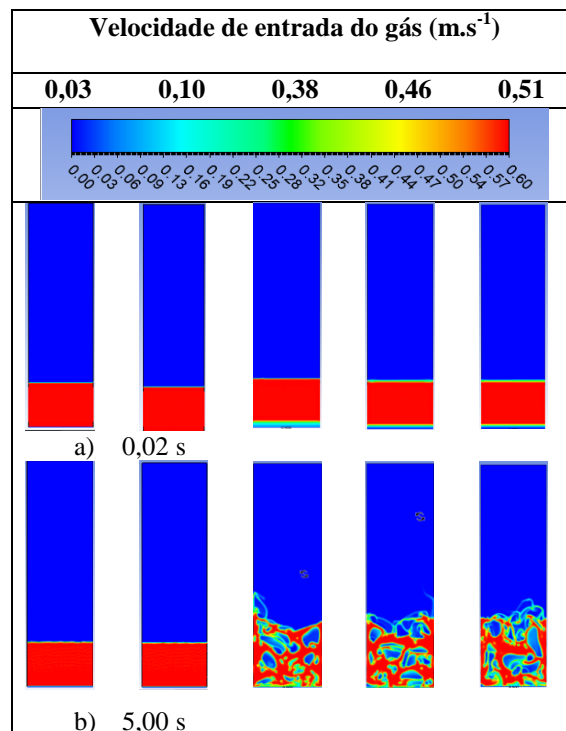


Figura 5: Perfis longitudinais de fração volumétrica (geometria B, sistema gás-areia), nos tempos: a) 0,02 s, b) 5,00 s.

Na Figura 5 é possível visualizar que no tempo de 0,02 segundos o leito permanece fixo para todas as velocidades, com o passar do tempo de processo, o leito alcança o regime borbulhante em velocidades superficiais do gás iguais ou superiores a $0,38 \text{ m.s}^{-1}$. Aos 5,00 segundos de processo, a simulação alcançou o regime pseudo-estacionário e o regime borbulhante. Nessa situação, a expansão do leito não sofre mais diferenças significativas, mas as bolhas diferem de posição, tamanho e formato. Exatamente como visualizado nos perfis de fração volumétrica do experimento real de [7]. As velocidades de $0,03$ e $0,10 \text{ m.s}^{-1}$ não foram capazes de promover fluidização borbulhante no leito para o sistema gás-areia.

4. CONCLUSÃO

A validação do modelo foi realizada comparando-se os resultados simulados para o sistema gás-areia (geometria A) com os resultados experimentais encontrados em [7]. Esses resultados mostraram que os erros relativos foram pequenos para os parâmetros analisados (Δp : 0,69% à 5,33%; H_f/H_0 : 1,83 à 3,12%) quando o leito encontrava-se em regime borbulhante (velocidade superficial de entrada do gás $\geq 0,38 \text{ m.s}^{-1}$).

Este trabalho apresentou resultados significativos, pois conseguimos refazer e validar um setup para um modelo hidrodinâmico de um leito fluidizado borbulhante. Os resultados encontrados nesta simulação apresentaram-se em concordância com os dados encontrados por [7].

Foi então possível, utilizar este setup no sistema maior (planta piloto de gaseificação), então 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 razão entre a altura final e inicial foram de 11,90%, 9,09% e 9,09 %, respectivamente.

Através dos cálculos de pressão foi possível observar que o valor da queda de pressão calculada é igual em ambas as geometrias A e B (5.888 Pa).

Com a utilização de um modelo adequado será possível alterar inúmeras condições e avaliar como esses novos parâmetros interferem na dinâmica do leito, sendo possível propor melhorias na operacionalização do equipamento.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Speight, J G, Luque R. Gasification for synthetic fuel production. Fundamentals, Processes and Applications, 2015; 3-27, doi: 10.1016/B978-0-85709-802-3.00001-1.
2. Andrade RB. Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental. [Tese]. Itajubá (MG): Universidade Federal de Itajubá; 2007.
3. Berruti F, Chaouki J, Godfroy L, Pugsley T, Patience G. Hydrodynamics of circulating fluidized bed risers: a review, Canadian Journal Chemical Engineering, 1995; 73: 579-602.
4. Samuelsberg A, Hjertager B. An experimental and numerical study of flow patterns in a circulating fluidized bed reactor, International Journal of Multiphase Flow; 1995; 22:575-591.
5. Benyahia S, Syamlal M, O'Brien T J. Summary of MFIx equations, 2005.
6. Goldschmidt M, Kuipers J, Van Swaaij W. Hydrodynamic modelling of dense gás-fluidized beds using the kinetic theory of granular flow: effect of restitution coefficient on bed dynamics, Chemical Engineering Science, 2001; 56: 571.
7. Taghipour F, Ellis N, Wong C. Experimental and computational study of gas-solid fluidized bed hydrodynamics. Chemical Engineering Science. 2005; 60: 6857-6867, doi: 10.1016/j.ces.2005.05.044.
8. Almuttahir A, Taghipour F. Computational fluid dynamics of high density circulating fluidized bed riser: study of modelling parameters, Powder Technology, 2008; 185: 11-13.
9. Armstrong L M, Gu S, Luo K H. Study of wall-to-bed heat transfer in a bubbling fluidized using the kinetic theory of granular flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010; 53: 4949-4959.
10. Herzog N, Schreiber M, Egbers C, Krautz H J. A comparative study of different CFD-codes for numerical simulations of gas-solid fluidized bed hydrodynamics. Computers and Chemical Engineering, 2012; 39: 41-46.

11. Tagliaferri A L, Lettieri P, Marzocchella A, Olivieri G, Salatino, P. CFD simulation bubbling fluidized bidispese mixtures: Effect of integration method sand restitution coefficient. *Chemical Engineering Science*, 2013; 102: 324-334.
12. Oliveira T J P. Aspectos fluidodinâmicos de misturas binárias de resíduo de tabaco e areia em Leito Fluidizado. [Dissertação]. Uberlândia (MG):Universidade Federal de Uberlândia; 2012.
13. Sant'Anna M C S, Sarmento S M, Silva G F, Medronho, R A, Lucena, S. Escolha do modelo de turbulência para um leito fluidizado, 2015; 11: 1-11, doi: 10.14808/sci.plena.2015.104203.
14. Adamczyk W P, Klimanek A, Bialecki RA, Wecel G, Kozolub 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; 594: 1-9, doi:10.1016/j.partic.2013.06.008.
15. Kuipers J A M, Prins W, Van Swaaij W P M. Numerical Calculation of Wall-to-Bed Heat Transfer Coefficients in Gas-Fluidized Beds, *AICHe Journal*.1992; 38:7.
16. ANSYS Fluent 13.0. Theory Guide. Ansys Inc. USA. 2011.
17. Syamlal M, O'Brien T J. Computer Simulation of Bubbles in Fluidized Bed. *AICHe Symp*. 1989; 85:22-31
18. Faísca A T. A influência da geometria de saída na erosão em risers de fcc: um estudo com CFD. [Dissertação], Rio de Janeiro (RJ): Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2013.
19. Cornelissen J T, Taghipour F, Escudie R, Ellis N, Grace J R. CFD modelling of a liquid–solid fluidized bed. *Chemical Engineering Science*. 2007; 62: 6334-6348. doi:10.1016/j.ces.2007.07.014
20. Pain C C, Mansoorzadeh S, Oliveira C R E. A study of bubbling and slugging fluidized beds using the two-fluid granular temperature model. *International Journal of Multiphase Flow*. 1984; 27: 527-551.