



Condições de partida de uma fornalha piloto de leito fluidizado circulante

START-UP CONDITIONS OF A PILOT CIRCULATING FLUIDIZED BED FURNACE

Flavio Augusto Hilgemberg*, Jhon Jairo Ramírez Behainne†, Gelson Ricardo Hilgemberg‡

RESUMO

Este trabalho realiza uma estimativa de valores dos parâmetros operacionais requeridos para a partida de uma fornalha piloto de leito fluidizado circulante. Com base em modelos matemáticos disponíveis na literatura, do conhecimento das propriedades das partículas do leito e da geometria do sistema experimental, foram calculadas as velocidades do ar necessárias para a operação da fornalha no regime de fluidização rápida em função da evolução da temperatura do leito, bem como a capacidade do alimentador de combustível em termos da velocidade de rotação do elemento dosador. Adicionalmente, para a condição de partida do sistema, foi possível prever uma combinação de valores adequados para o inventário total de partículas, a taxa de recirculação dos sólidos e a porosidade média do leito na região da coluna de fluidização. Nesse sentido, os resultados sugerem que a condição de operação estável inicial é conseguida com velocidades de fluidização acima de 2,7 m/s e inventário mínimo de leito de 1,31 kg, proporcionando uma taxa de recirculação de partículas próxima de 20 kg/m²s e porosidade média do leito de 0,98 na saída do *riser*. As estimativas teóricas obtidas deste trabalho serão futuramente confrontadas com dados experimentais, a fim de realizar os ajustes necessários.

Palavras-chave: fornalha piloto, leito fluidizado circulante, fluidização, partida operacional.

ABSTRACT

This work estimates the values of the operational parameters required for the start-up of a pilot circulating fluidized bed furnace. Based on mathematical models available in the literature along with properties of the bed particles and geometry of the experimental system, both the fluidizing gas velocity required to keep the riser in fast fluidization regime in function of the bed temperature, and the mass flow rate supplied by the fuel feeder in terms of the screw rotation speed were calculated. Additionally, it was possible to specify a set of suitable values for the total bed inventory, the solids recirculation rate and the average bed porosity at the riser exit to use during the start-up stage of the furnace. In this sense, results suggest that stable operating conditions to get start the combustion system can be achieved by using fluidizing gas velocities above of 2.7 m/s and 1.31 kg of minimum total bed inventory, which provide particle recirculation rates and mean bed porosity at the exit of the fluidization column close to 20 kg/m²s and 0.98, respectively. The theoretical estimates obtained from this work will be compared with experimental data to validate and improve the mathematical models here used.

Keywords: pilot furnace, circulating fluidized bed, fluidization, start-up procedure.

* Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; flaviohilgemberg@hotmail.com

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa; jhon@utfpr.edu.br

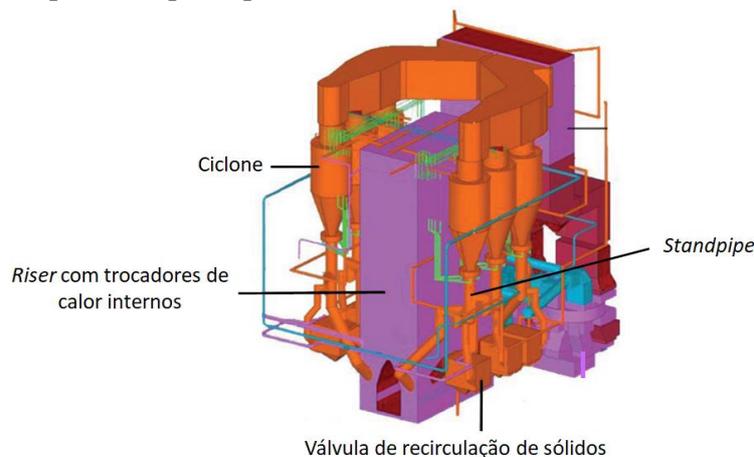
‡ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil; gelsonvolei-pg@hotmail.com

1 INTRODUÇÃO

Fornalhas de leito fluidizado circulante (LFC) são empregadas com sucesso há mais de 40 anos para produzir vapor de processo e energia elétrica em sistemas de potência do ciclo Rankine. Estes equipamentos são reconhecidos pelas suas vantagens oferecidas em termos da eficiência de conversão termoquímica do combustível e redução das emissões atmosféricas, principalmente de dióxido de enxofre (SO_2) e de óxidos de nitrogênio (NO_x) (NAGA KISHORE, et al., 2017).

A combustão numa fornalha de LFC acontece quando o combustível, misturado em proporção mássica de até 5% dentro de um leito de partículas composto por material inerte, é oxidado por ar que o percola a elevadas velocidades no sentido ascendente, liberando calor na presença de um regime de contato gás-partícula conhecido como fluidização rápida (BASU, 2006). Uma fornalha típica deste tipo possui um circuito de fluidização formado por quatro componentes principais, sendo estes: *riser* ou coluna de fluidização; ciclone ou separador gás-sólido; *standpipe* ou coluna de retorno de partículas, e válvula de recirculação de sólidos (normalmente acionada pneumaticamente). No caso da produção de vapor em caldeiras, além desses componentes, o circuito de fluidização inclui trocadores de calor internos que ficam expostos à suspensão gás-sólido circundante de alta temperatura para o aproveitamento da energia térmica (CAI, et al., 2017). Uma caldeira de LFC com a indicação dos componentes anteriormente descritos, é ilustrada na Figura (1).

Figura 1 - Componentes principais do circuito de fluidização de uma caldeira de LFC



Fonte: Adaptado de CAI, et al. (2017).

A partida de uma fornalha de LFC requer a definição prévia de parâmetros operacionais atrelados ao comportamento fluidodinâmico do sistema, com os quais garante-se um funcionamento estável até o alcance do regime permanente a alta temperatura. Dentre tais parâmetros, cabe mencionar as propriedades físicas das partículas inertes do leito, a velocidade de fluidização requerida na coluna *riser* para a manutenção do regime de fluidização rápida, e o inventário do leito de sólidos que precisa ser carregado no sistema, a fim de obter taxas de recirculação de partículas e porosidades de leito que garantam boa eficiência de conversão do combustível e a presença de altos coeficiente de transferência de calor entre a suspensão gás-sólido e as superfícies expostas. Experimentos de combustão em fornalhas piloto de LFC que corroboram o descrito anteriormente, têm sido apresentados em vários trabalhos, inclusive, alguns deles realizados no Brasil utilizando o carvão mineral como combustível (RAMIREZ, 2007).



Atualmente, uma fornalha de LFC, projetada em escala piloto, está sendo instalada no Laboratório de Processos Termoquímicos da UTFPR/Campus Ponta Grossa. Tendo em vista a programação futura da realização de testes neste equipamento, surge a seguinte questão: quais seriam os valores apropriados dos parâmetros operacionais do sistema que permitiriam a execução do procedimento de partida? O presente estudo dá resposta a esta questão, ao apresentar os cálculos do comportamento da velocidade de fluidização na coluna *riser* com a evolução da temperatura da fornalha, da vazão mássica do combustível em função da rotação do mecanismo de dosagem, bem como o valor inicial do inventário de sólidos requerido para obter uma taxa de recirculação de sólidos e uma porosidade média do leito na saída do *riser* sugeridas na literatura.

2 MÉTODO

2.1 Cálculo da Velocidade de Fluidização na Coluna *Riser*

A velocidade de fluidização de um LFC precisa ter valor igual ou superior ao da velocidade de transporte das partículas (u_{tr}), a fim de garantir a presença do regime de fluidização rápida do escoamento gás-sólido na coluna *riser* (BASU, 2006). No cálculo desse parâmetro influenciam, tanto propriedades das partículas, quanto do gás fluidizante, agrupadas no número adimensional de Arquimedes (A_r) apresentado na Eq. (1):

$$A_r = \rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3 / \mu_g^2 \quad (1)$$

onde, ρ_g e ρ_p são a densidade do gás e da partícula, respectivamente; d_p , o diâmetro médio de Sauter das partículas do leito; g , a aceleração da gravidade, e μ_g , a viscosidade do gás de fluidização.

Neste trabalho, a Eq. (2), sugerida por Perales, et al. (1991), foi escolhida para calcular a velocidade de transporte em m/s, para um leito composto por partículas de areia quartzosa como material inerte, tendo os mesmos valores de densidade (2712 kg/m^3) e de diâmetro médio de Sauter ($183 \text{ }\mu\text{m}$) reportados por Oliveira et. al. (2021), na pressão de 1 bar e com a temperatura variando entre 25 e 800°C .

$$U_{tr} = 1,45 A_r^{0,484} \mu / (\rho_g d_p) \quad 20 \leq A_r \leq 50000 \quad (2)$$

Cabe ressaltar que, a partir dos valores da velocidade de fluidização calculados, da densidade do ar e do diâmetro da coluna *riser*, ficam estabelecidas as vazões volumétricas e mássicas requeridas na fornalha.

2.2 Cálculo da Vazão Mássica do Alimentador de Combustível

O sistema alimentador de combustível da fornalha em construção consiste de um mecanismo de rosca sem-fim acoplado à seção do *riser*. Conforme relatado por Ramírez (2007) nas suas experiências, assim que a temperatura de ignição do combustível é alcançada durante a fase de pré-aquecimento do leito, o fornecimento do combustível na fornalha pode ser iniciado. No primeiro momento, o combustível precisa ser alimentado a uma taxa mássica muito baixa, isto é, na presença de elevado excesso de ar, aumentando-a gradativamente à medida que o leito dá indícios de crescimento na taxa de elevação da sua temperatura. No caso de um alimentador de combustível do tipo rosca sem-fim, a taxa mássica do combustível (\dot{m}_c), fornecida em kg/h, pode ser determinada em função das propriedades do combustível, das características geométricas, das



condições de carregamento e da velocidade de rotação do elemento dosador, conforme indicado na Eq. (3) (POWDER PROCESS, 2021):

$$\dot{m}_c = 60\pi D^2 S N a \rho c \quad (3)$$

onde, D , S e N são o diâmetro externo, o passo e as revoluções por minuto da rosca sem-fim, respectivamente; (a) , é a razão de carga; (ρ) é a densidade a granel do combustível, e (c) , é o fator de correção por inclinação. Para o caso em estudo, o combustível considerado foi serragem de madeira, com densidade a granel média de 200 kg/m^3 e razão de carga no elemento dosador de 30%.

2.3 Cálculo do Inventário Total do Leito

A massa total de partículas carregada no LFC é um fator determinante na garantia da estabilidade operacional. Se ela for muito baixa, o sistema pode não alcançar a taxa de circulação de sólidos e a concentração de partículas no *riser* apropriadas para manter o processo de queima do combustível de forma eficiente. Por outro lado, se for muito alta, o aumento na queda de pressão nos componentes do sistema pode levar ao custo operacional excessivo, devido à necessidade de incrementar a energia do gás de fluidização para manter as condições de regime de fluidização rápida no *riser*.

Neste trabalho, a estimativa do inventário do leito requerido foi realizada a partir do modelo matemático apresentado detalhadamente por Kim, et al. (2002), com adaptações para a sua aplicação no sistema experimental de interesse. Esse modelo tem como base o balanço de massa e de pressão no circuito de fluidização, representadas pelas Eq. (4) e (5), respectivamente:

$$\Delta P_{ca} = \Delta P_{cr} + \Delta P_r + \Delta P_c \quad (4)$$

$$M_{tt} = M_r + M_{cr} + M_{ca} \quad (5)$$

onde, na Eq. (4), o termo do lado esquerdo representa a queda de pressão na coluna *standpipe* e os três do lado direito são as quedas de pressão na câmara de reciclagem da válvula de recirculação de sólidos, na coluna *riser* e no ciclone, respectivamente. No caso da Eq. (5), o lado esquerdo é o inventário total do leito que precisa ser carregado no sistema, enquanto o lado direito representa a soma das massas presentes na coluna *riser* e nas câmaras de reciclagem e de alimentação da válvula de recirculação das partículas, incluindo a seção vertical do *standpipe* ocupada por sólidos.

Para o cálculo de M_{tt} requerido na partida da fornalha, foi necessário alimentar o modelo com os dados das propriedades das partículas, da geometria do sistema e da velocidade de transporte na temperatura ambiente de 25°C , visando garantir uma taxa de recirculação mínima de $20 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e porosidade média de leito de 0,98 na saída do *riser*. Estas restrições foram adotadas com base nas faixas adequadas de operação sugeridas por Basu (2006) para um leito fluidizado circulante.

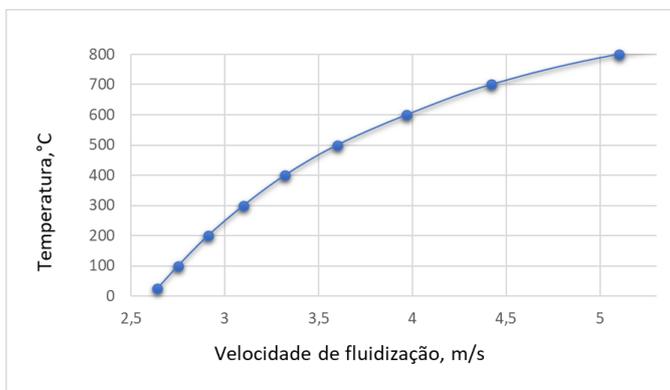
3 RESULTADOS

3.1 Velocidade de Fluidização

O comportamento da velocidade de fluidização mínima necessária para manter o regime de fluidização rápida na coluna *riser*, em função da temperatura do leito, é apresentado na Fig. 2.



Figura 2 - Relação da velocidade de fluidização com a temperatura do leito.

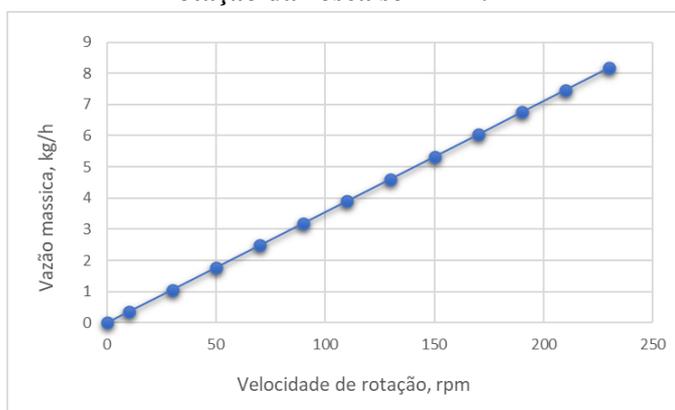


Fonte: Autoria própria (2021).

3.2 Vazão Mássica de Combustível

O perfil da vazão mássica de combustível entregue pelo alimentador em função da velocidade de rotação da rosca sem-fim, é ilustrado na Fig. 3.

Figura 3 - Vazão mássica entregue pelo alimentador de combustível em função da velocidade de rotação da rosca sem-fim.



Fonte: Autoria própria (2021).

3.3 Inventário do Leito

Os valores calculados do inventário total do leito, necessários durante as condições da partida e da combustão a 800°C, são apresentados na Tab. (1).

Tabela 1 - Inventários totais de leito requeridos na partida e na combustão a 800°C.

Temperatura do leito (°C)	Inventário do leito (kg)
25	1,31
800	1,18

Fonte: Autoria própria (2021).



4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos conclui-se que o valor mínimo da velocidade do ar de fluidização, requerida para garantir o regime de fluidização rápida na coluna *riser*, cresce com a temperatura do leito. Nota-se também que esse crescimento é mais acentuado à medida que a temperatura do leito aumenta. Para o sistema estudado, a velocidade de fluidização precisará ser mantida acima dos valores mínimos de 2,7 m/s no momento da partida, e de 5,2 m/s na condição de combustão na temperatura de 800°C. Estas velocidades do gás encontram-se dentro da faixa esperada para operação de fornalhas de LFC, apresentadas por Basu (2006).

Em relação ao mecanismo de alimentação de combustível, foi encontrado que este poderá atender a vazão mássica teórica, a qual é de aproximadamente 4 kg/h para operação com 20% de excesso de ar. Para essa vazão de combustível, a rotação necessária estaria ao redor de 110 rpm, valor abaixo do valor máximo de 250 rpm, determinado para o diâmetro da rosca sem-fim considerada.

No caso do inventário de sólidos, conclui-se que o aumento da temperatura diminui a demanda da massa de sólidos no sistema, porém, com uma redução de apenas 10% em relação à da condição de partida.

Finalmente, cabe destacar que experimentos serão realizados a futuro para validar os resultados estimados.

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.
- 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.
- 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; 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.
- RAMIREZ, Jhon. **Estudo das emissões de mercúrio na combustão de carvão mineral brasileiro em leito fluidizado rápido**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 245 p., 2007.
- PERALES, J., COLL, T., LLOP, M., PUIGJANER, L., ARNALDOS, J., and CASAL, J., On the transition from bubbling to fast fluidization regimes, In: BASU, P., HASATANI, M., HORIO, M. (org.). **Circulating Fluidized Bed Technology III**, Oxford: Pergamon Press, 1991, p. 73-78.
- POWDER PROCESS. **Equipment Handbook**, 2021. Screw conveyor design calculations. Disponível em: https://powderprocess.net/Equipments%20html/Screw_Conveyor_Design.html. Acesso em: 02 mar. 2021.