



# Modelo fluidodinâmico aplicado a fornalha piloto de leito fluidizado circulante

## *HYDRODYNAMIC MODEL APPLIED TO A PILOT CIRCULATING FLUIDIZED BED FURNACE*

Gelson Ricardo Hilgemberg\*, Jhon Jairo Ramírez Behainne<sup>†</sup>,

Flavio Augusto Hilgemberg<sup>‡</sup>

### RESUMO

Este trabalho teve como objetivo adaptar e implementar um modelo matemático semi-empírico para prever o valor dos principais parâmetros fluidodinâmicos de uma fornalha piloto instalada no Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Campus Ponta Grossa. O modelo escolhido da literatura foi modificado para não considerar aeração horizontal na válvula *loop-seal*, e alimentado com dados das propriedades das partículas do leito, temperatura de operação da fornalha, velocidade de fluidização na coluna principal, taxa de recirculação de partículas e dimensões do sistema. As equações do modelo matemático foram implementadas no software *Engineering Equation Solver* (EES<sup>TM</sup>), a fim de obter a queda de pressão nos componentes do sistema, o inventário total de sólidos requerido e a sua distribuição no circuito para porosidades do leito na saída da coluna de fluidização variando entre 0,94 e 0,98. Os resultados obtidos das simulações mostram que, utilizando inventário de sólidos de até 3,2 kg e taxas de recirculação de partículas entre 20 e 60 kg/m<sup>2</sup>s na temperatura de 800°C, a coluna de fluidização poderia receber até 72% do inventário do leito com queda máxima de pressão estática perto de 18 kPa. Dados experimentais serão coletados futuramente para validar os resultados das simulações.

**Palavras-chave:** modelo fluidodinâmico, leito fluidizado circulante, fornalha, fluidização gás-sólido.

### ABSTRACT

This work adapts and implements a semi-empirical mathematical model to predict the main hydrodynamic parameters of a pilot circulating fluidized bed furnace installed at the Laboratory of Thermochemical Processes at UTFPR/Campus Ponta Grossa. The model chosen from the literature was modified to not consider horizontal aeration in the loop-seal valve and to be fed with data regarding the bed particle properties, furnace operating temperature, fluidization velocity in the main column, solids circulation rate and geometry of the system. The equations of the mathematical model were implemented in the Engineering Equation Solver (EES<sup>TM</sup>) software in order to obtain the pressure drop in several components of the system, the total bed inventory and its distribution around the loop while the bed porosity at the riser exit changes from 0,94 to 0,98. Results obtained from the simulations show that the pilot system could be charged with a maximum inventory of 3,2 kg. In this case, for solids circulation rates varying since 20 to 60 kg/m<sup>2</sup>s at bed temperature of 800°C, the riser could receive up to 72% of the solids inventory and undergo a pressure drop of around 18 kPa. Experimental data are to be collected at future to validate these results.

**Keywords:** hydrodynamic model, circulating fluidized bed, furnace, gas-solid fluidization.

\* Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; [gelsonvolei-pg@hotmail.com](mailto:gelsonvolei-pg@hotmail.com)

<sup>†</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa; [jhon@utfpr.edu.br](mailto:jhon@utfpr.edu.br)

<sup>‡</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; [flaviohilgemberg@hotmail.com](mailto:flaviohilgemberg@hotmail.com)



## 1 INTRODUÇÃO

As caldeiras de leito fluidizado circulante (LFC) utilizam o regime de fluidização rápida na região da fornalha, ou câmara de combustão, para transformar a energia química de um combustível em calor e produzir vapor de processo de forma eficiente e com baixo impacto ambiental. Nessa câmara de combustão, uma suspensão multifásica gás-partícula, de elevada dispersão radial e axial, é formada quando o gás oxidante é alimentado em alta velocidade e arrasta parte dos sólidos de um leito composto por material inerte e combustível. Nas caldeiras de LFC, esse processo acontece numa coluna vertical denominada riser, onde a concentração de sólidos experimenta uma diminuição exponencial após superar um ponto de inflexão axial que separa a região densa da dispersa (CAI, et al., 2017).

Os sólidos do leito, ao serem carregados em direção ascendente no riser pelo gás, que se movimenta a uma velocidade igual ou superior à velocidade terminal das partículas, colidem entre eles e sofrem dispersão radial para formarem aglomerados, denominados clusters. Quando esses aglomerados são transportados em direção às paredes do riser, o domínio da força gravitacional os leva a um movimento descendente de baixa velocidade, onde ao encontrarem zonas mais densas do leito, são desintegrados. Estudos mostram que na região transversal do riser, acima do ponto de inflexão axial, os sólidos se movimentam no sentido ascendente na região central e no sentido descendente na região anular perto da parede, gerando um padrão de escoamento núcleo-anular (DAVISON, 2000; MARTINS, 2015).

O estudo das variáveis fluidodinâmicas atreladas ao comportamento gás-sólido acima descrito, torna-se uma questão relevante para a operação estável da fornalha de uma caldeira de leito fluidizado circulante. Neste sentido, sabe-se, por exemplo, que a estabilidade operacional é conseguida com a garantia do balanço de pressão do sistema, o qual determina a distribuição da massa nos diferentes componentes e as condições adequadas para operações de transferência de calor eficientes entre a suspensão gás-sólido e superfícies internas da fornalha (BASU, 2006). Para a realização desse balanço de pressão, é necessário considerar um modelo fluidodinâmico que integre as equações fenomenológicas dos principais componentes do circuito de fluidização, sendo estes, o *riser* ou coluna principal, o ciclone ou separador gás-sólido, e o conjunto standpipe-válvula de recirculação de sólidos (KIM et al, 2002). O efeito da queda de pressão atrelada a esse balanço em fornalhas de leito fluidizado circulante tem sido demonstrado em escala comercial (YANG, et al., 2009).

Atualmente, uma fornalha piloto de leito fluidizado circulante encontra-se em construção no Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Campus Ponta Grossa. Uma vez que não há dados preliminares sobre os valores dos parâmetros fluidodinâmicos para iniciar os testes experimentais no equipamento, surge a seguinte pergunta: seria possível fazer uma estimativa teórica de tais variáveis, visando obter condições adequadas de funcionamento de uma fornalha de leito fluidizado circulante de pequeno porte?. A resposta a esta questão é dada com o desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa, cujos objetivos específicos envolvem a modificação ou adaptação de um modelo fluidodinâmico semiempírico já disponível na literatura, a implementação desse modelo em um pacote computacional e a realização de simulações para a determinação das faixas operacionais apropriadas dos parâmetros fluidodinâmicos na temperatura típica de um processo de combustão de biomassa lignocelulósica em LFC.

## 2 MÉTODO

Nesta pesquisa, o modelo matemático apresentado detalhadamente por Kim, et al. (2002), foi adotado como base para as simulações dos parâmetros fluidodinâmicos da fornalha piloto de LFC. Tendo em vista que



esse modelo considera aeração horizontal no dispositivo de recirculação de sólidos, neste caso, uma válvula do tipo *loop-seal*, foi preciso realizar uma adaptação para poder aplicá-lo no sistema de interesse, que emprega apenas aeração vertical. A mudança efetuada envolveu o termo referente à queda de pressão experimentada pela câmara de alimentação da válvula *loop-seal*, expresso pela Eq. (1), que passou a considerar toda a altura da coluna de sólidos acumulada no *standpipe*, e não apenas a porção de sólidos localizada abaixo do porto de entrada da aeração horizontal, incluída no modelo matemático original.

$$\Delta P_{ca} = 0,0056 L_{ca} G_{sd}^{0,51} \rho_{bk}^{2,01} \cdot d_p^{-0,97} \cdot D_{ca}^{-0,76} \quad (1)$$

Na Eq. (1),  $L_{ca}$  representa, no modelo adaptado, a altura total da coluna de sólidos;  $G_{sd}$ , a taxa de recirculação das partículas;  $\rho_{bk}$ , a densidade a granel do leito;  $d_p$ , o diâmetro médio das partículas e,  $D_{ca}$ , o diâmetro hidráulico da seção transversal da câmara de alimentação da válvula *loop-seal*.

Em posse das dimensões do sistema experimental, das propriedades dos sólidos apresentadas por Oliveira et al. (2021), da velocidade de transporte das partículas (calculada no valor de 5,2 m/s para uma temperatura de combustão de 800°C), e da taxa de recirculação de sólidos na faixa de interesse, compreendida entre 20 e 60 kg/m<sup>2</sup>s, o modelo fornece a queda de pressão nos componentes do sistema, o inventário total de sólidos requerido e a sua distribuição no circuito para porosidades do leito variando entre 0,94 e 0,98 na saída do *riser*. Esses resultados são obtidos a partir do cumprimento dos balanços de pressão e de massa no LFC, descritos pelas Eq. (2) e (3):

$$\Delta P_{ca} = \Delta P_{cr} + \Delta P_r + \Delta P_c \quad (2)$$

$$M_{tt} = M_r + M_{cr} + M_{ca} \quad (3)$$

Na Eq. (2), os três termos da direita representam, respectivamente, as quedas de pressão na câmara de reciclagem da válvula *loop-seal*, na coluna *riser* e no ciclone. Já, na Eq. (3), o inventário total de sólidos carregados no sistema é constituído pela soma das massas presentes na coluna *riser*, e nas câmaras de reciclagem e de alimentação da válvula *loop-seal*, esta última, abrangendo também a seção vertical do *standpipe*. Cabe destacar que a vazão de aeração da válvula *loop-seal* foi mantida constante em todos os casos simulados, a fim de garantir uma velocidade de fluidização constante de 0,1 m/s no dispositivo.

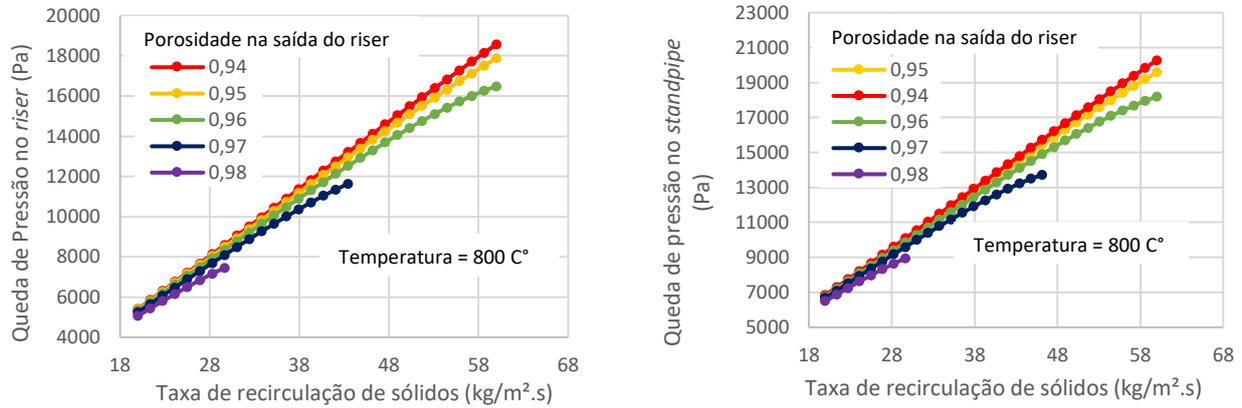
Conforme apresentado por Kim et al. (2002), o termo da queda de pressão no *riser* ( $\Delta P_r$ ) é calculado assumindo que a porosidade do leito diminui gradativamente com a altura seguindo um perfil exponencial. Esse perfil inicia em um ponto de inflexão da curva, abaixo do qual, a fração de sólidos da fase densa do *riser*, localizada perto da sua base, mantém valor constante. Nas simulações, o valor dessa porosidade de leito na zona densa do *riser* foi sempre superior a 0,8, característico do regime de fluidização rápida (BASU, 2006).

O modelo adaptado foi implementado na linguagem do pacote computacional *Engineering Equation Solver-EES™*, versão 10.836 (KLEIN, 2020), e utilizado de forma remota mediante acesso ao servidor da UTFPR/Campus Ponta Grossa, devido às restrições sanitárias decorrentes da pandemia da COVID-19 no período da realização desta pesquisa.

### 3 RESULTADOS

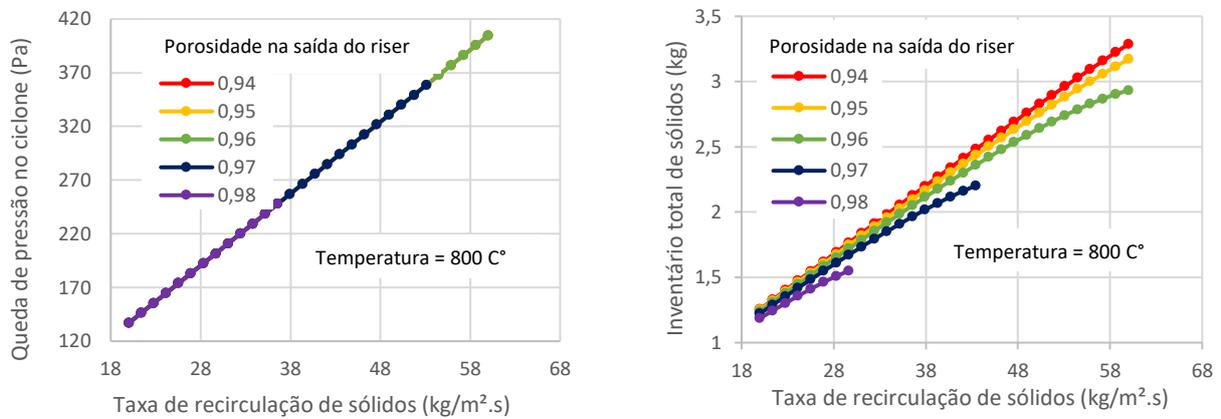
Os resultados obtidos a partir das simulações realizadas são apresentados nas Fig. 1 a 3.

**Figura 1. Queda de pressão estimada no riser e no standpipe.**



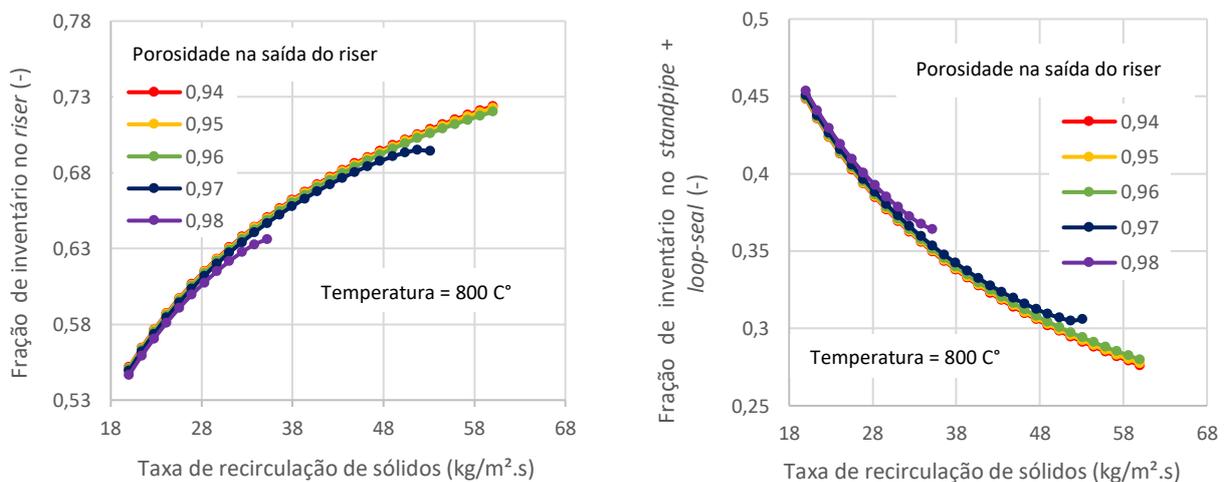
Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 2. Queda de pressão estimada no ciclone e inventário total de sólidos.**



Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 3. Fração do inventário total de sólidos no riser e no conjunto standpipe + loop-seal.**



Fonte: Autoria própria (2021).



## 4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos a partir das simulações realizadas, é possível concluir que o modelo matemático adaptado e implementado no *software* EES™ consegue representar satisfatoriamente o comportamento esperado das variáveis fluidodinâmicas de uma fornalha de LFC de pequenas dimensões, pouco explorada na literatura.

Em relação aos resultados específicos apresentados nas Fig. 1 a 3, conclui-se que:

- As quedas de pressão no *riser* e no *standpipe* crescem com o aumento da taxa de recirculação de sólidos imposta no sistema, como resultado do cumprimento do balanço de pressão no circuito de fluidização. No caso deste estudo, a queda de pressão pode chegar a atingir o valor de aproximadamente 18 kPa na coluna *riser*, quando exigida uma taxa de recirculação de sólidos de 60 kg/m<sup>2</sup>s. Este resultado mostra-se coerente com o reportado em trabalhos prévios, onde quedas de pressão de até 25 kPa em fornalhas de LFC, concebidas em escala comercial, têm sido estimadas a partir de modelos matemáticos semiempíricos similares (NAGA KISHORE, et al. 2017). Também, como esperado, a queda de pressão torna-se maior à medida que a concentração de sólidos aumenta, isto é, quando a porosidade do leito fluidizado diminui. Por outro lado, a queda de pressão no ciclone apresentou valores baixos se comparada com a dos componentes anteriores, sugerindo também que a sua magnitude depende da taxa de recirculação das partículas, mas não da porosidade do leito na saída do *riser*. A diferença na extensão das curvas atreladas à porosidade de leito é consequência do número de soluções encontradas nas simulações para que o balanço de massa e de pressão pudesse ser cumprido. Nesse sentido, nota-se que leitões mais diluídos ou de menor concentração de sólidos, fornecem uma faixa operacional mais limitada ou estreita para o sistema, sugerindo a exigência de um maior controle para manter a estabilidade operacional.
- O aumento na taxa de recirculação de sólidos exige maiores inventários de partículas a serem carregados na fornalha, requerendo uma variação de 2 kg (desde aproximadamente 1,2 até 3,2 kg) para a obtenção de uma ampla faixa na taxa de circulação dos sólidos. Este resultado serve para alertar sobre a necessidade de uma maior atenção na preservação da quantidade do inventário de sólidos durante o funcionamento, uma vez que pequenas alterações na massa das partículas podem levar a comportamentos fluidodinâmicos muito diferentes, dificultando assim o controle operacional do sistema. Além disso, como esperado, a demanda na massa do leito tende a crescer quanto menor for a porosidade exigida na saída do *riser*.
- A distribuição do inventário do leito segue um comportamento exponencial em termos da variação da taxa de recirculação das partículas, indicando um aumento proporcional da presença de sólidos na coluna *riser* à medida que a o inventário total cresce. Nas condições simuladas, observou-se que a massa de sólidos na região do *riser* pode comportar entre 54 a 72% da massa total de leito carregada no sistema. Este resultado contrasta com a faixa mais ampla, de 10 e 60%, encontrada experimentalmente por Oliveira (2019) em equipamento de laboratório com dimensões maiores e operado a frio (condição ambiente).

Este estudo constitui um passo importante para nortear o início dos testes experimentais no equipamento atualmente em construção, contribuindo assim para a redução do tempo demandado e dos custos envolvidos durante as tentativas para colocá-lo em operação. Finalmente, cabe ressaltar que pesquisas em andamento pretendem confrontar resultados de simulações realizadas a temperatura ambiente com os obtidos a partir de testes experimentais a frio, a fim de poder realizar um primeiro ajuste do modelo matemático implementado.



## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos, e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Campus Ponta Grossa, pelos recursos técnicos fornecidos para a realização desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- BASU, Prabir. **Combustion and gasification in fluidized beds**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- CAI, Runxia; KE, Xiwei; LYU, Junfu, YANG, Hairui; ZHANG, Man; YUE, Guangxi; LING, Wen. Progress of circulating fluidized bed combustion technology in China: a review. **Clean Energy**, v.1, n. 1, p. 36-49, 2017.
- DAVIDSON, John. Circulating fluidised bed hydrodynamics. **Powder Technology**, v. 113, n.3, p. 249-260, 2000.
- KIM, Sung; KIM, Sang; LEE, Dong. 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>
- MARTINS, Camila. **Simulação do perfil axial de pressão na coluna riser de um leito fluidizado circulante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 132 p., 2015.
- NAGA KISHORE, S.; VENKATESWARA RAO, T.; DEVA KUMAR, M. Furnace design of 210 MW circulating fluidized bed boiler-numerical investigation. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, v. 8, n. 3, p. 442–455, 2017.
- OLIVEIRA, Fernanda. **Estudo da influência do modo de aeração de uma válvula loop-seal na operação de um leito fluidizado circulante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 91 p., 2019.
- OLIVEIRA, Fernanda; SANTOS, Guilherme; MACHADO, Vitor, PARISE, Maria, RAMIREZ, Jhon. 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.
- YANG, Hairui; ZHANG, Hai; YANG, Shi; YUE, Guangxi; SU, Jun; Fu, Zhiping. Effect of bed pressure drop on performance of a CFB boiler. **Energy & Fuels**, v. 23, n. 6, p. 2886–2890, 2009.