



Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos



XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP
Artigo CREEM2012

DIMENSIONAMENTO DE UMA VÁLVULA *LOOP-SEAL* PARA OPERAÇÃO EM SISTEMA DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

Adinaldo Valaszek e Jhon Jairo Ramirez Behainne

UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso de Engenharia Mecânica
Campus Ponta Grossa - Av. Monteiro Lobato, s/n - Km 04 - CEP 84016-210 - Ponta Grossa - Paraná
E-mail para correspondência: adinaldovalaszek@gmail.com e jhon@utfpr.edu.br

Introdução

Válvulas *loop-seal* são dispositivos sem partes mecânicas utilizados para a reciclagem de sólidos em combustores de leito fluidizado circulante (LFC). Estas válvulas possibilitam o incremento do tempo de residência das partículas no leito, melhorando a eficiência da combustão. De acordo com Basu (2006) caldeiras de leito fluidizado circulante apresentam flexibilidade para queima de combustíveis com diferentes propriedades físicas e químicas, temperatura de combustão homogênea, velocidade de fluidização e taxa de recirculação de sólidos elevadas, permitindo ainda a injeção de ar secundário para a minimização das emissões de NO_x e a adição de absorventes de enxofre para a redução das emissões de SO₂.

Em válvulas do tipo *loop-seal*, o fluxo de sólidos é mantido pela ação de uma aeração adequada e pela presença de quantidades apropriadas de sólidos (inventário) nas seções que a conformam. Como descrito por alguns pesquisadores, o projeto que define o dimensionamento e os parâmetros de funcionamento da válvula de recirculação de sólidos é de extrema importância na garantia da estabilidade do sistema de LFC, pois se realizado adequadamente, evitam-se falhas na operação que podem levar ao esvaziamento do leito de sólidos na câmara de combustão ou na coluna de retorno, com a consequente interrupção do processo de queima (RAMIREZ-BEHAINNE, 2009; BASU, 2009).

A revisão da literatura indica que, apesar de ser amplamente utilizada em centenas de unidades de LFC piloto e comerciais, apenas uma quantidade limitada de pesquisa é publicada sobre o funcionamento dos dispositivos *loop-seal*, ainda mais quando diz respeito a estudos em escala de laboratório. Desta forma, percebe-se a necessidade de pesquisas envolvendo modelos de projeto para o dimensionamento destas válvulas e a definição dos parâmetros operacionais nela envolvidos. Este trabalho visa contribuir neste sentido, apresentando uma proposta de modelo matemático que sirva de base para o projeto de unidades geradoras de vapor do tipo LFC em escala comercial alimentadas com combustíveis disponíveis no Brasil.

Objetivos

Este trabalho tem como objetivos o dimensionamento e a determinação dos parâmetros relevantes de uma válvula de recirculação de sólidos do tipo *loop-seal* acoplada a um sistema de leito fluidizado circulante em escala de laboratório, visando à sua operação estável em regime de fluidização rápida.

Metodologia

O modelo matemático utilizado nesta pesquisa corresponde a uma adaptação do modelo proposto por Rodrigues e Nagata (2011), no qual um procedimento de cálculo foi implantado para a determinação das perdas de pressão ao longo de um circuito de LFC operado com válvula de recirculação do tipo válvula-L. Esse modelo foi modificado com o propósito de possibilitar a inserção de uma válvula do tipo *loop-seal* no lugar da válvula-L previamente dimensionada. As equações fundamentais para o dimensionamento da válvula *loop-seal* foram apresentadas nos trabalhos de Basu e Cheng (2000) e Basu e Butler (2009). Mediante as correlações desse modelo são descritos fenômenos simplificados dos regimes de escoamento gás-sólido presentes nos principais componentes do circuito de fluidização (*riser*, ciclone, *standpipe* e válvula de recirculação de sólidos).

O projeto da válvula de recirculação *loop-seal* foi iniciado considerando um balanço de pressão estática ao longo do circuito do sistema de LFC, ilustrado na Figura 1. Este balanço de pressão é definido em termos da somatória das perdas de carga envolvidas em cada componente do equipamento, conforme indicado pela Eq. (1).

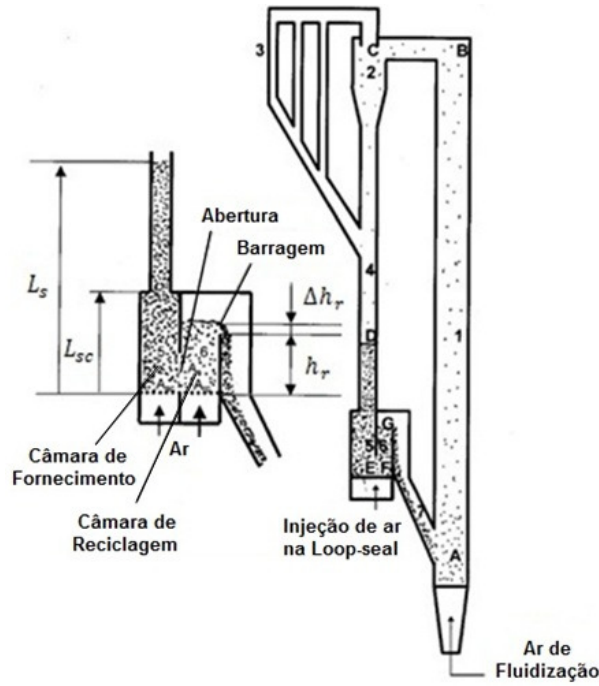


Figura 1 - Circuito CFB com uma válvula *loop-seal*.
Fonte: Adaptado de Basu e Cheng (2000).

$$(P_A - P_B) + (P_B - P_C) + (P_C - P_D) + (P_D - P_E) + (P_E - P_F) + (P_F - P_G) + (P_G - P_A) = 0 \quad (1)$$

O ponto D na Figura 1 representa a superfície superior dos sólidos no *standpipe*. Devido ao pequeno comprimento do trajeto ($B - C$), e às características do escoamento gás-sólido no trajeto ($G - A$), as perdas de pressão correspondentes a estas partes foram consideradas nulas. Assim, de acordo com o balanço de pressão estabelecido no circuito, tem-se que a perda de carga no *standpipe* e câmara de abastecimento (ΔP_{E-D}) é igual à soma das quedas de pressão no *riser* (ΔP_{A-B}), no ciclone (ΔP_{C-D}), na abertura entre as câmaras (ΔP_{E-F}) e na câmara de reciclagem (ΔP_{F-G}), conforme a Eq. (2).

$$\Delta P_{E-D} = \Delta P_{A-B} + \Delta P_{C-D} + \Delta P_{E-F} + \Delta P_{F-G} \quad (2)$$

O cálculo das quedas de pressão no *riser* (ΔP_{A-B}) e no ciclone (ΔP_{C-D}) foi apresentado por Rodrigues e Nagata (2011), não sendo descrito neste trabalho. Por outro lado, a perda de pressão nos três componentes da válvula *loop-seal* (câmara de abastecimento ou de fornecimento, fenda e câmara de reciclagem) foi calculada de acordo com o modelo detalhado a seguir.

Câmara de abastecimento da válvula *loop-seal*

O modelo matemático que fornece o dimensionamento da câmara de abastecimento tem como base as condições do escoamento gás-sólido desenvolvidas no *standpipe*. Neste componente, o movimento de descida das partículas acontece numa condição de leito móvel, no qual a velocidade do gás em relação aos sólidos é quem determina o gradiente de pressão no tubo (BASU, 2009). A perda de energia em toda a extensão desta coluna vertical pode ser tratada como a soma das perdas de energia viscosa e cinética. Deste modo, a queda de pressão no *standpipe* e câmara de abastecimento (ΔP_{E-D}), expressa em Pascal, pode ser obtida pela equação de Ergun modificada, apresentada na Eq. (3):

$$\frac{\Delta P_{E-D}}{L_s} = 150 \left(\frac{(1 - \varepsilon_s)^2}{\varepsilon_s^3} \right) \left(\frac{\mu \Delta u}{(\phi_s d_s)^2} \right) + 1.75 \left(\frac{1 - \varepsilon_s}{\varepsilon_s^3} \right) \left(\frac{\rho_g (\Delta u)^2}{\phi_s d_s} \right) \quad (3)$$

onde Δu representa a velocidade relativa gás-sólido, determinada pela soma da velocidade do gás (u_{sg}) e a velocidade dos sólidos (u_s), conforme a Eq. (4):

$$\Delta u = u_{sg} + u_s = \frac{u_0}{\varepsilon_s} + u_s \quad (4)$$

O valor de u_s é determinado mediante a Eq. (5), na qual estão envolvidas a taxa de recirculação dos sólidos no *standpipe* (G_{ssp}), a densidade dos sólidos (ρ_s) e a porosidade do leito de partículas na coluna (ε_s):

$$u_s = \frac{G_{ssp}}{\rho_s(1 - \varepsilon_s)} \quad (5)$$

O valor de G_{ssp} , indicado em kg/m².s, é determinado pela expressão da Eq. (6), em termos da descarga de sólidos despejada no *standpipe* (\dot{m}_{ssp}) que é fornecida pelos modelos do *riser* e do ciclone, e do diâmetro da seção transversal da coluna (M):

$$G_{ssp} = \dot{m}_{ssp} \left(\frac{4}{\pi M^2} \right) \quad (6)$$

De acordo com Basu (2006), a aeração em uma válvula de recirculação deve ser fornecida em quantidade suficiente para que, no duto, a velocidade de mínima fluidização das partículas iguale à velocidade relativa entre o gás e os sólidos que descem. Assim, a velocidade mínima de fluidização na válvula *loop-seal* (u_{mf}), expressa em m/s, foi calculada pela Eq. (7):

$$u_{mf} = \frac{\mu}{d_s \rho_g} [(27.2^2 + 0.0408 A_{rL})^{0.5} - 27.2] \quad (7)$$

Com o número de Arquimedes (A_{rL}) sendo determinado pela Eq. (8), em termos da densidade dos sólidos (ρ_s) e do gás (ρ_g), da viscosidade dinâmica do gás (μ), do diâmetro médio das partículas (d_s) e da aceleração da gravidade (g):

$$A_{rL} = \frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)gd_s^3}{\mu^2} \quad (8)$$

Com a resolução das Eqs. (1) a (8) encontra-se a velocidade do gás no *standpipe* (u_0), podendo esta ser positiva no caso de um fluxo em sentido ascendente, ou negativa, referente a um fluxo de gás em sentido descendente. A partir do valor de u_0 , calcula-se a vazão de ar no *standpipe* e na câmara de abastecimento (Q_{SP}), expresso em m³/s, segundo a Eq. (9):

$$Q_{SP} = u_0 A_{sp} \quad (9)$$

Finalmente, mediante as Eqs. (10) e (11) determinam-se os inventários de sólidos no *standpipe* e na câmara de abastecimento, respectivamente (BASU e CHENG, 2000):

$$I_{ssp} = (1 - \varepsilon_s) \rho_s A_{sp} (L_s - L_{sc}) \quad (10)$$

$$I_{sca} = (1 - \varepsilon_s) \rho_s A_{sc} L_{sc} \quad (11)$$

nas quais, A_{sp} representa a área da seção transversal do *standpipe*; A_{sc} , a área da seção transversal da câmara de abastecimento; L_s , a altura de sólidos acumulados no *standpipe*, e L_{sc} , a altura da câmara de abastecimento.

Abertura entre as câmaras de abastecimento e reciclagem (fenda)

Para o cálculo da queda de pressão através da passagem horizontal na *loop-seal* (ΔP_{E-F}), foi aplicada a expressão da Eq. (12), apresentada por Kuramoto *et al.* (1986):

$$\Delta P_{E-F} = 0.66 \left(\frac{A_f}{A_{sc}} \right)^{-1.2} G_{sf} \quad (12)$$

onde A_f é a área da abertura entre as câmaras, A_{sc} , a área da seção transversal da câmara de abastecimento e G_{sf} , a taxa de recirculação dos sólidos pela fenda.

De acordo com Basu e Butler (2009), a velocidade do ar na fenda (U_H), necessária para o transporte de sólidos através da passagem horizontal, pode ser aproximada conservadoramente ao valor de $1.5 u_{mf}$. Este valor é atribuído ao acúmulo de sólidos na porção horizontal da válvula, gerando um movimento que depende basicamente da pressão hidrostática e da força de arrasto gerada pelo movimento do gás.

Com a obtenção da velocidade horizontal (U_H), calcula-se a vazão de ar que atravessa a fenda da válvula (Q_H), expressa em m^3/s , por meio da Eq. (13):

$$Q_H = U_H A_f \quad (13)$$

Câmara de reciclagem

Na câmara de reciclagem, os sólidos são fluidizados pelo ar que entra pelo fundo desta seção. Uma câmara adequadamente projetada deve permitir que o nível do leito ultrapasse a altura da barragem, conforme ilustrado na Figura 1, liberando o fluxo de sólidos para o tubo de reciclagem e ao *riser*. De acordo com Basu e Cheng (2000), a queda de pressão na câmara de reciclagem (ΔP_{F-G}) pode ser determinada de forma aproximada pela Eq. (14):

$$\Delta P_{F-G} = (1 - \varepsilon_r)(h_r + \Delta h_r)\rho_s g \quad (14)$$

A altura da barragem da câmara de reciclagem (h_r), medida em metros, foi estabelecida como sendo o dobro da altura da seção transversal da fenda por onde passam os sólidos. Por outro lado, a altura de sólidos suspensos acima da barreira (Δh_r) pode ser encontrada por meio da teoria da crista fina (WHITE, 1999). De acordo com esta teoria, o fluxo volumétrico dos sólidos fluidizados (Q_s), medido em m^3/s , pode ser escrito pela Eq. (15):

$$Q_s = C_d g^{0.5} \Delta h_r^{1.5} W \quad (15)$$

onde C_d é o coeficiente de descarga, W , a largura da barragem e, g , a aceleração da gravidade. Estudos realizados por Bagheri e Heidarpour (2010) definem uma razão de crista que possibilita considerar um valor de Δh_r igual a $0.15 h_r$, com erro de aproximadamente $\pm 3\%$.

Basu e Cheng (2000) definem a porosidade na câmara de reciclagem (ε_r) por meio da Eq. (16):

$$\varepsilon_r = \frac{u_r + 1}{u_r + 2} \quad (16)$$

Na qual, a velocidade do gás na câmara de reciclagem (u_r) deve ser suficiente para transportar os sólidos advindos da câmara de abastecimento e promover o transbordamento destes sólidos pela barragem. O valor de $u_r = 3 u_{mf}$ foi considerado neste trabalho. Deste modo, o cálculo da vazão de ar que atravessa a câmara de reciclagem (Q_{CR}), indicado em m^3/s , é obtido pela Eq. (17):

$$Q_{CR} = u_r A_{cr} \quad (17)$$

O inventário de sólidos necessário na câmara de reciclagem, expresso em kg, é dado pela Eq. (18), apresentada por Basu e Cheng (2000):

$$I_{scr} = (1 - \varepsilon_r)\rho_s A_{cr}(h_r + \Delta h_r) \quad (18)$$

Finalmente, o inventário total de sólidos em todo o circuito do sistema de leito fluidizado circulante foi determinado pela soma dos inventários de sólidos em cada trajeto analisado, conforme Eq. (19):

$$I_{sT} = I_{sr} + I_{ssp} + I_{sca} + I_{scr} \quad (19)$$

Aeração total requerida na válvula *loop-seal*

A aeração necessária em cada uma das câmaras da válvula *loop-seal* é determinada mediante um balanço de massa. Assim, considerando também a densidade do gás, o requerimento de aeração total na válvula *loop-seal* (Q_T), expressa em m^3/s , pode ser obtida pela Eq. (20):

$$Q_T = (Q_{SP} + Q_{CR}) \quad (20)$$

Resultados

O modelo semi-empírico anteriormente descrito foi aplicado a partículas de areia quartzosa com tamanho médio de 200 μm , a fim de obter as principais dimensões e condições operacionais de uma válvula do tipo *loop-seal* acoplada a um sistema de leito fluidizado circulante em escala de laboratório. A Tabela 1 ilustra os dados de entrada do modelo e a fonte das informações.

Tabela 1 - Variáveis de entrada do modelo.

Variável	Valor	Referência
Temperatura de operação (T_b)	800 °C	Assumido
Esfericidade dos sólidos (Φ_s)	0,75	Basu (2006)
Densidade dos sólidos (ρ_s)	2650 kg/m ³	Ramirez-Behainne (2007)
Porosidade média no fundo do <i>riser</i> (ϵ_a)	0,9	Basu (2006)
Diâmetro médio de Sauter (d_s)	200 μm	Assumido
Diâmetro do riser (D_r)	0,078 m	Assumido

As equações do modelo matemático foram resolvidas com a utilização do *software* EES®. Após execução do programa, obtiveram-se os seguintes resultados:

Tabela 2 - Variáveis de saída do modelo.

Variável	Valor
Altura do riser (H)	2,707 m
Taxa de recirculação externa dos sólidos na saída do riser (G_s)	33,5 kg/m ² .s
Velocidade de fluidização (u)	5,441 m/s
Descarga de sólidos no <i>standpipe</i> (\dot{m}_{ssp})	0,16 kg/s
Diâmetro hidráulico para a <i>loop-seal</i> (D_h)	0,0551 m
Velocidade mínima de fluidização na <i>loop-seal</i> (u_{mf})	0,01787 m/s
Aeração total da válvula <i>loop-seal</i> (Q_T)	$1,179 \cdot 10^{-4}$ kg/s
Altura da barragem da câmara de reciclagem (h_r)	0,1102 m
Altura de sólidos acumulados no <i>standpipe</i> (L_s)	0,4655 m
Inventário total de sólidos no sistema de LFC (I_{ST})	4,179 kg
Queda de pressão no <i>riser</i> (ΔP_{A-B})	4158 Pa
Queda de pressão no ciclone (ΔP_{C-D})	121,1 Pa
Queda de pressão no <i>standpipe</i> e câmara de abastecimento (ΔP_{E-D})	5919 Pa
Queda de pressão na abertura ou fenda (ΔP_{E-F})	34,79 Pa
Queda de pressão na câmara de reciclagem (ΔP_{F-G})	1605 Pa

Dados de experimentos encontrados na literatura permitem testar o modelo proposto. A Tabela 3 apresenta o valor aproximado de taxa de fluxo de sólidos para uma determinada velocidade de aeração na *loop-seal* e a velocidade do gás no *riser*, permitindo a comparação de dados experimentais com os resultados do modelo proposto.

Tabela 3 - Taxa de fluxo de sólidos para uma determinada aeração na válvula *loop-seal* e velocidade do gás no *riser*.

Taxa de fluxo de sólidos (G_s)	Velocidade de aeração na <i>loop-seal</i> (u_{mf})	Velocidade do gás no <i>riser</i> (u)	Autores
50.0 kg/m ² .s	0.02 m/s	4.5 m/s	Basu e Cheng (2000)
52.71 kg/m ² .s	0.01787 m/s	5.441 m/s	Modelo proposto

Com os resultados apresentados na Tabela 4 é possível realizar uma outra comparação, desta vez, referente à altura de sólidos atingida no *standpipe* para uma determinada velocidade de aeração na *loop-seal* e velocidade do gás no *riser*.

Tabela 4 – Altura de sólidos no *standpipe* para uma aeração na *loop-seal* e velocidade do gás no *riser*.

Altura de sólidos no <i>standpipe</i> (L_s)	Velocidade de aeração na <i>loop-seal</i> (u_{mf})	Velocidade do gás no <i>riser</i> (u)	Autores
0.45 m	0.018 m/s	5.2 m/s	Basu e Cheng (2000)
0.4655 m	0.01787 m/s	5.441 m/s	Modelo proposto

Como indicado pelas Tabelas 3 e 4, os resultados obtidos pelo modelo sugerem que este se ajusta bem a resultados experimentais. Infelizmente, outras comparações e testes apresentaram-se inviáveis, devido à ausência de estudos referentes ao funcionamento de válvulas do tipo *loop-seal* em pequena escala e com formas construtivas semelhantes.

A Figura 2 ilustra um esquema da válvula *loop-seal* projetada, em vista tridimensional, criada no software *Solid Edge ST3*.

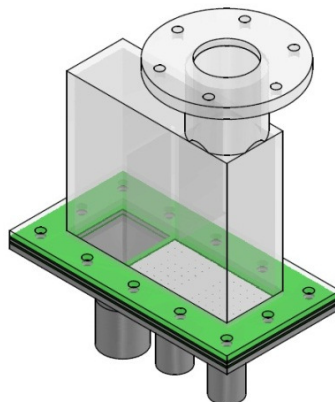


Figura 2 – Esquema 3D da válvula *loop-seal* projetada utilizando o modelo proposto.

Conclusões

O modelo semi-empírico adotado neste trabalho permitiu o desenvolvimento de uma metodologia prática e a adoção de um procedimento de cálculo útil no dimensionamento e na definição das condições operacionais apropriadas de uma válvula de recirculação de sólidos do tipo *loop-seal*. A comparação de resultados com dados encontrados na literatura sugerem que o modelo apresenta potencial para aplicação no projeto preliminar de reatores de LFC, principalmente em caldeiras para geração de energia elétrica integradas a ciclos de potência com turbina a vapor. A válvula projetada poderá ser utilizada em estudos experimentais de caracterização do escoamento gás-sólido a frio ou a quente em sistemas de leito fluidizado circulante construídos em escala de laboratório, visando o dimensionamento futuro e a utilização do dispositivo em caldeira de leito fluidizado circulante para a conversão energética mais eficiente e menos poluente de combustíveis sólidos, como carvão mineral brasileiro e diversas biomassas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa pelo apoio financeiro destinado a esta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Bagheri, S.; Heidarpour, M. Application of free vortex theory to estimating discharge coefficient for sharp-crested weirs. *Biosystems engineering* 105 (2010) 423-427.
- Basu, P.; Cheng, L. An analysis of loop seal operations in a circulating fluidized bed. Institution of Chemical Engineers. *Trans IChemE*, Vol. 78, Part A, October 2000.
- Basu, P. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. Ed. Taylor & Francis, Boca Raton-U.S.A, 2006, 473p.
- Basu, P.; Butler, J. Studies on the operation of loop-seal in circulating fluidized bed boilers. *Applied Energy* 86 (2009) 1723–1731.
- Kuramoto, K., Kunii, D. and Furusawa, T., 1986, Flow of dense fluidized particles through an opening in a circulation system, *Powder Technology*, 47: 141-149.
- Ramirez-Behainne, J. J.; Martins, G.A semi-empirical model to calculate the inert solids Inventory and the main dimensions of a CFB reactor aiming biomass thermochemical conversion. In: *International Congress of Mechanical Engineering*, 20, 2009, Gramado. Anais... Gramado: COBEM, 2009.
- Rodrigues, A. F.; Nagata, V. B.; Projeto de uma caldeira de leito fluidizado circulante em escala de laboratório. 2011. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa.
- White, Frank M. *Fluid Mechanics*: Fourth Edition. Island: McGraw Hill, 1999. p. 659-710.