

ESTUDO DA VELOCIDADE DE MÍNIMA FLUIDIZAÇÃO DE UM GASEIFICADOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE COM MODELAGEM EM CFD

Letícia de Oliveira Silva Della Colletta, letolivsilva@gmail.com¹

Rubenildo Vieira Andrade, ruben@unifei.edu.br¹

Electo Eduardo Silva Lora, electo@unifei.edu.br¹

Ramiro Gustavo Ramirez Camacho, Ramirez@unifei.edu.br¹

Diego Mauricio Yepes Maya, yepesmayadiego@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1030, Bairro Pinheirinho, Itajubá-MG, Brasil.

Resumo Neste trabalho realizou-se o cálculo da velocidade de mínima fluidização de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante com diferentes metodologias e a modelagem do mesmo. Devido à falta de uma metodologia definida para o projeto deste tipo de reator, buscou-se encontrar entre as equações escolhidas para o cálculo da velocidade de mínima fluidização, aquela que melhor descreve-se a velocidade para o caso de estudo. Para a modelagem, foi feita a geometria e malha em 2D utilizando o software ANSYS ICEM 17.2®. Com a malha obtida, foi realizada a modelagem do reator para a condição a frio, para a observação da fluidodinâmica do leito de material inerte. Para simular a fluidodinâmica de gaseificação no processo de modelagem, foi utilizada a fluidodinâmica computacional (Computational Fluid Dynamics – CFD) a partir do software ANSYS Fluent v.17.2™. Os parâmetros físicos e químicos que influenciam no funcionamento do gaseificador e dos métodos de modelagem aplicados foram estudados de forma a analisar a gaseificação de biomassa. Essa análise visou comparar os valores encontrados a partir do modelo com os valores encontrados com a utilização de equações encontradas na literatura

Palavras-chave: Gaseificação, modelagem, velocidade de mínima fluidização.

1. INTRODUÇÃO

O processo de gaseificação é uma técnica que data do século XVII (Miller, 2005), desenvolvido em princípio para a produção de um gás combustível utilizado na iluminação de vias públicas e residências. Inicialmente produzido a partir do carvão, com pesquisas sobre a gaseificação de lenha e da utilização de gases resultantes da carbonização da madeira (Kaupp; Goss, 1981). Este gás continha 50% de hidrogênio, com 3 a 6% de monóxido de carbono e o restante sendo gás carbônico e metano (Breault, 2010). Processo considerado uma forma mais eficiente para fins como iluminação, aquecimento e cocção que a queima direta de combustíveis sólidos e líquidos (Cardoso, 2013).

Segundo Belgiorno *et al.* (2003) os gaseificadores podem ser divididos em três grupos principais: de leito fixo, de leito fluidizado e configurações mistas. Estes gaseificadores podem ser subdivididos em leito fixo co-corrente, leito fixo contra corrente, leito fixo de fluxo cruzado, leito fluidizado borbulhante e leito fluidizado circulante.

Nos gaseificadores de leito fluidizado borbulhante, um leito de material inerte fica sobre uma placa distribuidora, por onde é introduzido o agente de gaseificação. A partir da introdução deste agente, são formadas bolhas dentro do reator. Enquanto as bolhas ascendem no reator, há transferência de massa entre o gás reagente do interior da bolha e o exterior, entrando em contato com as partículas sólidas e formando o gás resultante. Por isso é chamado gaseificador de leito fluidizado borbulhante (Wester & Wammes, 1992).

O leito do gaseificador é composto por um material granular que varia de 0,1 a 1 mm dependendo do tipo de gaseificador. O princípio da fluidização, descrito por Kunii & Levenspiel (1991), se inicia no instante que o peso efetivo das partículas do leito se iguala à força de arraste do gás em movimento. Para um conjunto de partículas, a velocidade superficial do gás deve ser tal que a velocidade superficial real do gás nos limites das partículas seja suficiente para causar a suspensão do conjunto (Gibilaro, 2011).

Um dos principais fatores para a descrição da fluidização do leito é a velocidade mínima de fluidização, velocidade a partir da qual as partículas contidas no leito passam a ficar suspensas sem que haja seu arraste, ou seja, o peso das partículas se iguala à força de arraste do gás injetado no leito (Kunii & Levenspiel, 1991). Na literatura podem ser encontradas diversas formas de cálculo da velocidade de mínima fluidização. Neste trabalho foram analisadas três formas diferentes para o cálculo da velocidade de mínima fluidização.

Com o auxílio da tecnologia atual é possível simular as reações fluidodinâmicas que ocorrem em um gaseificador sem a necessidade de construção, reduzindo custos e tempo na realização de pesquisas. A utilização de CFD

(*Computational Fluid Dynamics*) para modelagem de reações fluidodinâmicas vem sendo utilizada desde o fim da década de 1950, com o aumento da capacidade computacional e redução dos custos essa aplicação tornou-se cada vez mais utilizada, capacitando a utilização de diversos modelos para a predição de fenômenos físico-químicos (Anderson *et al.*, 2009).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL (OU PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL)

2.1. Metodologia de cálculo da velocidade de mínima fluidização

Na literatura é possível encontrar diversas metodologias para o cálculo da velocidade de mínima fluidização para um gaseificador de leito fluidizado, neste trabalho foram abordadas as metodologias abordadas por Kunii & Levenspiel (1991), Nikoo & Mahinpey (2008) e Santana & D'Ávila (1986).

A metodologia desenvolvida por Kunii & Levenspiel (1991) depende do número de Reynolds do escoamento (Equações 3, 4 e 5), calculado a partir das constantes experimentais c_1 e c_2 , como demonstrado na Equação 1.

$$\text{Sendo Reynolds:} \quad \text{Re} = [c_1^2 + c_2 Ar]^{0.5} - c_1 \quad 1$$

$$\text{Onde:} \quad Ar = \frac{(\rho_s - \rho_g) \rho_g d_p^3 g}{\mu_g^2} \quad 2$$

$$\text{Para Reynolds} < 20: \quad v_{mf} = \frac{g(\rho_s - \rho_g) d_p^2 \varepsilon_{mf}^3 \phi^2}{150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})} \quad 3$$

$$\text{Para } 20 < \text{Re} < 1000: \quad \frac{d_p \rho_g v_{mf}}{\mu_g} = \left(c_1^2 + c_2 \frac{d_p^2 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_g^2} \right)^{\frac{1}{2}} - c_1 \quad 4$$

$$\text{Para Reynolds} > 1000: \quad v_{mf} = \sqrt{\frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g \varepsilon_{mf}^3}{1,75 \rho_g}} \quad 5$$

A metodologia desenvolvida por Santana & D'Ávila (1986), assim como a descrita anteriormente, utiliza o número de Reynolds (Equação 1) para o cálculo da velocidade de mínima fluidização (Equação 6).

$$v_{mf} = \frac{\text{Re} \mu_g}{\rho_g d_p} \quad 6$$

Nesta metodologia é necessária a verificação da velocidade calculada utilizando uma segunda equação (Equação 7), que deve ser igualada à Equação de Ergun para a validação do valor calculado inicialmente.

$$\frac{\Delta P}{H_{mf}} = f_m \frac{v_{mf}^2}{\sqrt{k}} \quad 7$$

$$\frac{\Delta P}{H_{mf}} = (\rho_s - \rho_g)(1 - \varepsilon)g \quad (\text{Equação de Ergun}) \quad 8$$

Onde:

$$f_m = \frac{1}{\text{Re}} + c \quad 9$$

$$c = \frac{0,143}{\varepsilon^{1,5}} \quad 10$$

$$k = \frac{(d_p \phi)^2 \varepsilon}{36 \beta (1 - \varepsilon)^2} \quad 11$$

A metodologia utilizada por Nikoo & Mahinpey (2008) (NIKOO; MAHINPEY, 2008) considera apenas o número de Arquimedes para o cálculo da velocidade (Equação 12), sendo calculada para leitos de partículas finas.

$$v_{mf} = \frac{33,7\mu}{\rho_g d_p} \left(\sqrt{1 + 3,59 \cdot 10^{-5} Ar} - 1 \right) \quad 12$$

Para os cálculos foram adotados dados da literatura, descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no cálculo da velocidade de mínima fluidização

Parâmetro	Abreviatura	Valor
Aceleração da gravidade [m/s ²].	g	9,875
Massa específica do material sólido do leito [kg/m ³] (ANDRADE, 2007)	ρ_g	1900
Massa específica do gás [kg/m ³] (ANDRADE, 2007)	ρ_s	1,293
Massa específica do ar [kg/m ³] (ANDRADE, 2007)	ρ_{ar}	1,293
Porosidade do material do leito nas condições mínimas de fluidização (ANDRADE, 2007)	ε_{mf}	0,474
Porosidade do material inerte do leito na condição de leito estacionário (ANDRADE, 2007)	ε_f	0,45
Viscosidade dinâmica do gás [Pa.s] (ANDRADE, 2007)	μ_g	$1,72 \cdot 10^{-5}$
Viscosidade dinâmica do ar [kg/ms] (ANDRADE, 2007)	μ_{ar}	$1,72 \cdot 10^{-5}$
Diâmetro da esfera com o mesmo volume que a partícula [m] (ANDRADE, 2007)	ϕ	$3 \cdot 10^{-4}$
Esfericidade das partículas do leito [adimensional]. (ANDRADE, 2007)	d_p	1
C1*		33,7
C2*		0,041

*Constantes experimentais de Wen e Yu.

2.2. Desenvolvimento do modelo em CFD

Para o desenvolvimento do modelo em CFD utilizou-se o software ANSYS FluentTM a partir de uma geometria em 2D, determinada por um corte vertical de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante. O gaseificador em questão foi dimensionado segundo o procedimento apresentado por Gomez (1996), considerando-se um gaseificador de 10kW de potência que utiliza bagaço de cana-de-açúcar como combustível.

A geometria é constituída por um corte vertical do gaseificador (Figura 1) que tem 2,42 m de altura, com 25,6 cm de diâmetro e 50 cm de altura no leito e 32cm na região de *freeboard*. Nesta geometria 2D utilizou-se 7 bicos injetores, com duas entradas de ar de 3 mm por bico. A geometria e malha foram desenvolvidas com a utilização do software ANSYS ICEM®, gerando uma malha estruturada de elementos quadráticos, com 366822 elementos.

O modelo foi desenvolvido para a observação da fluidodinâmica do leito na injeção de ar no a partir dos bicos injetores, como projetado. Pode-se observar na Figura 1 um esquema simplificado do caso a ser estudado no modelo.

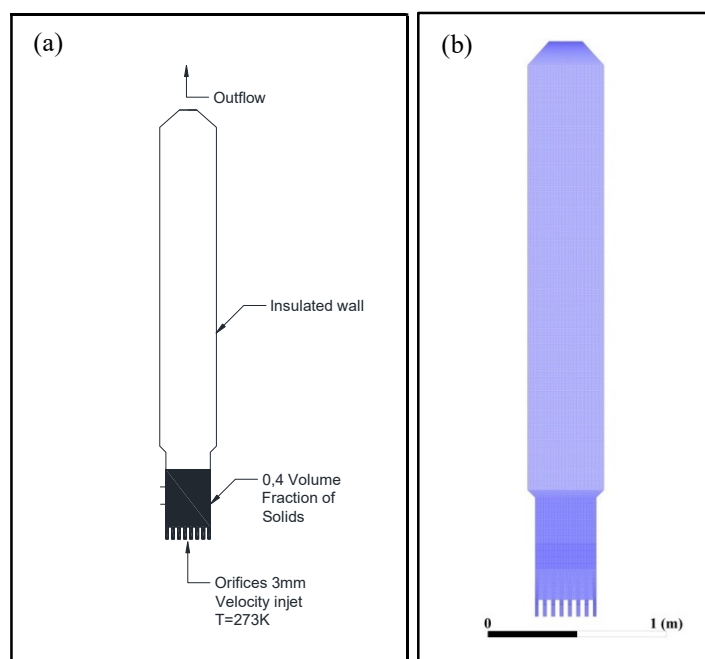


Figura 1– (a) Esquema simplificado da geometria utilizada com as condições de contorno do modelo; (b) Figura da malha desenvolvida para as simulações

O leito inerte do gaseificador é constituído por alumínio sólido granular de diâmetro de 300 μm , considerado como um segundo fluido. A saída de gás tem 10 cm localizada no topo do gaseificador. A simulação foi realizada considerando a vazão de ar de $0,011\text{ m}^3/\text{s}$, equivalente a um fator de ar de 0,3.

As condições de contorno do modelo são 14 entradas para ar como entradas de velocidade (*velocity inlet*), todas as paredes são isoladas (*insulated wall*), o leito de material inerte é localizado de 0 a 40 cm por toda a extensão do diâmetro do leito com uma fração volumétrica (*volume fraction*) igual a 0,4. A região de saída é configurada como um fluxo de saída (*outflow*). O modelo foi configurado segundo a Tabela 2.

Tabela 2 – Modelos e métodos numéricos utilizados na modelagem e simulação

Características	Método
Modelos	Multifásico Euleriano
	Turbulência k- ϵ RNG Disperso
	Energia
	Arraste Syamlal O'Brien
Equações	Método numérico
Resolução	Baseado em pressão
Formulação	Implícita
Gradiente	<i>Green-Gauss</i> baseado em células
Tempo	Transiente
Formulação transiente	Primeira Ordem <i>Upwind</i>
Acoplamento pressão-velocidade	Acoplamento de fase simples
Discretização espacial	Segunda Ordem <i>Upwind</i>
Solução	Valor
Passo de tempo	0,05 s
Número de passos	100
Interações por passo	50

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do cálculo da velocidade de mínima fluidização foram dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores das velocidades de mínima fluidização calculadas a partir de diferentes equações.

Autor	Equação	Velocidade (m/s)
Kunii & Levenspiel (1992)	$v_{mf} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2 \epsilon_{mf}^3 \phi^2}{150\mu(1 - \epsilon_{mf})}$	0,13
Nikoo & Mahinpey (2008)	$v_{mf} = \frac{33,7\mu}{\rho_g d_p} \left(\sqrt{1 + 3,59 \cdot 10^{-5} Ar} - 1 \right)$	0,06
Santana e D'ávila (1986)	$v_{mf} = \frac{Re \mu_g}{\rho_g d_p}$	0,57

Vale ressaltar que as equações para o cálculo da velocidade dependem apenas das propriedades do material, não levando em consideração a geometria do reator utilizado. Também se pode observar que os resultados para cada equação diferem significativamente. Na Figura 2 pode-se observar o desenvolvimento do leito de alumina em 5 segundos. No gráfico 1 é apresentada a velocidade do ar no centro do leito.

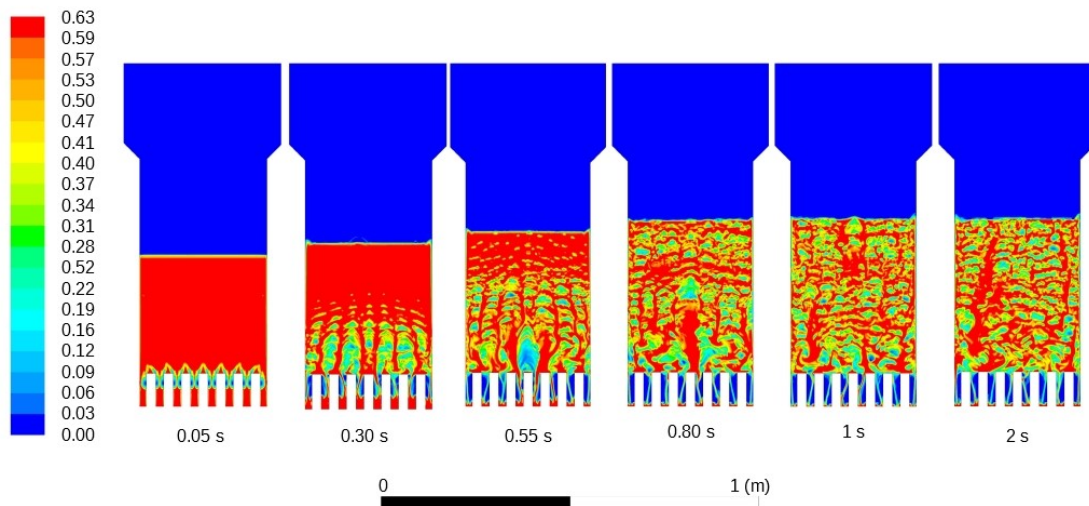


Figura 2– Desenvolvimento do leito inerte de alumina através do tempo

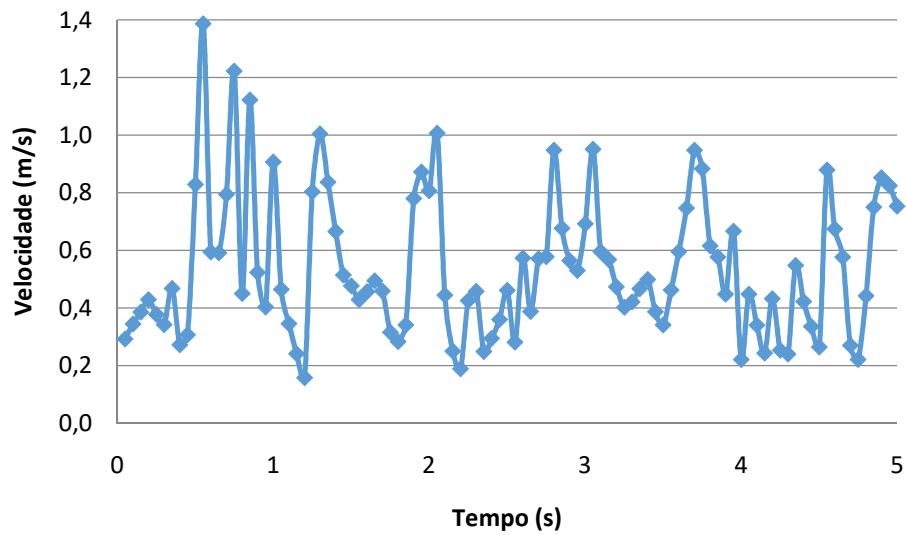


Figura 3– Gráfico da velocidade do ar no ponto central do leito no tempo

A velocidade média do ar obtida a partir da simulação foi de 0,54 m/s e é suficiente para a observação da fluidização do leito. Dessa forma, descarta-se a velocidade calculada a partir da equação de Santana & D'Ávila (1986).

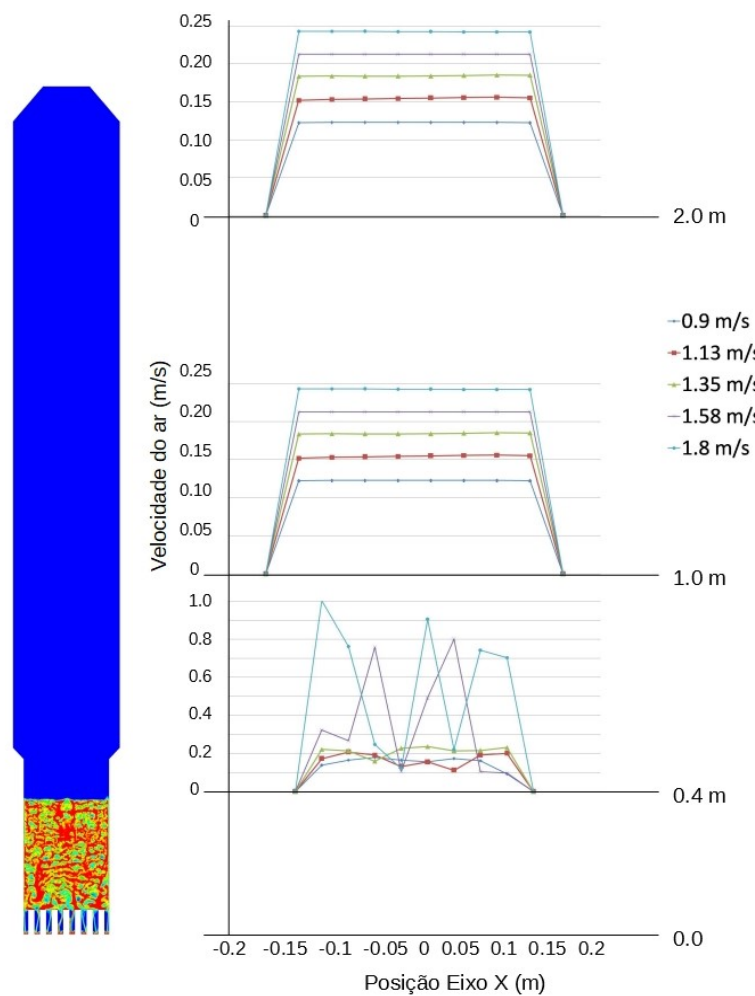


Figura 4 – Perfis de velocidade do ar no eixo horizontal para diferentes alturas do leito.

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados da simulação pode-se concluir que a equação que melhor descreve a velocidade de mínima fluidização para o caso de estudo é a equação desenvolvida por Kunni & Levenspiel (1991).

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela CAPES e Fapemig através de seu programa de financiamento para pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Anderson, J. D. *et al.* 2009. *Computational fluid dynamics: an introduction*. 3ª Edição ed. Waterloo: Springer-Verlag Berlin Heidelberg,
- Andrade, R. V. 2007. Gaseificação de biomassa : uma análise teórica e experimental gaseificação de biomassa : uma análise teórica e experimental. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Itajubá- MG – Brasil.
- Belgiorno, V. *et al.* 2003. Energy from gasification of solid wastes. *Waste management*. v. 23, n. 1, p. 1–15.
- Breault, R. W., 2010. Gasification processes old and new: a basic review of the major technologies. *Energies*. v. 3, p. 216–240.
- Cardoso, M. T., 2013. *Da iluminação das cidades no século XIX às biorrefinarias modernas: história técnica e econômica da gaseificação*. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo – USP. São Paulo – SP. Brasil.
- Gibilaro, L. G., 2011 *Fluidization dynamics*. Oxford: Butterworths-Heinemann.
- Gómez, E. O., 1996. *Projeto, construção e avaliação preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar*. Dissertação (Mestrado) Campinas, SP – Brasil.
- Kaupp, A.; Goss, J. R., 1981 *State of the art report for small scale (to 50 kw) gas producer - engine systems*. University of California.
- Kunii, D.; Levenspiel, O., 1991. *Fluidization engineering*. 2. ed. Stoneham, MA. v. 1.
- MILLER, B. G., 2005. *Coal energy systems*. 1. ed. Boston: Elsevier Academic Press. v. 53.
- Nikoo, M. B.; Mahinpey, N., 2008. Simulation of biomass gasification in fluidized bed reactor using aspen plus. *Biomass and bioenergy*. v. 32, n. 12, p. 1245–1254.
- Santana, J. S.; D'ávila, C. C., 1986. *Design aspects of fluidized bed combustors in: special topics in particulate systems*. Internal Report. São Carlos – Brazil.
- Wester, R. K.; Wammes, W. J. A. Werther, 1992. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, 1992. n. 52, p. 723–725.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STUDY OF MINIMUM FLUIDIZATION VELOCITY IN A BUBBLING FLUIDIZED BED GASIFIER THROUGH CFD

Letícia de Oliveira Silva Della Colletta, letolivsilva@gmail.com¹

Rubenildo Vieira Andrade, ruben@unifei.edu.br¹

Electo Eduardo Silva Lora, electo@unifei.edu.br¹

Ramiro Gustavo Ramirez Camacho, Ramirez@unifei.edu.br¹

Diego Mauricio Yepes Maya, yepesmayadiego@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1030, Bairro Pinheirinho, Itajubá-MG, Brasil.

Abstract. This study presents the minimum fluidization velocity calculation with different methodologies and the modeling of a bubbling fluidized bed gasifier. Due to the lack of a defined methodology for the design of this type of reactor, different methodologies are applied in order to design the gasifier as well as its parameters, so the modeling was developed in order to determine which equations fits better for the minimum fluidization velocity calculation. A 2D geometry and mesh were made using ANSYS ICEM 17.2® software for the modeling. With the obtained mesh, the modeling of the reactor was performed for a cold condition in order to observe the fluid dynamics of the inert bed material. To simulate the fluid dynamics of gasification in the modeling, it was used the Computational Fluid Dynamics (CFD) through the software ANSYS Fluent v.17.2™. The physical and chemical parameters that influence on the operation of the gasifier and the modeling methods used were studied in order to analyze the biomass gasification. This analysis was conducted to compare the simulations values to the ones find with the literature equations.

Keywords: Gasification, modeling, minimum fluidization velocity.

