

## SIMULAÇÃO DE PARÂMETROS FLUIDODINÂMICOS EM SISTEMA DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE A FRIO ALIMENTADO COM MISTURA TERNÁRIA DE SÓLIDOS

Adinaldo Valaszek (Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica da UTFPR, Campus Ponta Grossa)  
E-mail: adinaldovalaszek@gmail.com

Relander Martins (Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica da UTFPR, Campus Ponta Grossa)  
E-mail: relandermartins@hotmail.com

Jhon Jairo Ramirez Behainne (Professor do Departamento de Mecânica – UTFPR, Campus Ponta Grossa)  
E-mail: jhon@utfpr.edu.br

**Resumo:** Neste trabalho, o comportamento de parâmetros fluidodinâmicos a frio nos principais componentes de um sistema de leito fluidizado circulante (LFC) em escala de laboratório é simulado a partir de um modelo matemático semi-empírico adaptado para misturas ternárias de sólidos, constituídas por partículas de carvão mineral paranaense, serragem de madeira e areia quartzosa. O sistema é composto por um *riser* com diâmetro interno de 0,078 m e 2,7 m de altura, um ciclone de alta eficiência, um *standpipe* com diâmetro interno de 0,053 m, e uma válvula de recirculação de sólidos do tipo L. Nas simulações, o inventário total de sólidos, a relação de mistura combustível/inventário total e a velocidade de fluidização foram consideradas variáveis de entrada, variando nas faixas de 3,5 a 5,5 kg, 2,5 a 5,0% e de 4,0 a 5,0 m/s, respectivamente. Com o aumento do inventário total de sólidos foi verificado o incremento na queda de pressão em todos os componentes do circuito de fluidização. Em relação ao efeito produzido pela mistura combustível/inventário total, foram observadas mudanças nos parâmetros operacionais do sistema como consequência das alterações na densidade média do leito e na área de contato partícula-parede. Testes experimentais foram realizados numa unidade de fluidização rápida a frio em escala de laboratório, a fim de comparar os resultados das simulações. A análise dos desvios mostrou que o modelo proposto reproduz satisfatoriamente as condições experimentais testadas.

**Palavras-chave:** Leito Fluidizado Circulante, Misturas Ternárias, Fluidodinâmica Gás-Sólido.

## PREDICTION OF HYDRODYNAMICS PARAMETERS IN A COLD GÁS-SOLID FLOW CIRCULATING FLUIDIZED BED SYSTEM FED WITH TERNARY MIXTURES

**Abstract:** In this work, the behavior of hydrodynamics parameters in main components of a cold gas-solid flow bench-scale circulating fluidized bed (CFB) is simulated by using a semi-empirical mathematical model previously adapted for including ternary mixtures of solids. The simulated system is composed by a riser with internal diameter of 0.078 m and height of 2.7 m, a high efficiency cyclone, a standpipe with internal diameter of 0.058 m, and a L-type recycle valve. Simulations of operational conditions with the total solids inventory varying from 3.5 to 5.0 kg, the fuel to total solids inventory mass ratio from 2.5 to 5.0% and the fluidizing gas velocity from 4.0 to 5.0 m/s were obtained. Results verified that the static pressure drop through main components of the fluidization loop increases with the total solids inventory. In the other hand, some significant effects in operational parameters were observed at different fuel to total solids inventory mass ratio being used, which is explained by alterations promoted on both the mean bed density and particle-wall contact area. Experimental tests were carried out in a bench-scale circulating fluidized bed unit in order to obtain data for comparisons. The analysis of deviations showed that the experimental conditions tested can be reasonably predicted by using the proposed mathematical model.

**Keywords:** Circulating Fluidized Bed, Ternary Mixtures, Gas-solid Hydrodynamics

## 1. INTRODUÇÃO

Leitos fluidizados circulantes (LFC) são sistemas com aplicações em diversas áreas, principalmente na conversão de energia, processos petroquímicos, minerais e físicos. Um maior destaque é dado para a combustão e, mais recentemente, para o processo de co-combustão envolvendo misturas ternárias de material combustível, biomassa e material inerte. A co-combustão em leitos fluidizados circulantes mostrou vantagens associadas à alta eficiência de combustão e baixa emissão de poluentes, características fortemente dependentes da fluidodinâmica da mistura sólida (SUN, et al, 2013;. GUNGOR, 2013).

A distribuição mássica dos sólidos nos componentes de um sistema de LFC é um parâmetro comandado pelo balanço de pressão promovido pelo escoamento gás-sólido ao longo do circuito de fluidização, o qual é composto pelo *riser*, ciclone, *standpipe* e válvula de recirculação de sólidos que utiliza partes mecânicas ou não-mecânicas (BASU, 2006). Muitas pesquisas têm focado seus estudos no balanço de pressão no LFC. Kim et al. (2002) analisou o perfil de pressão estática em um sistema LFC de escala piloto somente com partículas de areia. O resultado encontrado foi que o inventário total de sólidos e a velocidade de fluidização do gás afetam consideravelmente a distribuição de sólidos no sistema, e assim, a queda de pressão nos diferentes componentes do LFC.

No caso de misturas binárias de sólidos, pesquisas prévias (RAO e BHEEMARASETTI, 2001; FORMISANI e GIRIMONTE, 2003; SAHOO e ROY, 2008; PAUDEL e FENG, 2013) concentraram-se, principalmente, na determinação da velocidade mínima de fluidização e no estudo de fenômenos gás-sólido (como a segregação de partículas), bem como, em outras variáveis de interesse operacional próprias de unidades de leito fluidizado borbulhante (LFB). Por outro lado, estudos sobre a fluidodinâmica de misturas ternárias de sólidos em leitos fluidizados borbulhantes e circulantes são escassos na literatura. Jena, et al., (2008) e Asif (2013) realizaram estudos focados na queda de pressão gás-sólido e na velocidade mínima de fluidização do gás em leitos contendo mais que dois tipos de partículas.

Este trabalho teve a intenção de contribuir com a simulação de diferentes condições fluidodinâmicas em leito fluidizado rápido a frio, analisando a resposta do circuito de fluidização composto por misturas ternárias de carvão mineral, serragem de madeira e areia de quartzosa. As simulações foram realizadas tendo em conta a proporção de partículas combustíveis no leito, o inventário total de sólidos presentes no circuito e a velocidade de fluidização imposta no sistema.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático semi-empírico proposto neste trabalho corresponde a uma adaptação do modelo fluidodinâmico apresentado por Rodrigues e Beltrane (2011), no qual foram determinadas as principais dimensões de um leito fluidizado circulante (LFC) em escala de laboratório. Modificações no algoritmo de cálculo foram incluídas com o objetivo de simular as condições operacionais do sistema circulante com informações a respeito das características dos sólidos e propriedades dos fluídos previamente definidas. O ponto de inflexão do perfil de porosidade no *riser* ( $H_i$ ) e a taxa de recirculação interna de sólidos no *standpipe* ( $G_s$ ) tornaram-se variáveis de saída do modelo matemático. Deste modo, mantendo a geometria fixa do sistema de LFC foi possível conhecer o efeito do inventário de sólidos totais ( $I_T$ ), da relação de mistura ( $R_m$ ) e da velocidade de fluidização sobre o comportamento fluidodinâmico, em especial, sobre a queda de pressão, taxa de recirculação de sólidos e aeração requerida na válvula de recirculação.

Em relação à velocidade do gás de fluidificação, foi usado um valor acima da velocidade de

transporte, a fim de garantir a presença do regime de fluidização rápida. A escolha do inventário de sólidos baseou-se na informação disponível na literatura e em ensaios preliminares que permitiram avaliar a capacidade de uma unidade de LFC em escala de laboratório atualmente existente. Por outro lado, a proporção da mistura foi definida de acordo com pesquisas apresentadas por Basu (2006).

O equilíbrio de pressão em torno do circuito LFC é expresso pela equação (1):

$$\Delta P_{sp} = \Delta P_{sr} + \Delta P_c + \Delta P_{vl} \quad (1)$$

onde  $\Delta P_{sp}$  é a queda de pressão no *standpipe*. Considerando a região do ciclone, a variação de pressão total ( $\Delta P_c$ ) é estabelecida pela equação (2), de acordo com Basu (2006):

$$\Delta P_c = \Delta P_\varepsilon + \Delta P_f \quad (2)$$

onde  $\Delta P_\varepsilon$  e  $\Delta P_f$  representam a variação de pressão no vórtice interno e perda por fricção com as paredes do ciclone, respectivamente. Estes termos são determinados por meio da equação (3) e (4):

$$\Delta P_f = f_w \frac{A_{sit}}{0.9Q} \frac{\rho_g}{2} (u_a u_i)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

$$\Delta P_\varepsilon = \left[ 2 + 3 \left( \frac{u_i}{v_i} \right)^{\frac{4}{3}} + \left( \frac{u_i}{v_i} \right)^2 \right] \frac{\rho_g}{2} v_i^2 \quad (4)$$

onde  $f_w$  é o coeficiente de atrito do fluxo gás-sólido;  $A_{sit}$  é a área total interna do ciclone,  $Q$  é o fluxo de gás que entra no ciclone;  $u_a$  representa a velocidade tangencial no raio externo do ciclone e  $v_i$  representa a velocidade média dos gases no tubo de saída. Ambas as relações são dependentes da densidade do gás ( $\rho_g$ ) e da velocidade tangencial no diâmetro interno do duto de saída do gás ( $u_i$ ).

Outra variação de pressão é  $\Delta P_{vl}$ , que representa a queda de pressão na válvula L. Esta queda ocorre, principalmente, devido ao acúmulo de sólidos no comprimento horizontal que comunica a seção do *riser* com o ponto de aeração.

$$\Delta P_{vl} = 216 \frac{G_{svl}^{0.17}}{M^{0.63} D_s^{0.15}} L_{ad} \quad (5)$$

onde  $G_{svl}$  representa a taxa de recirculação de sólidos através do tubo vertical;  $M$ , o diâmetro interno do tubo vertical e válvula L;  $D_s$ , o diâmetro de Sauter das partículas e  $L_{ad}$ , a distância entre o ponto de reciclagem de sólidos e aeração.

A queda de pressão acima do ponto de reciclagem de sólidos no duto riser ( $\Delta P_{sr}$ ) pode ser calculada mediante a equação (6):

$$\Delta P_{sr} = \Delta P_r - g (1 - \varepsilon_a) \rho_s H_{sr} \quad (6)$$

na qual,  $\Delta P_r$  representa a variação da pressão em todo o comprimento do *riser*;  $\varepsilon_a$ , a porosidade média da parte inferior do *riser*;  $\rho_s$ , a densidade das partículas sólidas;  $H_{sr}$ , a altura do ponto de reciclagem de sólidos, e  $g$ , a aceleração da gravidade.

Para resolver o sistema de equações do modelo matemático foi utilizado o *software Engineering Equation Solver - EES*®, sendo criado também um diagrama esquemático do sistema experimental, com o intuito de facilitar a entrada de dados e a visualização dos resultados relevantes ao estudo, como apresentado pela Figura 1.

A determinação das características dos sólidos utilizados na simulação do comportamento fluidodinâmico ao longo do sistema é essencial para garantir uma operação adequada. Nesta

simulação o sistema é alimentado com uma mistura ternária de serragem de madeira, carvão mineral do estado do Paraná e areia quartzosa.

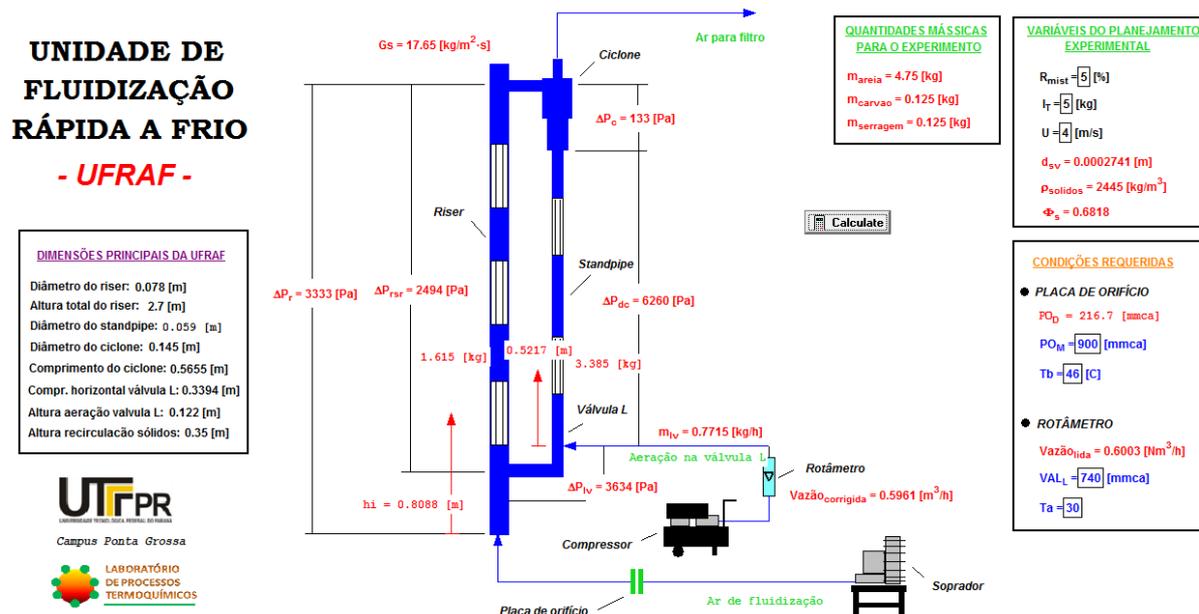


Figura 1 - Diagrama esquemático do processo de fluidização rápida elaborado no EES®.

Para o caso de simulação em regime de fluidização rápida, as principais características dos sólidos que conformam o leito são: diâmetro médio, densidade aparente, esfericidade e velocidade de transporte. Essas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades dos sólidos utilizados na simulação

Sólidos	Diâmetro médio (µm)	Densidade (kg.m <sup>-3</sup> )	Esfericidade (-)	Velocidade de transporte (m.s <sup>-1</sup> )
Areia quartzosa	256	2.522	0,69	3,09
Carvão mineral	513	1.433	0,60	3,22
Serragem de madeira	725	520	0,45	2,30

O material utilizado no leito foi obtido mediante processo de separação, realizado com peneiras padrão demalha *mesh* 50 (300 µm) e *mesh* 70 (212 µm). A densidade aparente das partículas de areia quartzosa e carvão mineral foram obtidos por picnometria em água e etanol, respectivamente, enquanto que para a serragem de madeira foi utilizado um valor de densidade disponível na literatura (ZEN et al., 2007). A esfericidade das partículas foi encontrada usando o método proposto por Massarani e Peçanha (CORTEZ et al., 2008), em que o valor da esfericidade da partícula é calculado a partir da razão entre os diâmetros inscrito e circunscrito das partículas sólidas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Simulações utilizando velocidade do gás de fluidização de 4 m/s e inventário de sólidos entre 3,5 e 5,5 kg foram realizadas com o propósito de prever o comportamento fluidodinâmico, variando a relação de mistura de 2,5% para 5%. Ainda, com a manutenção do inventário de sólidos em 3,5 e 5kg, variou-se a velocidade de fluidização de 4 m/s para 5 m/s, mantendo a relação de mistura no nível superior (5%, considerado mais crítico). Desta maneira analisou-se a resposta do sistema para a variação da velocidade de fluidização.

As dimensões principais do circuito LFC considerados nas simulações são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais dimensões do sistema LFC impostas ao modelo fluidodinâmico.

DIMENSÃO	VALOR (m)
Diâmetro interno da coluna riser ( $D_r$ )	0,078
Altura da base do riser até o ponto de saída para o ciclone (H)	2,700
Diâmetro do ciclone ( $D_c$ )	0,145
Diâmetro do standpipe (M)	0,059
Altura da entrada dos sólidos recirculados ( $H_{sr}$ )	0,350
Altura da entrada de aeração da válvula L ( $L_a$ )	0,122
Comprimento disponível para o standpipe e válvula L ( $L_{dc&lv}$ )	1,403
Comprimento da perna horizontal da válvula L ( $L_{hiv}$ )	0,339

O efeito da variação do inventário de sólidos e relação de mistura sobre a queda de pressão no riser, standpipe e válvula L ilustra-se nas Figuras 2(a), 2(b) e 2(c), respectivamente.

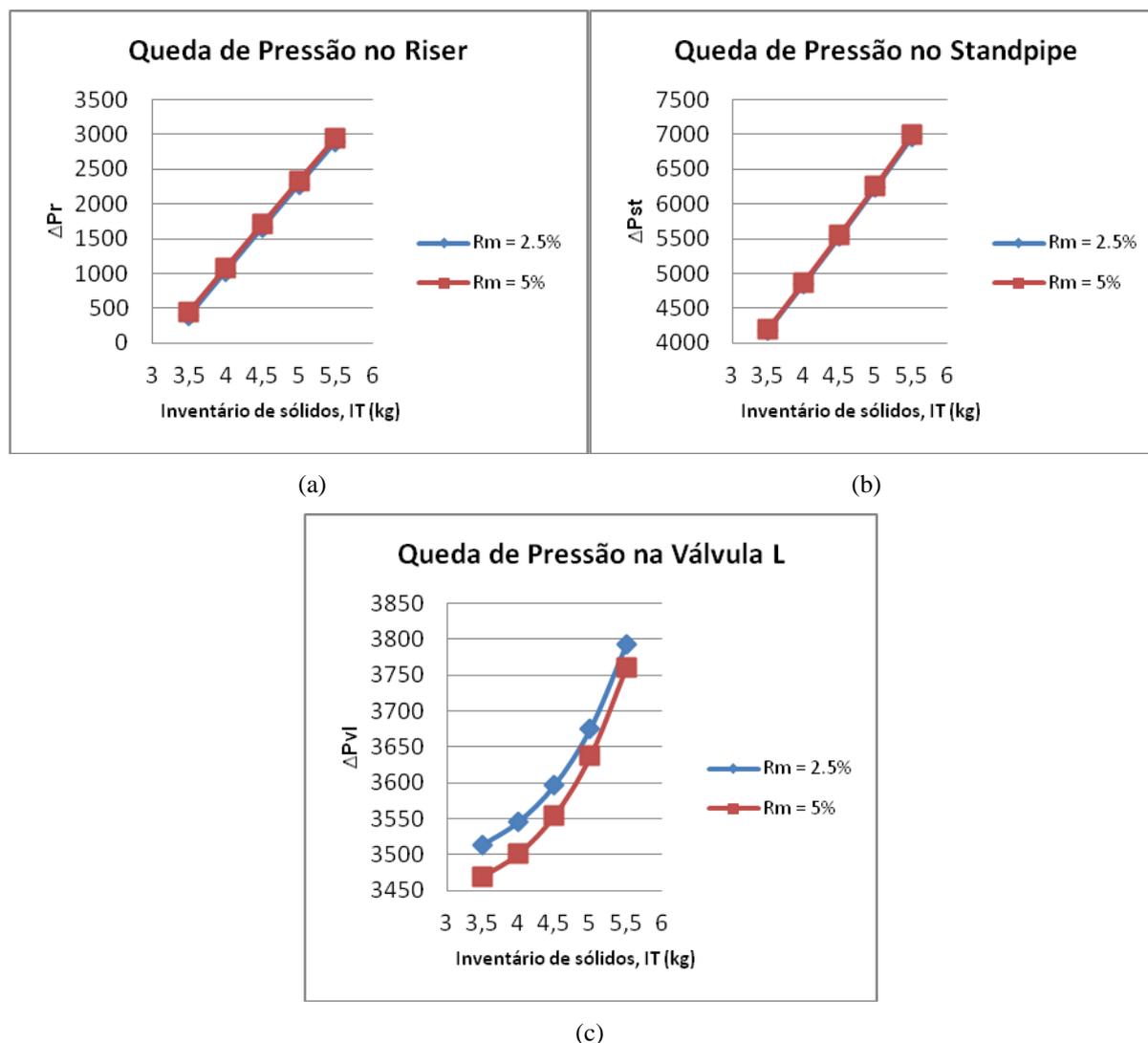


Figura 2 – Queda de pressão nos diversos componentes do LFC, com a variação do inventário de sólidos de 3,5 a 5,5 kg e relação de mistura em 2,5 e 5%.

Nas Figuras 2(a) e 2(b) percebe-se que o aumento do inventário de sólidos no circuito LFC provoca um aumento aproximadamente linear e significativo em termos de queda de pressão no *riser* e *standpipe*. Ao incrementar o inventário de sólidos, uma nova condição de equilíbrio é imposta ao sistema, na qual, o ar de fluidização precisa aumentar a sua pressão para suportar uma maior massa de sólidos. Basu (2006) já mostrava tal fato, destacando que com o aumento da massa de partículas, as regiões do *riser* e dos outros componentes, tornam-se mais densas ou menos porosas, havendo um incremento na pressão por unidade de altura na direção axial. Na válvula L, Figura 2(c), este aumento apresentou valores menos expressivos, principalmente, pela baixa variação na porosidade do leito denso (compactação) obtida entre os pontos de medição da pressão estática.

A queda de pressão no *riser* é ocasionada por três fatores: perda de pressão pela aceleração dos sólidos; perda por atrito dos sólidos com as paredes e perda de pressão devido às mudanças na porosidade do leito. O aumento da relação de mistura de 2,5 para 5%, faz com que haja um aumento do volume do leito (diminuição da porosidade), pois as partículas combustíveis (carvão mineral e serragem de madeira) apresentam uma menor densidade em comparação ao material inerte (areia quartzosa). Com isso, mais sólidos entram em contato com as paredes do *riser* e *standpipe*, apresentando uma maior queda de pressão por atrito nestes componentes, como pode ser visualizado nas Figuras 2(a) e 2(b), respectivamente. Já, na válvula L, os sólidos são mantidos num volume fixo, pelo que uma menor quantidade de massa de sólidos em um mesmo volume reduz a queda de pressão neste componente quando da relação de mistura é utilizada no nível superior. O comportamento da queda de pressão para este componente é ilustrado na Figura 2(c).

A variação na taxa de recirculação de sólidos e na taxa de aeração requerida na válvula L, promovidas pela mudança no inventário de sólidos e relação de mistura, são apresentadas nas Figs. 3(a) e 3(b), respectivamente.

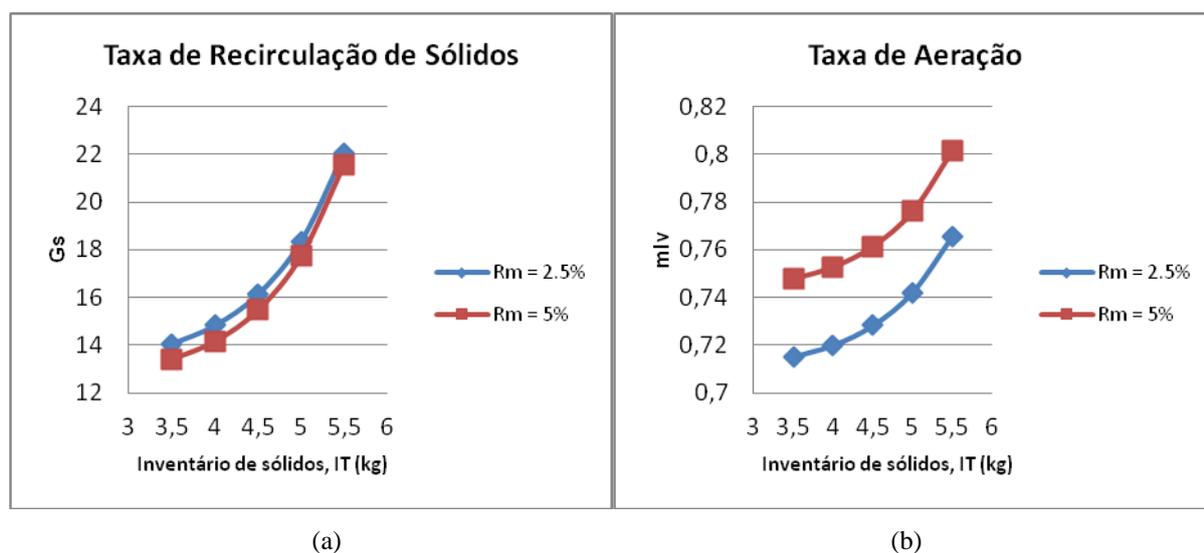


Figura 3 – Taxa de recirculação de sólidos e taxa de aeração, com a variação do inventário de sólidos de 3,5 a 5,5 kg e relação de mistura em 2,5 e 5%.

Os resultados obtidos foram como esperados, pois, com a presença de uma maior quantidade de sólidos no circuito e velocidade de fluidização constante, uma maior taxa de recirculação deverá estar presente devido à menor porosidade do leito. Em relação à variação da relação de mistura, percebe-se na Figura 3(a) que a taxa de recirculação de sólidos é inferior quando utiliza-se uma relação de mistura de 5%. Isto ocorre, principalmente devido à menor

densidade média do leito. Já para a taxa de aeração, Figura 3(b), quando a relação de mistura encontrou-se em valores elevados foi necessária uma maior quantidade de injeção de ar no ponto de aeração, sendo justificável pela menor esfericidade média das partículas do leito e, com isso, maior dificuldade para transporte das partículas ao longo da válvula L.

Outra análise foi realizada em relação à queda de pressão obtida nos diversos componentes do LFC com a variação da velocidade de fluidização de 4 para 5 m/s. Neste caso, manteve-se o inventário de sólidos em 3,5 e 5,5kg e a relação de mistura no nível mais crítico (5%). Os resultados são apresentados nas Figuras 4(a), 4(b) e 4(c).

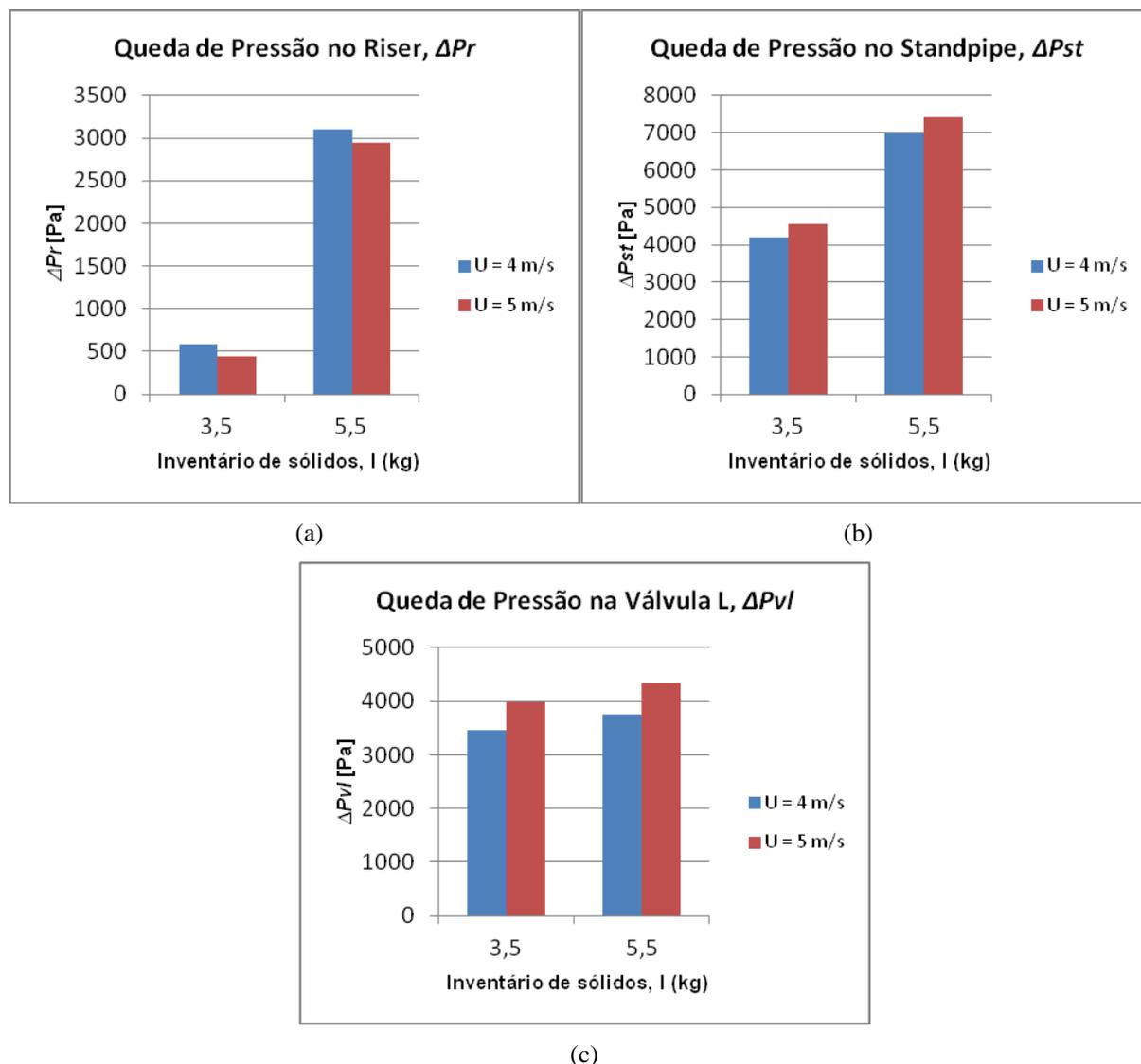


Figura 4 – Queda de pressão nos diversos componentes do LFC, com a variação da velocidade de fluidização de 4 para 5 m/s, inventário de sólidos em 3,5 e 5 kg e manutenção da relação de mistura em 5%.

Ao ocorrer um aumento da velocidade de fluidização na base do riser, uma maior quantidade de sólidos é retirada desta coluna, restando um leito mais diluído ou com menor quantidade de massa, o que produz uma redução da queda de pressão neste componente. Por conseguinte, os sólidos que são retirados da coluna principal, passam pelo ciclone e se acumulam na região do standpipe, aumentando o tamanho da coluna de sólidos formada na seção, e consequentemente, a queda de pressão no mesmo. Com uma maior velocidade de fluidização e taxa de recirculação de sólidos, os efeitos do atrito das partículas com as paredes ficam mais

evidentes na válvula L, resultando em uma maior queda de pressão, como visualizado na Fig. 4(c).

A variação da taxa de recirculação de sólidos e da taxa requerida de aeração com o aumento da velocidade de fluidização é apresentada nas Figs. 5(a) e 5(b), respectivamente.

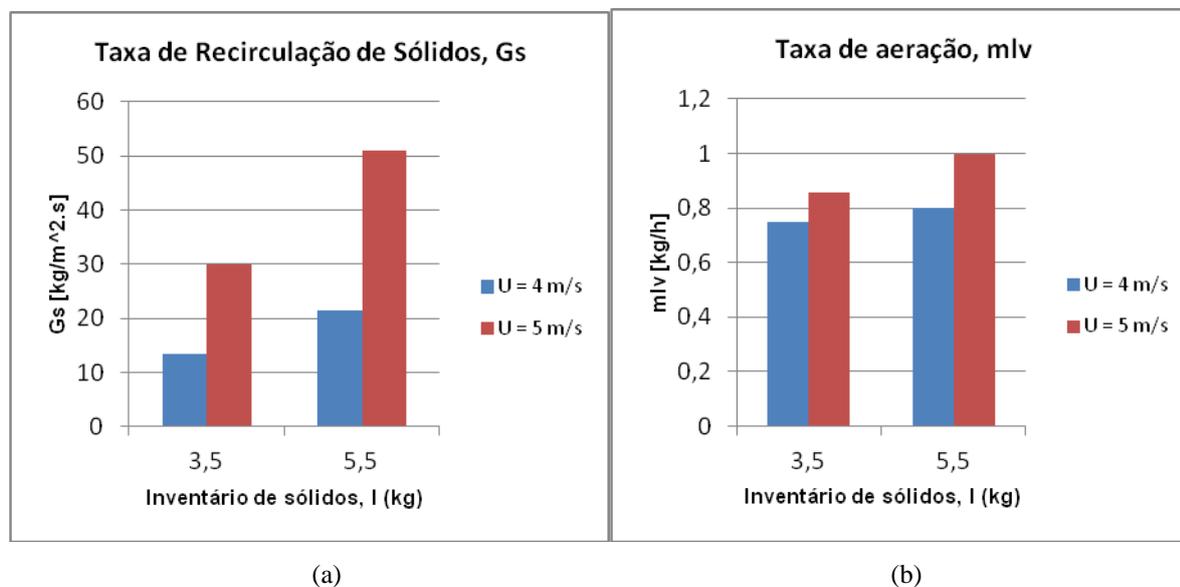


Figura 5 – Taxa de recirculação de sólidos e taxa de aeração com a variação da velocidade de fluidização de 4 para 5 m/s, inventário de sólidos em 3,5 e 5 kg e manutenção da relação de mistura em 5%.

Estes resultados demonstram que, com o aumento da velocidade de fluidização, ocorre também o aumento da recirculação de sólidos e da taxa de aeração necessária para manter a estabilidade do leito fluidizado circulante. Estes resultados sugerem que, no caso da haver uma mudança na velocidade de fluidização, os valores de taxa de aeração devem ser prontamente ajustados, a fim de evitar problemas de instabilidade do leito e a interrupção súbita da operação.

## 5. VERIFICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Ensaio experimentais foram realizados na Unidade de Fluidização Rápida a Frio (UFRAF) do Laboratório de Processos Termoquímicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Ponta Grossa, com o objetivo de verificar os resultados apresentados pelo modelo matemático. As Figuras 5 e 6 ilustram os resultados obtidos a partir do modelo matemático para a queda de pressão nos componentes LFC e os medidos nos testes experimentais. Além disso, uma coluna com o desvio entre os resultados de simulação e experimental é incluída no lado direito de cada um dos gráficos, a fim de facilitar a análise das diferenças obtidas.

As Figuras 5 e 6 mostram que os valores mais elevados de queda de pressão estática medidos acontecem no *standpipe* ( $\Delta P_{st}$ ) e na válvula L ( $\Delta P_{vl}$ ), o que está de acordo com os resultados da simulação. Como visualizado durante as experiências, uma maior concentração de partículas esteve presente nestas duas seções, em comparação com as obtidas nas regiões do *riser* e do ciclone.

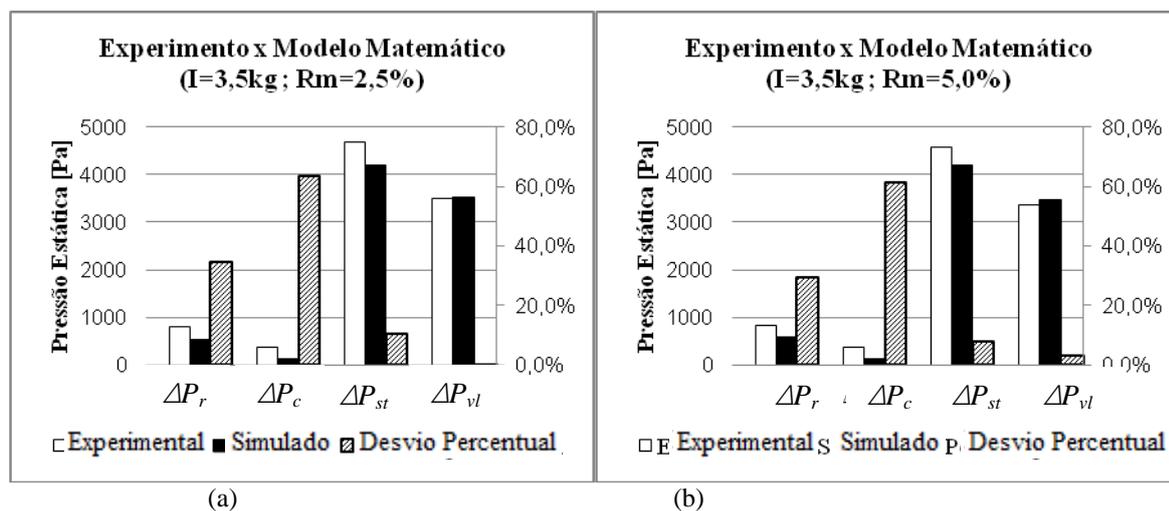


Figura 5 –Valores de queda de pressão estática e desvios entre resultados experimentais e simulados para a variação da relação de mistura no nível baixo de inventário de sólidos.

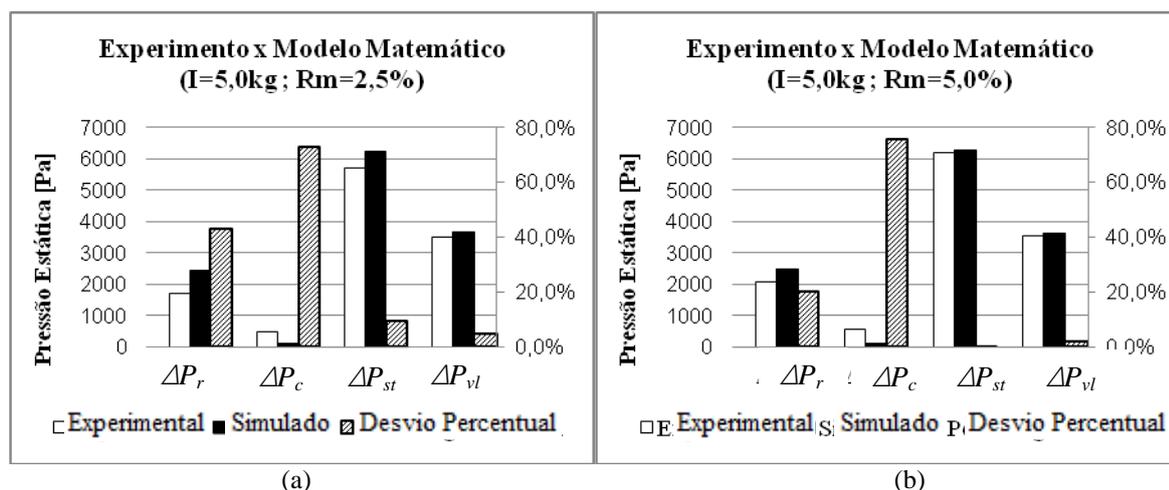


Figura 6 - Valores de queda de pressão estática e desvios entre resultados experimentais e simulados para a variação da relação de mistura no nível alto de inventário de sólidos.

Os maiores valores de desvio entre experimental e modelo matemático foram encontrados no modelo do ciclone ( $\Delta P_c$ ). As pressões estáticas medidas e simuladas nesse componente foram muito baixas. Dificuldades na leitura dos manômetros tipo U, promovidas pelas flutuações de pressão normalmente presentes em um sistema dinâmico de leito fluidizado, pode ter influenciado significativamente na magnitude do desvio neste componente.

As Figuras 5(a) e 5(b) mostram que os resultados a partir do modelo matemático encontram-se mais próximos dos valores medidos experimentalmente quando o inventário de sólidos é fixado em 5 kg e a proporção de mistura é de 5 %, especialmente para as seções do riser e standpipe. Para a válvula L, os melhores resultados foram obtidos a partir do modelo matemático com a proporção de mistura em 2,5 % e o inventário de sólidos de 3,5 kg. As Figuras 6(a) e 6(b) sugerem que a discrepância entre resultado experimental e simulado também diminuiu para o nível elevado de relação de mistura para as regiões do riser, standpipe e válvula L. O oposto ocorre na região do ciclone.

A fim de determinar a sensibilidade do modelo matemático em relação à variação dos níveis de relação de mistura e inventário de sólidos, uma análise baseada na significância estatística dos desvios foi realizada. As Figuras 7 e 8 mostram uma comparação das diferenças

encontradas entre os resultados do modelo matemático e experimental para as quedas de pressão no *riser*, ciclone, *standpipe* e válvula L.

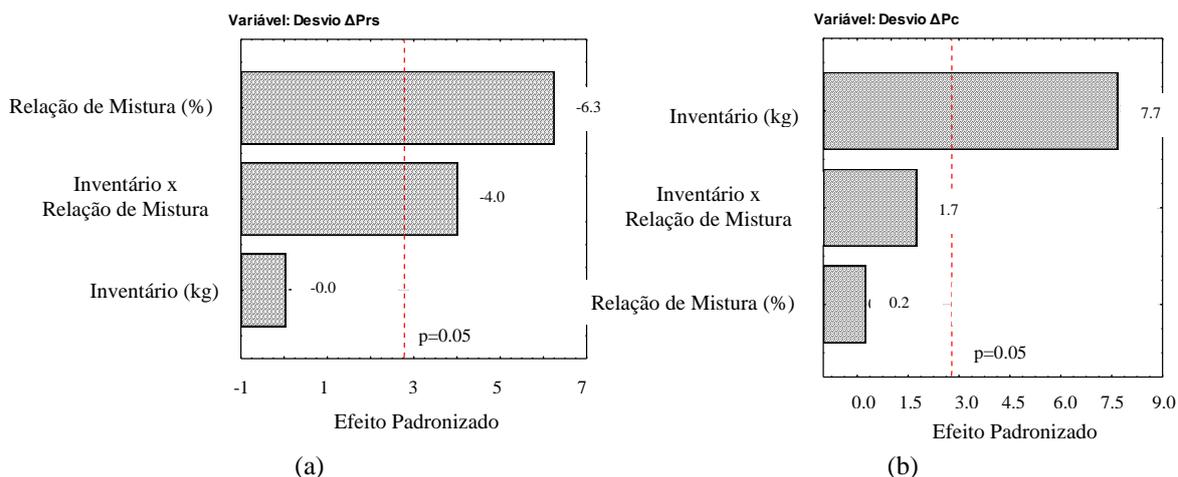


Figura 7– Efeito padronizado do desvio mostrado pela mudança de nível dos diferentes fatores no *riser* e ciclone.

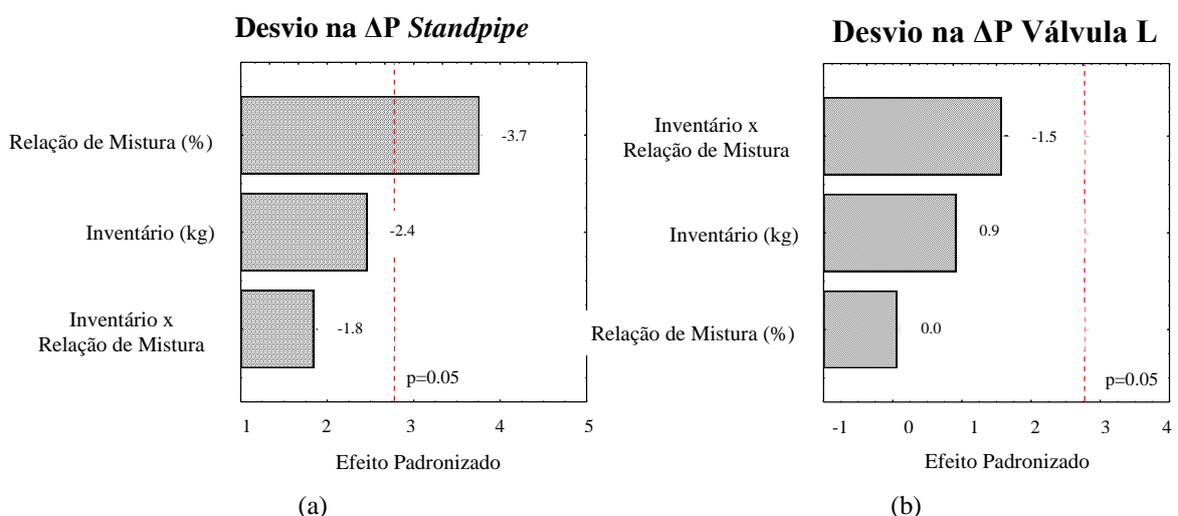


Figura8– Efeito padronizado do desvio mostrado pela mudança de nível dos diferentes fatores no *standpipe* e válvula L.

Os resultados indicam que para a seção do *riser*, a diferença entre simulado e experimental associado ao efeito do inventário de sólidos não é significativa ao nível de confiança de 95 %. Isto sugere que o modelo matemático é sensível às variações do inventário de sólidos. Por outro lado, para a seção de ciclone, os resultados mostram que apenas o inventário de sólidos causou alterações significativas no valor de desvio. Assim, o modelo matemático do ciclone é menos confiável a variações impostas sobre o inventário de sólidos, enquanto que o contrário acontece em termos do nível de relação de mistura.

No caso do *standpipe* a proporção de mistura foi o fator significativo, tendo menos influência sobre o desvio quando a relação de mistura mudou do nível baixo para o nível alto. Neste componente, as variações nos níveis de inventário de sólidos não causaram um desvio significativo.

Finalmente, para a região da válvula L nenhuma das variáveis controladas causou alterações significativas no valor do desvio entre experimental e simulado. Tais resultados sugerem que, para este componente, o modelo responde satisfatoriamente a alterações no inventário de sólidos e relação de mistura, mantendo os valores de desvios praticamente invariáveis para

qualquer condição de funcionamento testada. Deste modo, tendo em conta todos os componentes do LFC analisados em regime de fluidização rápida a frio, o sub-modelo referente à válvula L apresentou o melhor resultado, adaptando-se às várias condições operacionais impostas no circuito.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste estudo verificou-se, por meio de um modelo matemático semi-empírico, que o aumento do inventário de sólidos em sistemas de LFC tem forte influência sobre a queda de pressão nos diferentes componentes circuito. O aumento da quantidade mássica de sólidos no circuito provoca, além do aumento dos valores de quedas de pressão, o aumento da taxa de recirculação de sólidos e taxa de aeração, para que a estabilidade do circuito seja mantida.

O aumento da relação de mistura caracteriza um leito menos denso e com uma menor esfericidade, causando um aumento da queda de pressão no *riser* e *standpipe* pelo maior atrito existente entre as partículas e as paredes destes componentes, e uma menor queda de pressão na válvula L pela menor densidade do leito denso entre as pontos de pressão estática que delimitam a leitura de pressão.

No caso do aumento da velocidade de fluidização com inventário de sólidos em 3,5 e 5,5 kg e a manutenção da relação de mistura em 5%, nível considerado mais crítico, a queda de pressão no *riser* apresentou valores inferiores para maiores valores de velocidade de fluidização, principalmente devido ao retiro de uma maior quantidade de sólidos pelo topo do *riser* e à formação de um leito mais diluído. Como consequência, um maior acúmulo de sólidos é formado na região do *standpipe* e válvula L, ocorrendo o aumento dos valores de queda de pressão nestes componentes, devido a maior coluna de sólidos formada e atrito entre partículas e parede, respectivamente. Os valores de taxa de recirculação de sólidos e taxa de aeração apresentaram um aumento em resposta ao aumento da velocidade de fluidização, a fim de se manter a estabilidade do circuito.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária e à UTFPR/Campus Ponta Grossa pelo apoio a esta pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

ASIF, M. *Predicting minimum fluidization velocities of multi-component solid mixtures*. Particuology, Vol. 11, p. 309-316, 2013.

BASU, P. *Combustion and gasification in fluidized beds*. Taylor & Francis, Boca Raton, 1. edição, 2006.

CORTEZ, L., LORA, E., GOMEZ, E. *Caracterização da Biomassa*. In: Biomassa para Energia. Unicamp, Campinas, 1<sup>st</sup> edition, p. 32-62, 2008.

FORMISANI, B., GIRIMONTE, R. *Experimental analysis of the fluidization process of binary mixtures of solids*. KONA-Powder and Particle, Vol. 21, p. 66-75, 2003.

**GUNGOR, A.** *Simulation of co-firing coal and biomass in circulating fluidized beds.* Energy Conversion and Management, Vol. 65, p. 574-579, 2013.

**JENA, H., ROY, G., BISWAL, K.** *Studies on pressure drop and minimum fluidization velocity of gas–solid fluidization of homogeneous well-mixed ternary mixtures in un-promoted and promoted square bed.* Chemical Engineering Journal, Vol. 145, p. 16-24, 2008.

**KIM, S. W., KIM, S. D., LEE, D.** *Pressure balance model for circulating fluidized beds with a loop-seal.* Industrial & Chemical Engineering Research, Vol. 41, p. 4949-4956, 2002.

**NASCIMENTO, S. M.; DUTRA, R. I. J. P.; NUMAZAWA, S.** *Resíduos de indústria madeireira: caracterização, consequências sobre o meio ambiente e opções de uso.* HOLOS Environment, v.6, p. 8-21, 2006.

**PAUDEL, B., FENG, C.** *Prediction of minimum fluidization velocity for binary mixtures of biomass and inert particles.* Powder Technology, Vol. 237, p. 134-140, 2013.

**RAO, T., BHEEMARASETTI, F.** *Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands.* Energy, Vol. 26, p. 633-644, 2001.

**RODRIGUES, A., BELTRANE, V.** *Projeto de uma Caldeira de Leito Fluidizado Circulante em Escala de Laboratório.* Undergraduated Monography. Federal University of Technology – Paraná. Ponta Grossa, Brazil, 2011.

**SAHOO, A., ROY, G.** *Segregation characteristics of irregular binaries in gas solid fluidized beds – An ANN approach.* Journal of China Particuology, Vol. 6, p. 199-206, 2008.

**SUN, P., HUI, S., GAO, Z., ZHOU, Q., TAN, H., ZHAO, Q., XU, T.** *Experimental investigation on the combustion and heat transfer characteristics of wide size biomass co-firing in 0.2 MW circulating fluidized bed.* Applied Thermal Engineering, Vol. 52, p. 284-292, 2013.

**ZEN, L., SOARES, M., GOMES, G.** *Combustão Multicombustível em Leito Fluidizado para Aplicação em PCTS.* In Proceedings of the 8º Iberoamerican Congress of Mechanical Engineering. Cuzco, Peru, 2007.