



Verificação experimental de um modelo fluidodinâmico para fornalha piloto de leito fluidizado circulante

Experimental verification of a hydrodynamics model for small circulating fluidized bed furnace

Paulo Cesar Zadra Filho¹, Amauri Pinheiro Garcia Junior², Flavio Augusto Hilgemberg³
Jhon Jairo Ramírez Behainne⁴

RESUMO

Este estudo realiza a verificação experimental de um modelo matemático adaptado da literatura para a sua aplicação na previsão do comportamento fluidodinâmico de uma fornalha piloto de leito fluidizado circulante. O modelo foi testado em condições ambientais com a variação da velocidade de fluidização na faixa de 3,1 a 4,2 m/s, mantendo constantes o inventário dos sólidos (areia) do sistema e a velocidade de aeração na válvula *loop seal*, nos valores de 1,4 kg e 0,18 m/s, respectivamente. O modelo matemático foi adaptado para possibilitar a introdução da geometria do equipamento, as condições específicas de operação e a queda de pressão atribuída ao escoamento gasoso no *riser* da fornalha. A verificação foi realizada ajustando o valor do fluxo de recirculação dos sólidos e a constante da equação de queda de pressão para a obtenção da mesma distribuição da massa do inventário medida experimentalmente. Os resultados mostraram que o modelo consegue seguir satisfatoriamente as tendências experimentais, porém, com desvios na estimativa da queda de pressão que superam o valor de 100%, principalmente na coluna *riser*.

PALAVRAS-CHAVE: fluidodinâmica gás-sólido; fornalha piloto; leito fluidizado circulante.

ABSTRACT

This study carries out the experimental verification of a mathematical model adapted from the literature for its application in predicting the hydrodynamics behavior of a small circulating fluidized bed furnace. The model was tested at room conditions by varying the fluidizing gas velocity in the range of 3.1 to 4.2 m/s, and keeping the system's solid inventory (sand) and the aeration speed in the loop seal valve constant at 1.4 kg and 0.18 m/s, respectively. The mathematical model was adapted to include the new equipment geometry, the specific operating conditions and the pressure drop attributed to the gas flow in the furnace riser. The verification was performed by adjusting the value of the solids recirculation flow and the constant of the pressure drop equation to obtain the same distribution of the inventory mass measured experimentally. The results showed that the model can satisfactorily follow the experimental trends, however, with deviations in estimating the pressure drop that exceed 100%, mainly in the riser column.

KEYWORDS: gas-solid hydrodynamics; lab-scale furnace; circulating fluidized bed.

INTRODUÇÃO

Caldeiras de leito fluidizado circulante (LFC) são equipamentos industriais que realizam a conversão termoquímica de combustíveis sólidos em regime de fluidização rápida e seguem o ciclo Rankine para gerar vapor de água com alta eficiência (BASU, 2006). As suas fornalhas emitem menor carga poluidora de emissões atmosféricas,

¹ Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: a58861@alunos.ipb.pt ID Lattes: 7449674046734737.

² Voluntário de Iniciação Científica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: amauripinheiro@alunos.utfpr.edu.br ID Lattes: 6847186144328691.

³ Aluno colaborador. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: flaviohilgemberg@hotmail.com ID Lattes: 8205569445942171.

⁴ Docente no Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: jhon@utfpr.edu.br ID Lattes: 7698157175001504.

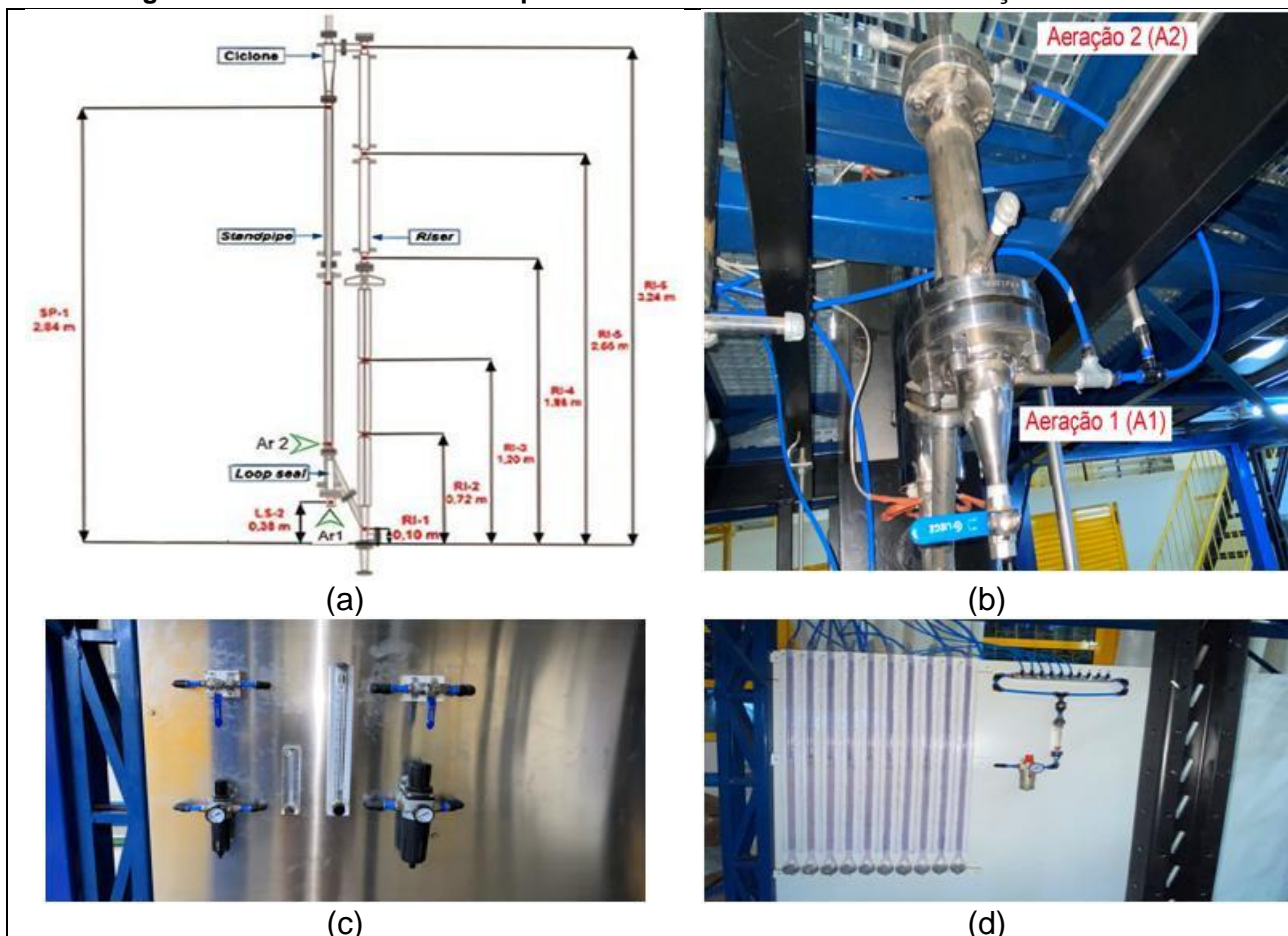
devido à menor necessidade de excesso de ar e possibilidade de adição de calcário, reduzindo a emissão de dióxido de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x) e monóxido de carbono (CO). Essas características tornam a tecnologia atraente para a queima de combustíveis de baixa qualidade abundantes no Brasil (RAMIREZ, 2007; MORITA, 2009). Com a realização de pesquisas mais ágeis e menos onerosas em equipamentos de LFC de pequena escala ou de laboratório, surgem oportunidades para o desenvolvimento e a massificação desses sistemas em escala industrial no país. Diante disso, este estudo realiza uma pesquisa voltada à verificação experimental de um modelo fluidodinâmico adaptado da literatura para a sua aplicação em fornalha piloto de LFC, instalada no Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Campus Ponta Grossa.

MATERIAIS E MÉTODOS

SISTEMA EXPERIMENTAL

As Figuras 1(a) e 1(b) mostram, respectivamente, o esquema da fornalha piloto de LFC com as suas tomadas de pressão, e a válvula *loop seal* com os locais de aeração.

Figura 1 – Detalhes da fornalha piloto de LFC e instrumentos de medição e controle



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).



O *riser* possui 0,041 m de diâmetro interno e faz conexão com o ciclone, recebendo o fluxo de ar pela sua base para a fluidização rápida. O ciclone é o separador de sólidos do sistema, possuindo um corpo principal de 0,078 m de diâmetro interno e relações geométricas correspondentes às de um ciclone do tipo Swift. O *standpipe* ou *downcomer* tem 0,026 m de diâmetro interno, e serve para armazenar os sólidos coletados pelo ciclone. A *loop seal*, ou válvula de recirculação dos sólidos, tem 0,12 m de altura na barragem e recebe o fluxo de aeração nos pontos A1 e A2.

A Figura 1(c) mostra o rotâmetro utilizado para medir e controlar a vazão volumétrica da aeração fornecida à válvula *loop seal*, com escala de 0 a 30 sL/min, bem como o rotâmetro para a linha do ar de fluidização na coluna *riser*, com faixa de 0 a 20 SCFM. Já, a Figura 1(d) mostra os manômetros em U utilizados para medir a pressão estática, tendo tubos preenchidos com água destilada sobre uma escala milimetrada, na faixa de 0 a 1000 mmH₂O. No mesmo painel dos manômetros há instrumentos para o fornecimento de aeração auxiliar, que evita o entupimento das tomadas de pressão.

CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

O material utilizado para formar o leito foi areia quartzosa, previamente classificada mediante peneiras industriais com abertura de malha entre 150 μm e 300 μm . As propriedades das partículas do inventário de sólidos (I_S) são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1– Propriedades das partículas do inventario de sólidos

Propriedades	Valores	Unidades
Diâmetro médio de Sauter (d_p)	200	μm
Densidade (ρ_p)	2712	kg/m^3
Esfericidade (ϕ)	0,69	kg/m^3
Velocidade de mínima fluidização (U_{mf})	0,04	m/s
Velocidade de transporte (U_{tr})	2,71	m/s
Velocidade terminal (U_t)	1,63	m/s
Grupo Geldart da partícula	B	-

Fonte: Oliveira (2021); Basu (2006).

A Tabela 2 mostra as condições operacionais dos experimentos realizados. Essas condições foram selecionadas com base em testes preliminares que indicaram adequado funcionamento do sistema experimental, a fim de proceder com a verificação das estimativas obtidas do modelo matemático escolhido da literatura.

O procedimento experimental detalhado para a operação do equipamento e a realização dos testes pode ser consultado no link informado no item “material suplementar”.



Tabela 2 – Condições experimentais dos testes experimentais

Propriedades	T1	T2	T3
Inventário dos sólidos (kg)	1,4	1,4	1,4
Velocidade da aeração (m/s)	0,18	0,18	0,18
Velocidade de fluidização (m/s)	3,1	3,6	4,2
Vazão de aeração (L/min)	20	20	20
Vazão de fluidização (L/min)	209	242	283
Pressão absoluta (bar)	1,25	1,25	1,25

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

MODELO MATEMATICO E PROCEDIMENTO DE VERIFICAÇÃO

O modelo matemático utilizado corresponde a uma adaptação do apresentado por KIM, *et al.* (2002), sendo depois implementado no software *Engineering Equation Solver* (EES®), versão 10.836 (KLEIN, 2020). O equacionamento relacionado a este modelo pode ser consultado no item “material suplementar”. A adaptação do modelo considerou a geometria da fornalha estudada, as condições dos testes experimentais realizados, a queda de pressão adicional atribuída ao escoamento gasoso (*FL*) na coluna o *riser*, e o valor da constante (*cte*) da queda de pressão no *standpipe* expressa pela Eq.(1).

$$\Delta P_{sp} = cte L_{va} G_{sd}^{0,51} p_{bulk}^{2,01} d_p^{-0,97} D_{ls}^{-0,76} \quad (1)$$

Na Eq. (1), L_{va} é a altura da coluna de sólidos acumulada no *standpipe*; G_{sd} , é o fluxo de recirculação dos sólidos; P_{bulk} , representa a densidade a granel do leito; d_p , o diâmetro médio das partículas; e D_{ls} , o diâmetro hidráulico do *standpipe* (ou da câmara de alimentação da válvula *loop seal*). O procedimento de verificação consistiu em realizar iterações para encontrar o valor de G_{sd} e da constante da Eq. (1) para as mesmas proporções mássicas da distribuição do inventário de sólidos que foram obtidas experimentalmente. A partir disso, foram também determinadas as respectivas quedas de pressão.

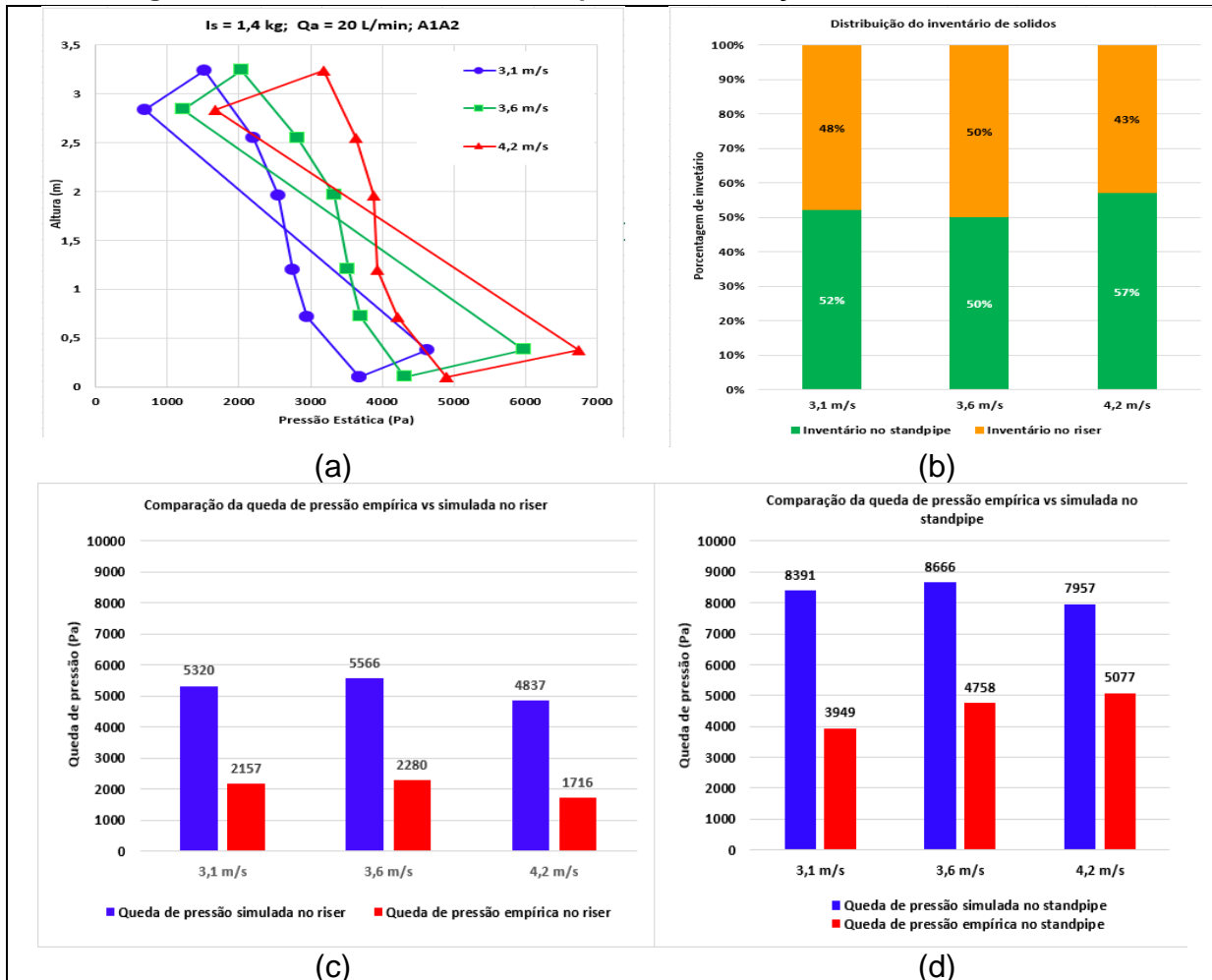
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2(a) mostra o perfil de pressão axial médio obtido nos testes. A forma dos perfis indica que existiram condições de equilíbrio dinâmico na circulação dos sólidos, ocorrendo a compensação dos que deixam o *riser* e retornam pela *loop seal*. Isto é confirmado pelo cruzamento das linhas de pressão próximo ao centro do gráfico, com a distribuição média de sólidos no *riser* sendo de 47%. Apesar disso, em T3 houve uma diferença superior ao desvio padrão de 3%, sugerindo que, proporcionalmente, mais



sólidos permaneceram no leito do *standpipe* durante a operação. Além disso, os perfis apresentaram certa inclinação, indicando que, tanto o *riser*, quanto o *standpipe*, operaram com adequada concentração de sólidos.

Figura 2 – Resultados dos testes empíricos e simulações obtidas do modelo



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Com a adequação do modelo matemático e as restrições das iterações anteriormente descritas, obteve-se uma distribuição média de sólidos de 48%, próximo da média empírica (Figura 2(b)). Para os testes T1, T2 e T3, o valor de constante da Eq. (1) convergiu para 0,0036, com valores de G_{sd} iguais a 47, 49 e 43 kg/m²s, respectivamente. Mesmo com os ajustes feitos ao modelo matemático, os valores obtidos das quedas de pressão no *riser* e no *standpipe* foram muito superiores aos empíricos, todos acima de 100% de desvio. No entanto, observa-se que as estimativas teóricas acompanharam as tendências de todos os dados experimentais na região do *riser* (Figura 2(c)), e a maioria dos dados da região do *standpipe* (Figura 2(d)). Embora não sendo muito evidente, no geral, o modelo parece responder melhor para a região do *standpipe* do que para a região do *riser* à medida que a velocidade de fluidização aumenta.



CONCLUSÃO

Os resultados experimentais demonstraram que os valores dos parâmetros operacionais utilizados foram adequados para o funcionamento da fornalha piloto de LFC em condições ambientais, possibilitando a comparação com o modelo semiempírico. Em relação às estimativas do modelo adotado, notou-se que há diferenças significativas em relação aos dados experimentais. No entanto, tais diferenças se mantiveram quase constante entre testes, o que poderia facilitar a inclusão de novos ajustes.

Material suplementar

O procedimento experimental detalhado, os registros fotográficos e as equações do modelo matemático podem ser consultados neste link: [Documento dos testes](#).

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e dos Departamentos Acadêmicos de Engenharia Mecânica (DAMEC) e Engenharia Química (DAENQ), da UTFPR/Campus Ponta Grossa.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

BASU, P. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Taylor & Francis, Boca Raton, 2006.

KIM, S., KIM, S.D. **Pressure Balance Model for Circulating Fluidized Beds with a Loop-seal**. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 41, p. 4949-4956, 2002.

KLEIN, S. A., EES –Engineering Equation Solver, Version 10.836, 2020-06-10 F-Chart Software, <https://fchartsoftware.com/ees/>.

MORITA, E. **Estudo Experimental das Emissões de NOx na Combustão de Carvão Mineral Brasileiro em Leito Fluidizado Rápido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 186 p., 2009.

OLIVEIRA, F., FURQUIM, G., MACHADO, V., PARISE, M., RAMIREZ, J. **Operational Influence of the Mono-chamber Aeration Mode in the Loop Seal of a Circulating Fluidized Bed**. *Latin American Applied Research*, v. 51, n. 1. p. 15-20, 2021.

RAMIREZ, J. **Estudo das Emissões de Mercúrio na Combustão de Carvão Mineral Brasileiro em Leito Fluidizado Rápido**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, 245 p., 2007.