

Implementação de um modelo matemático para realização do balanço de massa e de energia de uma fornalha de leito fluidizado circulante em escala de laboratório

A mathematical model for the mass and energy balance of a bench-scale circulating fluidized bed furnace

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo implementar um modelo matemático baseado na estequiometria de combustão, no balanço de massa e de energia para uma fornalha de leito fluidizado circulante (LFC). O modelo matemático foi elaborado no software *Engineering Equation Solver* (EES®) a fim de simular parâmetros operacionais resultantes da queima dos combustíveis carvão mineral e biomassa. As dimensões do equipamento e as propriedades físico-químicas do combustível foram dados de entrada do modelo, enquanto que valores da velocidade de fluidização, da taxa de recirculação dos sólidos e do excesso de ar foram escolhidos para estudo. Os resultados das simulações foram expressos em termos da temperatura média do escoamento gás-sólido na fornalha, da temperatura da parede do *riser* e da diferença de temperatura entre a fornalha baixa e a válvula de recirculação dos sólidos (*loop-seal*), bem como das demandas de ar, de combustível e emissões do processo. Concluiu-se que a velocidade de fluidização teve maior impacto nas vazões mássicas do processo, enquanto que a taxa de recirculação esteve intimamente relacionada às temperaturas observadas. O excesso de ar também contribuiu para a variação significativa dos parâmetros analisados. Exalta-se, finalmente, a maior demanda necessária da fornalha quando operada com biomassa.

PALAVRAS-CHAVE: Caldeiras. Modelos matemáticos. Leito Fluidizado Circulante.

ABSTRACT

This work analyzes results obtained from a mathematical model based on combustion stoichiometry, mass and energy balance for a circulating fluid bed (CFB) furnace. The *Engineering Equation Solver* (EES®) software was used to simulate operational parameters of the furnace when burning coal and biomass separately. The dimensions of the CFB system as well as the fuel properties were the input data, while values of fluidization velocity, solids recirculation rate and excess air were chosen as variables to be studied. Results of simulation were expressed in terms of the average furnace gas-solid flow temperature, the riser wall temperature, the temperature difference between the bottom section of the furnace and the loop-seal valve, the air and fuel demands and the process emissions. It was observed that the fluidization velocity had an important impact on the fuel mass flow rates, whereas the recirculation rate was closely related to the temperature distribution. Excess air also contributed to the significant variation of the parameters here analyzed. Finally, as expected, simulations indicated a higher demand of biomass in comparison to that for coal.

KEYWORDS: Boilers. Mathematical models. Circulating fluidized beds.

Otávio Augusto Machado Brasil
tavetex@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Jhon Jairo Ramirez Behainne
john@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

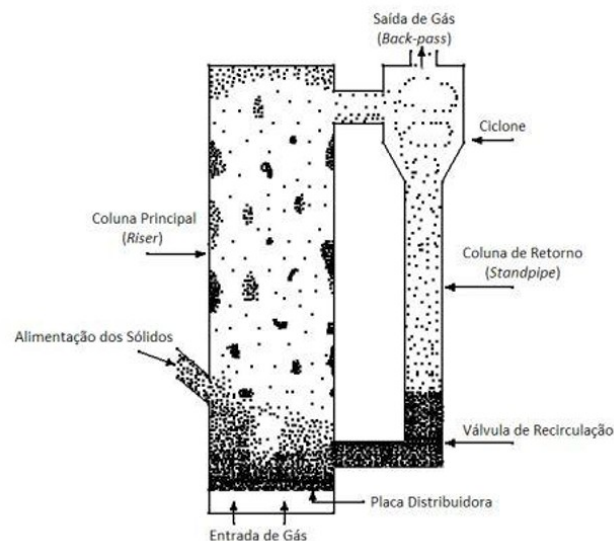
Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

Basu (2006, p.7-8) aponta que caldeiras de leito fluidizado circulante (CFB, do inglês *Circulating Fluidized Bed*) são sistemas de conversão termoquímica caracterizados pela circulação de sólidos e gases quentes durante a queima de um combustível particulado, transferindo calor eficientemente para superfícies em contato, a fim de produzir vapor de água. O gás aquecido que deixa a fornalha pode ser usado para o aproveitamento de energia térmica em outros trocadores de calor, os quais podem ter a função de superaquecer o vapor produzido, pré-aquecer a água de alimentação da caldeira ou pré-aquecer o ar de combustão. Nesse sistema, combustível e ar (dotado de comburente) são inseridos no *riser* (coluna principal ou fornalha da caldeira CFB), reagindo quimicamente para liberar calor. Uma parcela dos compostos inertes e não consumidos são colocados em *loop* permanente, contribuindo para o aproveitamento máximo do poder calorífico do combustível. Dentro do circuito de uma caldeira CFB, os sólidos sofrem diferentes regimes fluidodinâmicos, tipicamente, de leito fluidizado turbulento na fornalha baixa, de fluidização rápida na fornalha alta, de leito móvel no *standpipe* e de leito móvel ou borbulhante no dispositivo utilizado para a recirculação dos sólidos. A Figura 1 ilustra a porção do circuito de fluidização ou fornalha de uma caldeira de leito fluidizado circulante, com os componentes estudados neste trabalho.

Figura 1- Esquema de caldeira por leito fluidizado circulante



Fonte: Modificado de Basu (2006)

Na Figura 1 é apresentada uma válvula de recirculação de sólidos genérica. As válvulas podem ser do tipo L, J, V e *loop-seal* (tipo U). Para o presente trabalho considerou-se uma válvula do último tipo. O funcionamento da válvula lembra o comportamento de uma barragem de líquido, e leva o nome devido ao selo mecânico que ela proporciona ao circuito do sistema, impedindo que gases e partículas do *riser* sigam o caminho inverso indesejado (BASU; CHENG, 2009, 991-998).

MATERIAL E MÉTODOS

A simulação do processo de queima de combustível em leito fluidizado circulante foi realizada por meio da avaliação da estequiometria da combustão, em conjunto com a análise dos balanços de massa e de energia efetuados para o escoamento gás-sólido no interior da fornalha de um leito fluidizado circulante em escala de laboratório. A solução das equações do modelo foi obtida com a aplicação do software *Engineering Equation Solver* (EES®), que também disponibiliza propriedades termodinâmicas.

O procedimento adotado consistiu em definir inicialmente os parâmetros de entrada (*inputs*) e as principais equações utilizadas dos modelos matemáticos, que foram divididos em modelo estequiométrico da combustão e modelo de balanço de massa e de energia, nessa ordem, em conjunto. Assim, avalia-se a sensibilidade do circuito da fornalha à alterações na velocidade de fluidização dos sólidos (U_f) na coluna do *riser*, a taxa de recirculação dos sólidos (G_s), o excesso de ar (ϕ) utilizado na combustão e o tipo de combustível, com base em dimensionamento estipulado previamente do equipamento. Como resposta, obtém-se a temperatura média da fornalha, as demandas de combustível e do ar de combustão, bem como as taxas mássicas dos efluentes gasosos e dos resíduos sólidos produzidos.

MODELO ESTEQUIOMÉTRICO DA COMBUSTÃO

O Quadro 1 traz algumas informações pertinentes aos combustíveis testados, como a composição atômica, cinzas, umidade e calor específico do próprio combustível e das cinzas resultantes. Os valores referentes ao carvão foram extraídos de Basu (2006) e de biomassa de Sánchez (2010).

Quadro 1 – Propriedades físico-químicas dos combustíveis

Variável	Valor		Unidade
	Carvão	Biomassa	
C%	56,59	42,07	%
H%	4,21	5,14	%
O%	5,69	39,28	%
N%	0,9	0,17	%
S%	4,99	0,01	%
ASH%	20,6	0,35	%
Mf%	7,1	12,9	%
C _c	1,05	1,05	kJ/kg°C
C _{cz}	1,05	1,05	kJ/kg°C

Fonte: Autoria própria (2019)

As Equações (1-10) descrevem a estequiometria de combustão (BASU, (2006)

$$M_{da} = [11,53C + 34,34(H - O/8) + 4,34S + A \cdot S] \quad (1)$$

$$T_{da} = (1 + \phi) \cdot M_{da} \quad (2)$$

$$M_{wa} = T_{da} (1 + X_m) \quad (3)$$

$$L_q = \frac{100 S}{32 X_{CaCO_3}} \cdot R \quad (4)$$

$$R' = \left(R - \frac{32 X_{CaO}}{56 S} \right) \quad (5)$$

$$L_w = 136 \frac{S}{32} E_{sor} + 56 \left(\frac{L_q X_{CaCO_3}}{100} - \frac{S E_{sor}}{32} \right) + \frac{40 L_q X_{MgCO_3}}{84} + L_q X_{inerte} \quad (6)$$

$$W_a = [L_w + ASH + (1 - \eta) - X_{CaO}] \quad (7)$$

$$W_c = M_{wa} - 0,2315 M_{da} + 3,66 C + 9 H + L_q X_{mi} + N + O + 2,5 S (1 - E_{sor}) + 1,375 R \left(1 + \frac{1,19 X_{MgCO_3}}{X_{CaCO_3}} \right) + a_c ASH \quad (8)$$

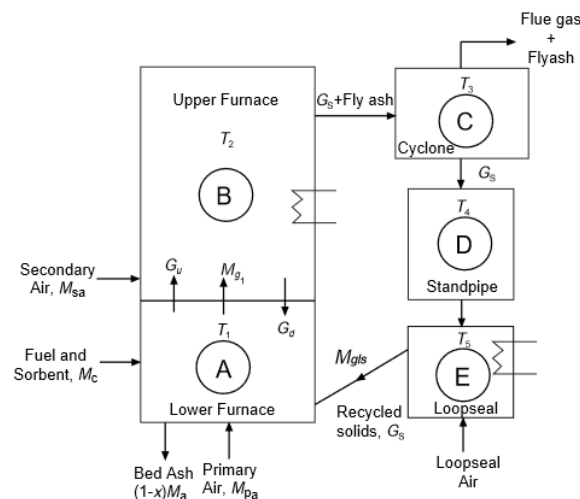
$$HHV = 33.823 C + 144.249 (H - O/8) + 9.418 S \quad (9)$$

$$LHV = HHV - 22.604 H - 2.581 M_f \quad (10)$$

BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA

As equações dos balanços de massa e de energia foram descritas para as cinco seções do sistema CFB apresentado na Figura 2, com base no procedimento adotado por Basu (2006).

Figura 2- Volumes de balanço da caldeira em CFB



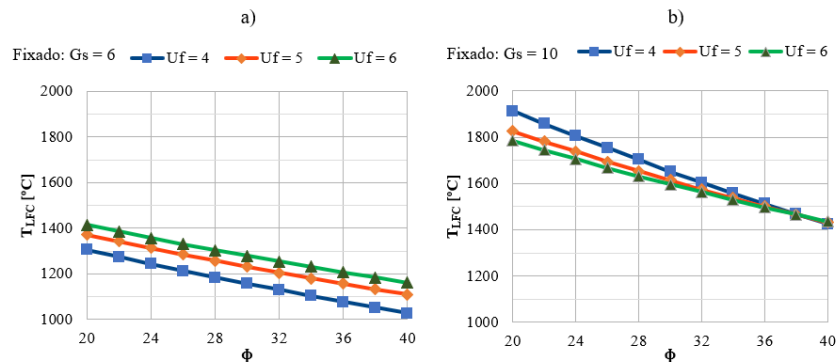
Fonte: Basu (2006)

Os balanços de massa e energia são considerados em regime estacionário. Para o balanço mássico, separa-se as fases entre sólida e gasosa. Para o balanço energético, frisa-se a presença da combustão, calores sensíveis da matéria e trocas de calor com as paredes e ambiente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram obtidos para taxas de recirculação de sólidos (G_s) nos valores de 6, 8 e 10 $\text{kg/m}^2\text{s}$, velocidade de fluidização (U_f) nos valores de 4, 5 e 6 m/s e o excesso de ar (ϕ) nos valores de 20% a 40%, com passos de 2%. A Figura 3 exprime os resultados da temperatura média da fornalha (T_{LFC}). A Figura 3a possui G_s fixado em 6 $\text{kg/m}^2\text{s}$ enquanto a Figura 3b possui G_s de 10 $\text{kg/m}^2\text{s}$.

Figura 3- Temperatura média da fornalha em função de ϕ

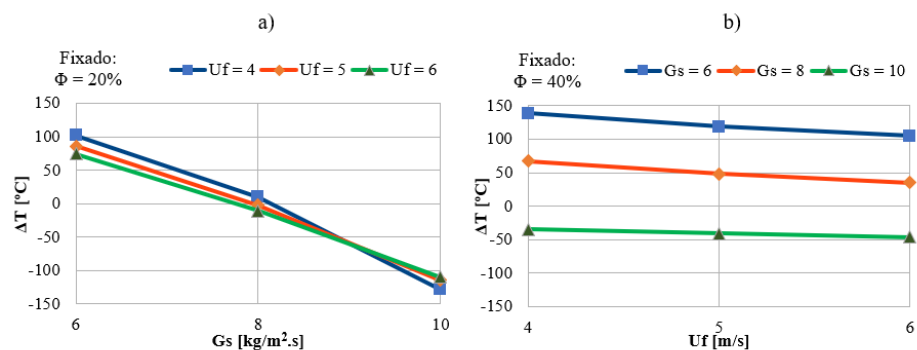


Fonte: Autoria própria (2019)

Semelhante ao comportamento da Figura 3, em relação à temperatura da parede, foi possível observar por meio dos gráficos que ela aumenta com o incremento de G_s e de U_f , diminuindo com o aumento de ϕ . Porém, visualizou-se que com o G_s igual à 10 $\text{kg/m}^2\text{s}$ houve a inversão da proporcionalidade entre a temperatura e U_f , bem como a convergência da temperatura para diferentes valores de U_f em valores de ϕ entre 36% e 40%.

A Figura 4 demonstra que a diferença entre as temperaturas da seção da fornalha baixa e da *loop-seal* (ΔT) ficam menores com o incremento tanto de U_f quanto de G_s . Valores altos dessas duas variáveis resultam em ΔT negativo, ou seja, a temperatura da válvula é maior que a da fornalha baixa.

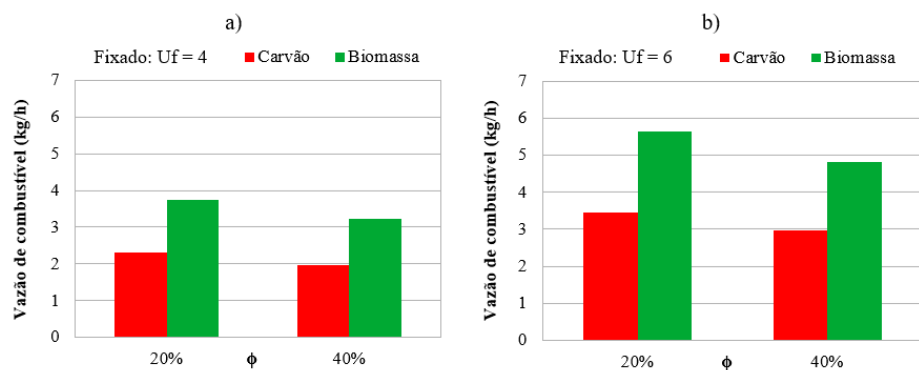
Figura 4- Diferença de temperatura entre a seção da fornalha baixa e da *loop-seal*



Fonte: Autoria própria (2019)

Já a Figura 5 relaciona as variáveis e o tipo de combustível (até então utilizou-se somente o carvão mineral) com a vazão mássica de abastecimento de combustível na fornalha. Pela figura é possível visualizar o aumento da necessidade de combustível para maiores valores de U_f e menores valores de ϕ , assim como a maior demanda de biomassa em relação à do carvão mineral. Adicionalmente, o G_s não é levado em consideração, pois ele não afeta os valores das vazões mássicas.

Figura 5- Vazão da demanda de combustível para cada tipo



Fonte: Autoria própria (2019)

CONCLUSÃO

O objetivo de simular uma caldeira com leito fluidizado circulante e analisar a estequiometria de combustão e os balanços de massa e energia, no software EES™, foi proveitoso no âmbito de estudar as diferentes configurações de como a planta piloto estipulada se comportaria diante de diferentes escolhas operacionais.

Pode-se observar que a velocidade de fluidização teve um papel relevante, ditando a demanda na taxa mássica de combustível e do ar de combustão na fornalha. Por outro lado, a taxa de recirculação de sólidos promoveu um maior impacto na distribuição das temperaturas ao longo do sistema. Adicionalmente, a variação do excesso de ar de 20 para 40% apresentou impacto significativo na demanda de combustível e na temperatura da fornalha. Finalmente, como esperado, o menor poder calorífico da biomassa levou a menores temperaturas na fornalha e a maior consumo. Mesmo assim, o combustível renovável testado representa uma alternativa viável à queima do carvão mineral na escala dimensional aqui estudada.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos são direcionados à Fundação Araucária pelo apoio financeiro concedido à pesquisa, ao prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne pela orientação e à UTFPR-PG pela estrutura.

REFERÊNCIAS

BASU, P. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

BASU, P., CHENG, L. An analysis of loop seal operations in a circulating fluidized bed. **Chemical Engineering Research and Design**, v.78, p. 991-998, 2009. Disponível em: <<https://www-sciencedirect.ez48.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S026387620071985X>> Acesso em: 18 jun. 2019.

RATTI, G.B. **Efeito da velocidade de fluidização e do inventário de sólidos no perfil de pressão de uma válvula loop-seal acoplada a um sistema de leito fluidizado circulante**. 2015. 74 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6517/1/PG_DAMEC_2015_10.pdf> Acesso em: 18 jun. 2019.

SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Campinas: Editora Átomo, 2010.