



ALIMENTAÇÃO DE BIOMASSAS EM UM SISTEMA DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO

THAIS L. C. GOMES^{1*}, GIOVANI A. LOURENÇO², RODOLFO J. BRANDÃO¹, CARLOS H. ATAÍDE¹, CLAUDIO R. DUARTE¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Faculdade de Engenharia Química

²Instituto Federal de Goiás, Departamento de Áreas Acadêmicas

*e-mail: logettothais@gmail.com

RESUMO - A biomassa é uma fonte de energia renovável de crescente interesse industrial. No entanto, devido às características de suas partículas, problemas operacionais são frequentemente verificados durante o seu transporte, que geralmente estão associados ao controle do processo de alimentação. Neste contexto, um sistema de alimentação foi projetado, específico para o controle da vazão de biomassas, em uma linha de transporte pneumático de pressão positiva, que possibilitou avaliar a eficiência de alimentação de uma válvula rotativa, empregando materiais com diferentes propriedades físicas e variando condições operacionais, tais como a velocidade do ar, velocidade de rotação da válvula e diferentes alturas de material no silo de alimentação. As biomassas utilizadas foram: milho moído (MMO), sabugo de milho (SMI), palha de milho (PMI), casca de arroz (CAR) e farelo de trigo (FTR). Estas foram caracterizadas quanto à sua densidade, tamanho, forma, ângulo de repouso e teor de umidade. No estudo foi observado que a altura de material no silo influenciou a eficiência de alimentação da válvula. Os materiais de baixa densidade *bulk* obtiveram maiores eficiências de alimentação para as condições de menor altura, devido à maior facilidade de quebra dos arcos mecânicos/coesivos formados acima da abertura de saída do silo.

INTRODUÇÃO

O preocupante cenário mundial associado ao esgotamento das fontes de combustíveis fósseis e o agravamento do aquecimento global, tem impulsionado estudos para utilização de biomassas como fonte de energia renovável, dada sua abundância na natureza e menor emissão de gases de efeito estufa (Cui e Grace, 2006; Dai e Grace, 2008; Mckendry, 2002).

O transporte pneumático de biomassas tem sido amplamente utilizado nas indústrias químicas e de energia, possibilitando que o material particulado seja transferido pneumaticamente, por exemplo, para um silo de armazenamento, reator ou caldeira (Dai *et al.*, 2012; Chunhui *et al.*, 2012; Hassan e Björn, 2000). As características de transporte e estabilidade de fluxo são essenciais para a qualidade do produto final e também para o projeto e operação de plantas industriais (Cai *et al.*, 2013).

Um dos fatores limitantes e desafiadores para o transporte pneumático de biomassas é o controle do processo de alimentação do material na linha. Produtos desta natureza apresentam heterogeneidade substancial em suas propriedades físicas, que incluem uma ampla distribuição de tamanho de partículas, formas irregulares e variação de rugosidade superficial (Cui e Grace, 2006; Dai e Grace, 2011; Dai *et al.*, 2012), quando avaliada uma mesma amostra de material. Além disso, muitas biomassas tendem a ser compressíveis e flexíveis.

Problemas durante o processo de alimentação de biomassas em linhas de transporte pneumático são frequentemente encontrados, devido às suas diferentes propriedades físicas, tornando inviável a operação contínua de todo o sistema e, conseqüentemente, comprometendo o seu potencial uso como fonte renovável de energia (Cui e Grace, 2006).

Existem diferentes tipos de alimentadores de materiais particulados, alguns deles já consolidados na indústria de biomassa, como o alimentador parafuso helicoidal, válvula rotativa, alimentador de pistão, alimentador pneumático, alimentador de correia (Dai e Grace, 2008; Dai e Grace, 2011; Dai *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2020), e outros estão sendo desenvolvidos e estudados na literatura, como o alimentador de leito de jorro (Sousa e Ferreira, 2020; Sousa *et al.*, 2020).

A válvula rotativa é um dos dispositivos mais empregados na alimentação de materiais em sistemas de transporte pneumático, tendo em vista o seu baixo custo, facilidade de construção e simplicidade de operação (Mills, 2016; Gundogdu, 2004). Apesar disso, problemas operacionais podem ser encontrados durante a sua utilização, devido à possíveis vazamentos de ar na válvula e ao gradiente de pressão adverso formado entre a tubulação e o silo de alimentação, o que dificulta o fornecimento de material para a linha.

A válvula rotativa é um dispositivo de deslocamento positivo. Portanto, a quantidade de material alimentada é proporcional à sua velocidade de rotação, até que seja atingida uma velocidade crítica, acima da qual ocorre uma diminuição da alimentação de sólidos devido à insuficiência no tempo de preenchimento e descarregamento completo dos seus compartimentos. A eficiência da válvula rotativa não é a mesma para todos os materiais e a taxa máxima de alimentação depende das características do material a ser manuseado (Klinzing *et al.*, 2010).

A maioria dos estudos reportados na literatura associados ao manuseio de materiais particulados utilizam pós ou partículas que apresentam formatos regulares, com uma estreita faixa de distribuição de tamanho. Assim, existe uma carência de informações a respeito da alimentação e transporte de materiais que apresentam formatos irregulares e significativas diferenças em suas propriedades físicas, como é o caso das biomassas. A natureza dessas partículas impõe dificuldades consideráveis na previsibilidade dos processos de alimentação e transporte (Cui

e Grace, 2006; Dai e Grace, 2008; Dai e Grace, 2011; Dai *et al.*, 2012), principalmente em sistemas com pressão positiva, fazendo com que o dimensionamento dos transportadores pneumáticos passem por testes em unidades piloto, aumentando os custos de projeto.

De forma a contribuir para o enriquecimento da pesquisa associada ao manuseio de biomassas, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de uma válvula rotativa em um sistema de transporte pneumático, através da utilização de biomassas com diferentes propriedades físicas. Os efeitos da altura do material no silo e da velocidade de rotação na eficiência de alimentação foram investigados, fornecendo resultados e contribuições relevantes para a área de pesquisa.

MATERIAL E MÉTODOS

Aparato Experimental

Os experimentos foram conduzidos em uma unidade de transporte pneumático composta por um compressor radial duplo IBRAM de 10 CV, com vazão máxima de 7,6 m³.min⁻¹, pressão de 6800 mmca e vácuo de 5800 mmca. A unidade foi confeccionada com tubos de acrílico cristal, com diâmetro interno (D) de 74 mm, apresentando três trechos horizontais com comprimentos de 2,5 m, 3,90 m e 9 m, dois trechos verticais de 1,5 m e quatro curvas em PVC com raio de curvatura (R) de 300 mm (R/D = 4), conforme a Figura 1.

De uma forma simplificada, para a realização de cada teste experimental, inicialmente as biomassas tinham suas massas aferidas com o auxílio de uma balança digital (URANO, 30 kg de capacidade e 5 g de precisão). Posteriormente, os materiais eram alimentados no silo de alimentação, transportados ao longo da linha, separados da fase gasosa através de um ciclone de alta eficiência *Stairmand* com diâmetro do corpo cilíndrico de 207 mm e, por fim, direcionados para um silo de recebimento de sólidos.

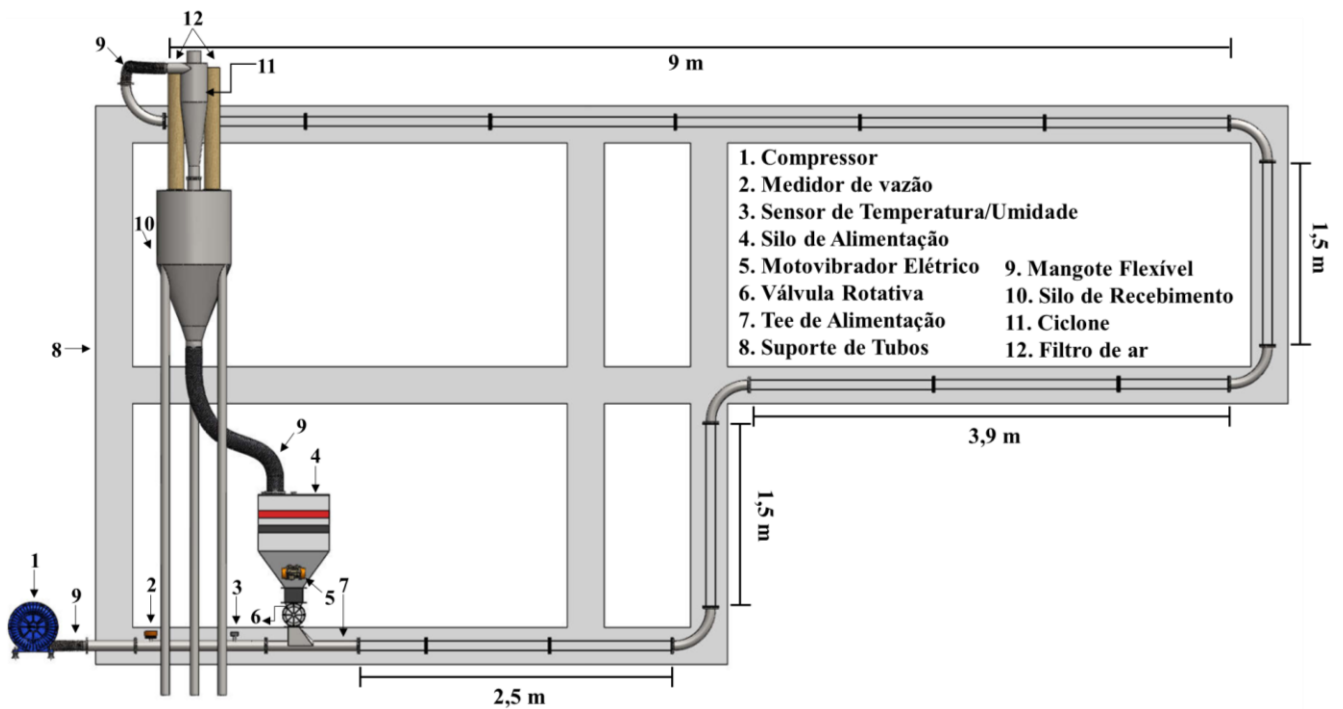


Figura 1: Aparato experimental do sistema de transporte pneumático.

Sistema de Alimentação de Sólidos

Conforme apresentado na Figura 2, o sistema de alimentação de sólidos é formado por um silo de 171 L e uma válvula rotativa com rotor de bolso profundo, composta por 8 pás do tipo extremidade aberta, que comporta um volume útil de sólido de 1,1 L. Para acoplar a válvula rotativa à linha de transporte pneumático, foi instalado um Tee de alimentação, projetado de acordo com Klinzing *et al.* (2010). Para auxiliar na homogeneidade

da alimentação, dois motovibradores MVL de 75 FC (Força Centrífuga) foram instalados em lados opostos da região piramidal do silo. Todos os experimentos foram realizados com o silo fechado e com os motovibradores a 3600 RPM.

Na tampa superior do silo e na carcaça da válvula rotativa havia janelas de visualização, feitas em acrílico, que permitiam o operador observar o processo de alimentação.

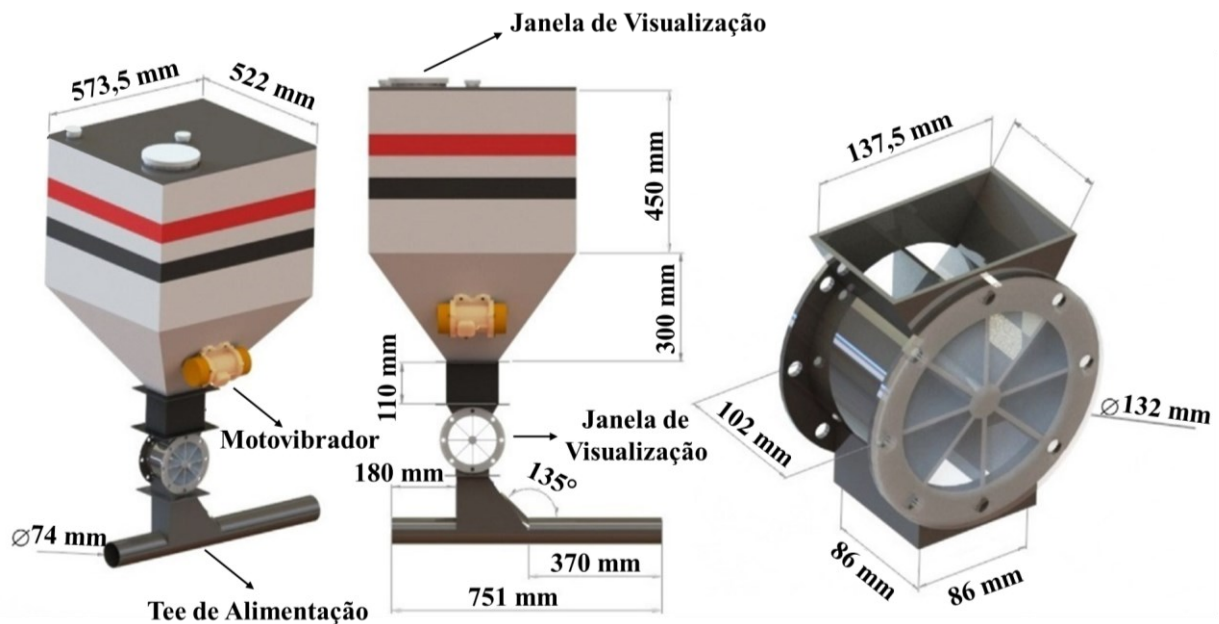


Figura 2: Sistema de alimentação com detalhes do projeto.

Aquisição de Dados e Controle do Sistema

O sistema de aquisição de dados e controle da unidade experimental foi realizado com o auxílio do dispositivo NI USB-6211 e do inversor de frequência vetorial WEG - CFW500D28P0T2DB20. A vazão volumétrica do ar foi aferida através de um medidor de vazão volumétrica tipo turbina em linha da Tecnofluid, modelo TVT 75, que enviava os dados para a placa de aquisição e, através do *software* supervisor LabVIEW, a vazão volumétrica era convertida em velocidade média, baseado na área da secção transversal da tubulação. O inversor de frequência era o elemento final responsável por controlar a rotação do motor do compressor e, conseqüentemente, a velocidade do ar na linha.

Caracterização das Biomassas

As biomassas utilizadas no presente trabalho para a realização dos testes experimentais foram: o milho moído (MMO), sabugo de milho (SMI), palha de milho (PMI), casca de arroz (CAR) e o farelo de trigo (FTR), conforme apresentado na Figura 3. A palha e o sabugo de milho foram fornecidos pela empresa JC Rações e Insumos Siderúrgicos LTD da cidade de Uberlândia, já processados. O milho e a casca de arroz foram submetidos ao processo de moagem, de forma a evitar o travamento da válvula rotativa. Já o farelo de trigo, foi utilizado conforme fornecido comercialmente, sem processamentos adicionais.



Figura 3: Biomassas empregadas no estudo.

Estes materiais foram inicialmente submetidos a um processo de caracterização para a determinação das seguintes propriedades físicas: distribuição de tamanho de partículas, densidade bulk aerada e compactada, índice de Hausner, densidade aparente, densidade real, ângulo de repouso estático, teor de umidade em base seca e esfericidade. É importante ressaltar que todos os processos de caracterização foram realizados em triplicata.

Distribuição de tamanho de partículas: O diâmetro médio das partículas de cada material foi representado pelo diâmetro médio de Sauter (d_s), que foi obtido através da técnica de peneiramento. Para isso, foi utilizado o sistema vibratório AS 300 control da Retsch, com peneiras padrão Tyler de 12" em aço inoxidável

de alta liga (ASTM E11), por um tempo de 20 minutos.

Densidades bulk, aparente e real: A densidade bulk aerada (ρ_{ba}) foi medida utilizando uma proveta de vidro de 250 mL. Com o auxílio de um funil, a biomassa foi acomodada no recipiente sob a ação da gravidade, sem que houvesse qualquer tipo de perturbação. Com isso, a densidade bulk aerada pôde ser calculada pela razão entre a massa e o volume ocupado pelas partículas. Para a determinação da densidade bulk compactada (ρ_{bc}), a proveta foi deixada cair sob a ação de sua própria massa, para que houvesse a compactação das partículas. Este procedimento foi repetido várias vezes até que o volume de material não fosse mais alterado com número de batidas.

Para avaliar a fluidez e compressibilidade dos materiais, foi calculado o índice de Hausner (HR) através da razão entre a densidade bulk compactada e a densidade bulk aerada.

A densidade aparente ou densidade do sólido (ρ_s) foi obtida pela técnica de picnometria líquida utilizando éter de petróleo puro, enquanto a densidade real (ρ_{real}) foi medida em um picnômetro a gás (He) do modelo Micromeritics Accupyc 1330 (Cardoso *et al.*, 2013).

Umidade em base seca: Para a determinação da umidade, o material foi colocado em estufa a 105°C até atingir massa constante (ISO 18134). A razão entre a massa de água evaporada da amostra e a massa final do sólido seco resultou no teor de umidade em base seca, U_{bs} .

Ângulo de repouso: Para a determinação do ângulo de repouso (α), o material particulado foi despejado sobre uma superfície plana com auxílio de um funil. Para facilitar o escoamento dos materiais e minimizar o efeito de parede, foi utilizado um funil com diâmetro interno de saída de 2 cm, o qual foi disposto a uma distância de 15 cm em relação à base da superfície plana. Após o despejamento dos materiais, o diâmetro e a altura do monte formado foram medidos e o ângulo de repouso foi calculado a partir da Equação 1:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{H}{R} \right) \quad (1)$$

sendo: H a altura e R o raio do monte formado após o escoamento dos materiais (Lam *et al.*, 2008).

Fator de forma: Para caracterizar a forma das partículas, foi utilizado o conceito de esfericidade (ψ), a qual foi medida por análise dinâmica de imagem no equipamento Camsizer L, da marca Retsch, segundo procedimento descrito pela norma ISO 13322-2/2006. A esfericidade é calculada de acordo com a Equação 2.

$$\psi = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (2)$$

Sendo: P o perímetro ou circunferência medida a partir da projeção da partícula e A a área de cobertura dessa projeção.

Avaliação da Eficiência de Alimentação

Para a realização dos experimentos, o silo de alimentação foi inicialmente preenchido com uma massa pré-estabelecida e, em seguida, fechado para garantir a equalização da pressão entre o silo e a linha de transporte, evitando os efeitos de refluxo. Então, circulou-se o ar comprimido na linha até atingir uma velocidade média constante, possibilitando o ajuste da válvula rotativa à rotação desejada. No momento em que o primeiro compartimento da válvula despejava sólidos na linha, acionava-se o cronômetro para o monitoramento do tempo de alimentação e parava-se ao alimentar as últimas partículas no sistema. Ao final de cada batelada, o material do silo de recebimento foi descarregado no silo de alimentação, com o auxílio de um mangote, possibilitando a realização de um novo experimento. É importante ressaltar que não houve perdas significativas de materiais para o ambiente no overflow do ciclone.

A taxa mássica de sólidos foi determinada pela razão entre a massa previamente conhecida de material no silo e o tempo gasto para a válvula rotativa alimentar todo o material na linha, conforme a Equação 3.

$$\dot{m}_s = \frac{m}{t} \quad (3)$$

A eficiência de alimentação (Y) da válvula rotativa foi determinada pela razão entre a taxa mássica de sólidos experimental, \dot{m}_s , e a taxa mássica de sólidos teórica, $\left(\dot{m}_s \right)_{teórica}$,

conforme a Equação 4. A taxa mássica de sólidos teórica depende do volume útil e da velocidade de rotação da válvula, sendo determinada pela Equação 5.

$$Y = \frac{\dot{m}_s}{\left(\dot{m}_s \right)_{teórica}} \quad (4)$$

$$\left(\dot{m}_s \right)_{teórica} = \omega \rho_{bc} V_{útil} \quad (5)$$

Para avaliar a eficiência de alimentação da válvula rotativa, as biomassas foram

dispostas no silo de alimentação em diferentes alturas, 0,1, 0,2 e 0,3 m, para uma velocidade do ar transportador de 16 m/s e rotações da válvula rotativa variando entre 5 a 65 rpm. Alturas mais baixas foram utilizadas para investigar níveis críticos de alimentação de materiais de baixa densidade, conforme relatado em alguns estudos na literatura (Gundogdu, 1995, Ayik, 1990, Gundogdu, 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização das Biomassas

A partir dos resultados obtidos do processo de peneiramento, modelos de distribuição granulométrica a 2 parâmetros foram ajustados para cada material avaliado. De acordo com o coeficiente de correlação (R^2), o modelo de distribuição Rosin-Rammler-Bennet (RRB) foi aquele que melhor representou a distribuição de tamanho das partículas para os cinco materiais. Na Tabela 1 são apresentados os valores dos parâmetros ajustados para cada

biomassa e seus respectivos coeficientes de correlação.

Tabela 1: Parâmetros do modelo RRB de distribuição granulométrica.

Material	R^2	Parâmetros
MMO	0,9932	$d_{63,2} = 1,39$ mm $n = 1,72$
SMI	0,9980	$d_{63,2} = 1,21$ mm $n = 1,81$
PMI	0,9998	$d_{63,2} = 1,56$ mm $n = 1,36$
CAR	0,9921	$d_{63,2} = 0,85$ mm $n = 3,73$
FTR	0,9878	$d_{63,2} = 0,59$ mm $n = 1,60$

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios de todas as propriedades avaliadas para cada material, com os seus respectivos desvios padrão.

Tabela 2: Propriedades das biomassas.

Material	Grupo Geldart	d_s (μm)	ρ_{ba} (kg/m^3)	ρ_{bc} (kg/m^3)	ρ_s (kg/m^3)	ρ_{real} (kg/m^3)	U_{bs} (%)	α ($^\circ$)	HR (-)	Ψ (-)
MMO	B	$696,44 \pm 26,45$	$645,28 \pm 9,14$	$857,83 \pm 7,01$	$1092,51 \pm 8,18$	$1456,6 \pm 3,0$	$11,28 \pm 0,14$	$35,60 \pm 2,59$	$1,33 \pm 0,03$	$0,78 \pm 0,04$
		$650,21 \pm 24,69$	$252,16 \pm 3,41$	$307,19 \pm 5,04$	$865,20 \pm 15,48$	$1368,6 \pm 10,5$	$9,56 \pm 0,08$	$34,41 \pm 1,55$	$1,22 \pm 0,01$	$0,65 \pm 0,03$
PMI	B	$653,39 \pm 33,71$	$143,93 \pm 4,75$	$187,42 \pm 5,39$	$737,94 \pm 18,54$	$1249,2 \pm 16,4$	$10,02 \pm 0,26$	$35,03 \pm 1,83$	$1,30 \pm 0,01$	$0,33 \pm 0,02$
		$559,13 \pm 46,23$	$257,33 \pm 3,00$	$356,00 \pm 2,76$	$918,15 \pm 8,23$	$1499,8 \pm 5,3$	$8,54 \pm 0,23$	$31,74 \pm 1,32$	$1,38 \pm 0,02$	$0,34 \pm 0,05$
FTR	B	$338,92 \pm 18,35$	$318,19 \pm 3,53$	$455,04 \pm 3,49$	$1069,36 \pm 3,22$	$1392,4 \pm 5,3$	$12,68 \pm 0,21$	$41,03 \pm 1,24$	$1,43 \pm 0,02$	$0,62 \pm 0,03$

Avaliação da Eficiência de Alimentação

Os gráficos apresentados na Figura 4 mostram a variação da taxa mássica de sólidos com o aumento da velocidade de rotação da válvula rotativa.

Para todos os materiais avaliados, as curvas apresentaram o mesmo comportamento. O aumento da rotação proporcionou a elevação da taxa mássica de sólidos, até que fosse atingido um valor praticamente constante.

Segundo Al-din e Gunn (1983), para baixas rotações da válvula, a taxa mássica de sólidos é diretamente proporcional à velocidade de rotação. Entretanto, essa dependência é reduzida à medida que a rotação se torna mais elevada, de forma que a taxa mássica de sólidos se torna constante, independente da velocidade de rotação aplicada, passando a ser limitada pelas características de descarregamento do silo de alimentação.

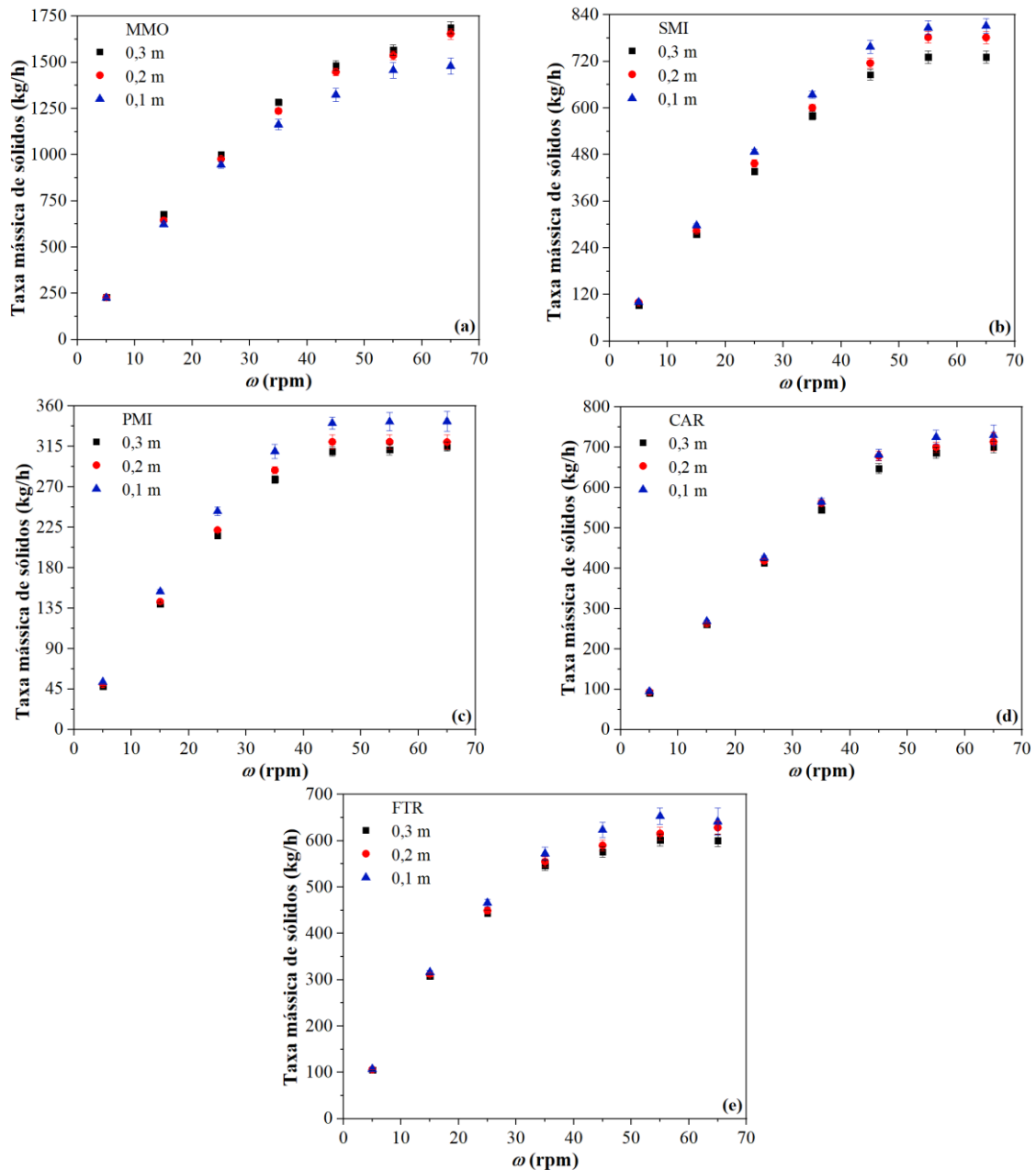


Figura 4: Variação da taxa mássica de sólidos com a velocidade de rotação para diferentes alturas de material no silo, considerando a alimentação do MMO (a), SMI (b), PMI (c), CAR (d) e FTR (e).

Os gráficos apresentados na Figura 5 mostram a variação da eficiência de alimentação da válvula com o aumento da velocidade de rotação, para diferentes alturas de cada biomassa no silo de alimentação. Nota-se que as curvas apresentaram tendência decrescente.

Como reportado nos trabalhos de Klinzing *et al.* (2010) e Mills (2016), rotações menores contribuem para o aumento da

eficiência de alimentação em sistemas de transporte pneumático, uma vez que esta condição favorece uma maior acomodação das partículas nos bolsos da válvula rotativa. Além disso, os autores ressaltam que a eficiência de alimentação de uma válvula não é a mesma para todos os materiais e, na prática, a velocidade crítica do rotor, na qual ocorre a máxima taxa de alimentação, depende unicamente das características do material a ser manuseado.

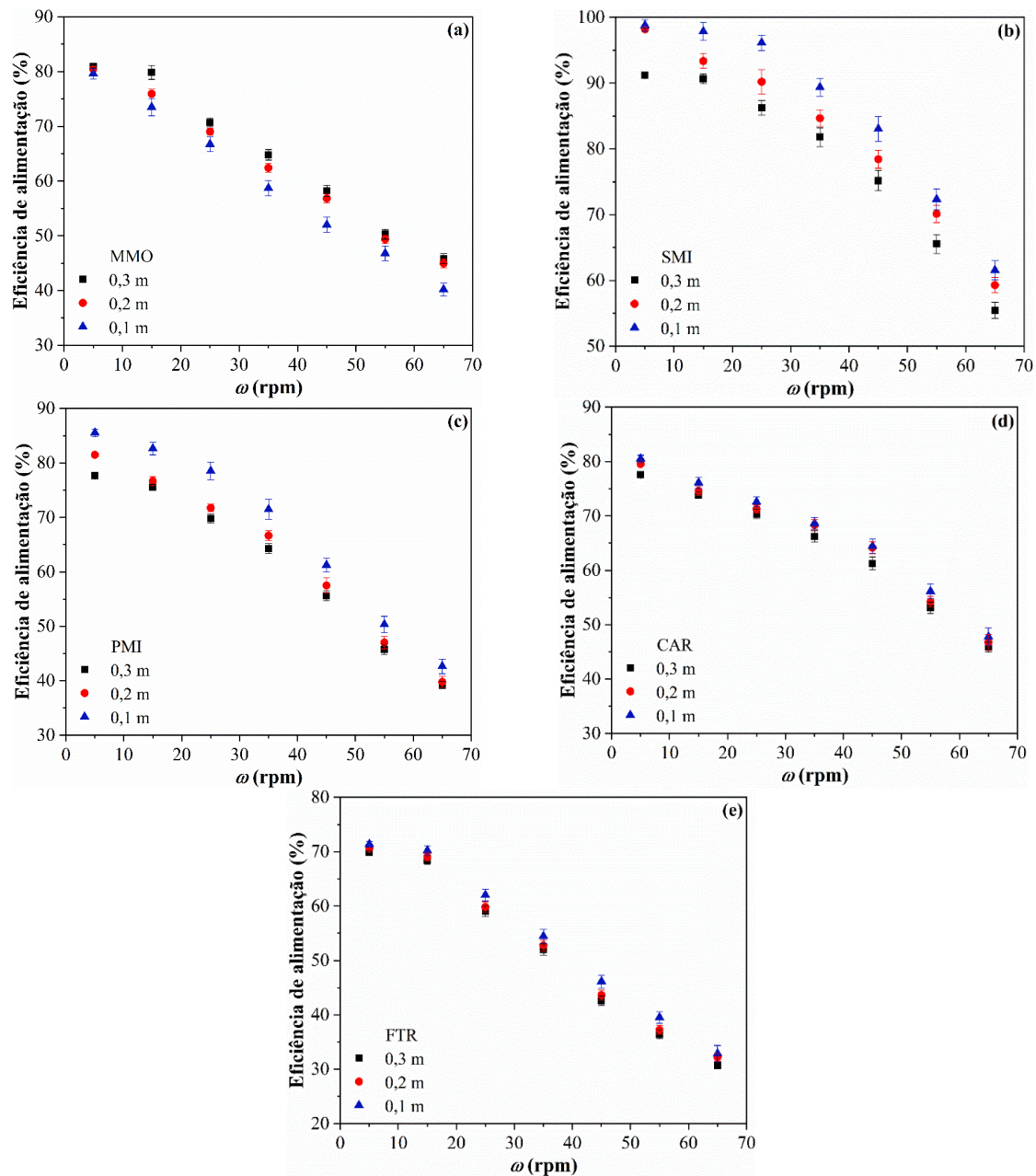


Figura 5: Variação da eficiência de alimentação de sólidos com a velocidade de rotação para diferentes alturas de material no silo, considerando a alimentação do MMO (a), SMI (b), PMI (c), CAR (d) e FTR (e).

Devido à sua forma irregular, ampla faixa de tamanho e coesividade, muitas biomassas apresentam dificuldade de escoamento durante o seu descarregamento do silo. Obstruções no fluxo de partículas podem ser ocasionadas pela formação de arcos mecânicos ou coesivos acima da abertura de descarga de material, resultando em um fluxo irregular de sólidos ou até mesmo em seu total bloqueio. Como relatado no trabalho de Marinelli e Carson (1992), os arcos mecânicos são formados pelo entrelaçamento/entrosamento de partículas maiores, enquanto os arcos coesivos são formados pela ligação de partículas mais finas.

Segundo Drescher *et al.* (1995a, 1995b) a formação de arcos está associada à coesividade das partículas, às geometrias do silo e da tremonha e à dimensão da abertura de descarga de material. Teunou *et al.* (1999) também mencionaram as propriedades físicas e de fluxo dos produtos sólidos e as condições ambientais (pressão, temperatura e umidade) como fatores que influenciam o arqueamento. Cabe destacar que nos trabalhos citados não havia uma corrente de ar que causava uma contrapressão no silo, o que torna ainda mais relevante o estudo do comportamento da taxa de

alimentação para sistemas de transporte pneumático.

Neste trabalho, que se destaca pelo estudo da alimentação de um sistema de transporte pneumático positivo, foi verificado a formação de arcos na descarga do silo. Conforme apresentado nas Figuras 4 e 5, para todas as biomassas estudadas, exceto o milho moído, quanto menor a altura de material no silo, maior a taxa mássica de sólidos e, conseqüentemente, maior a eficiência de alimentação, apesar desse efeito ter sido menos expressivo para a casca de arroz e o farelo de trigo.

Apesar da utilização de motovibradores, os quais foram operados em sua máxima frequência de vibração (3600 rpm) para todos os testes realizados, para as condições de maior altura de material foi necessário um tempo maior para o rompimento dos arcos de partículas formados acima da abertura de descarregamento do silo, resultando em menores valores de taxas mássicas de sólidos e eficiências de alimentação. Já para as condições de menor altura, os arcos foram rompidos com maior facilidade, melhorando o fluxo de sólidos

para os compartimentos da válvula rotativa, garantindo, assim, maiores eficiências de alimentação. É importante ressaltar que o efeito da altura foi mais relevante para o sabugo e a palha do milho, que foram os materiais que apresentaram menores densidades e, portanto, sofreram maior influência do processo de vibração no silo, deixando as partículas mais livres para o escoamento.

O milho moído, por apresentar maior densidade bulk, requereu maiores massas de material para preencher as alturas predeterminadas no silo de alimentação. Com isso, a pressão de sólidos atuou de forma mais efetiva para este material, promovendo maiores eficiências de alimentação para as condições de maiores alturas.

Os gráficos apresentados nas Figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, as curvas comparativas das biomassas em relação à variação da taxa mássica de sólidos e da eficiência de alimentação com o aumento da velocidade de rotação, para uma mesma altura de material no silo.

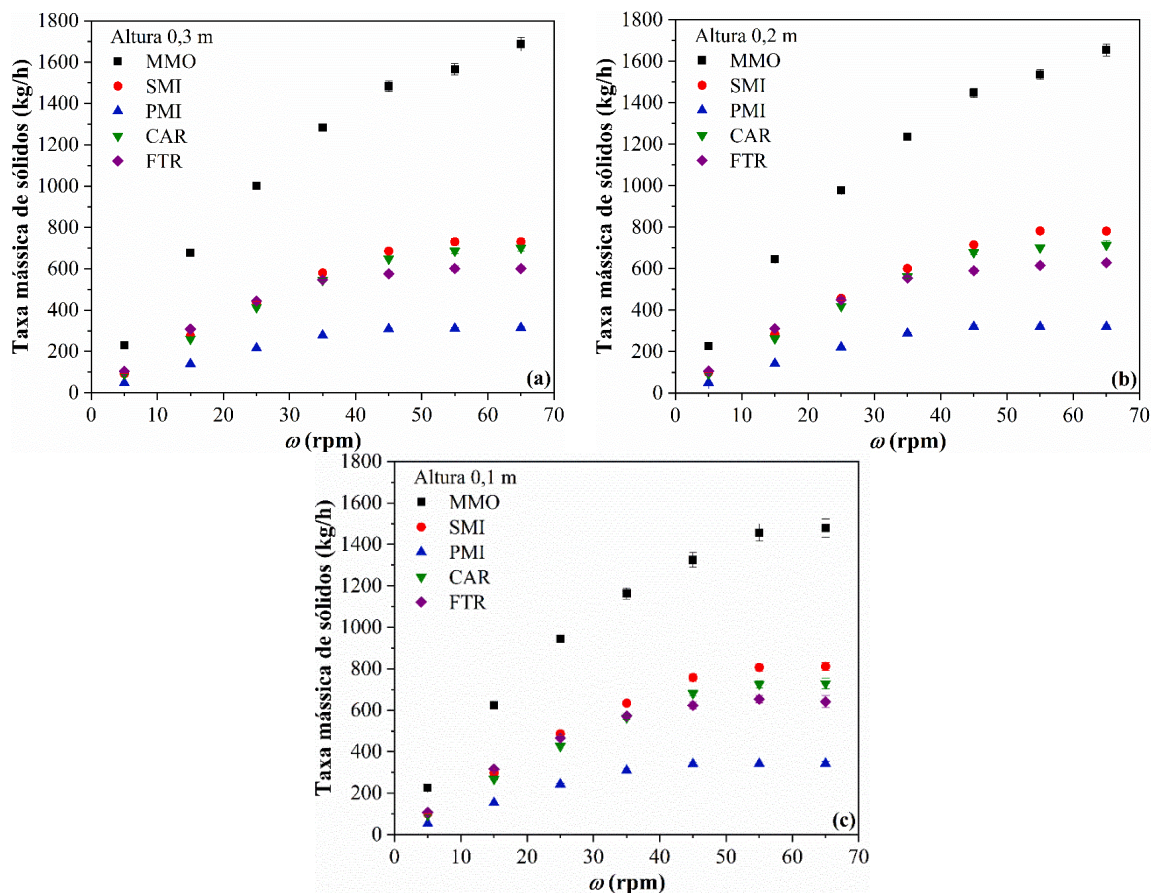


Figura 6: Variação da taxa mássica de sólidos com a rotação para diferentes biomassas, considerando a altura de material no silo de 0,3 m (a), 0,2 m (b) e 0,1 m (c).

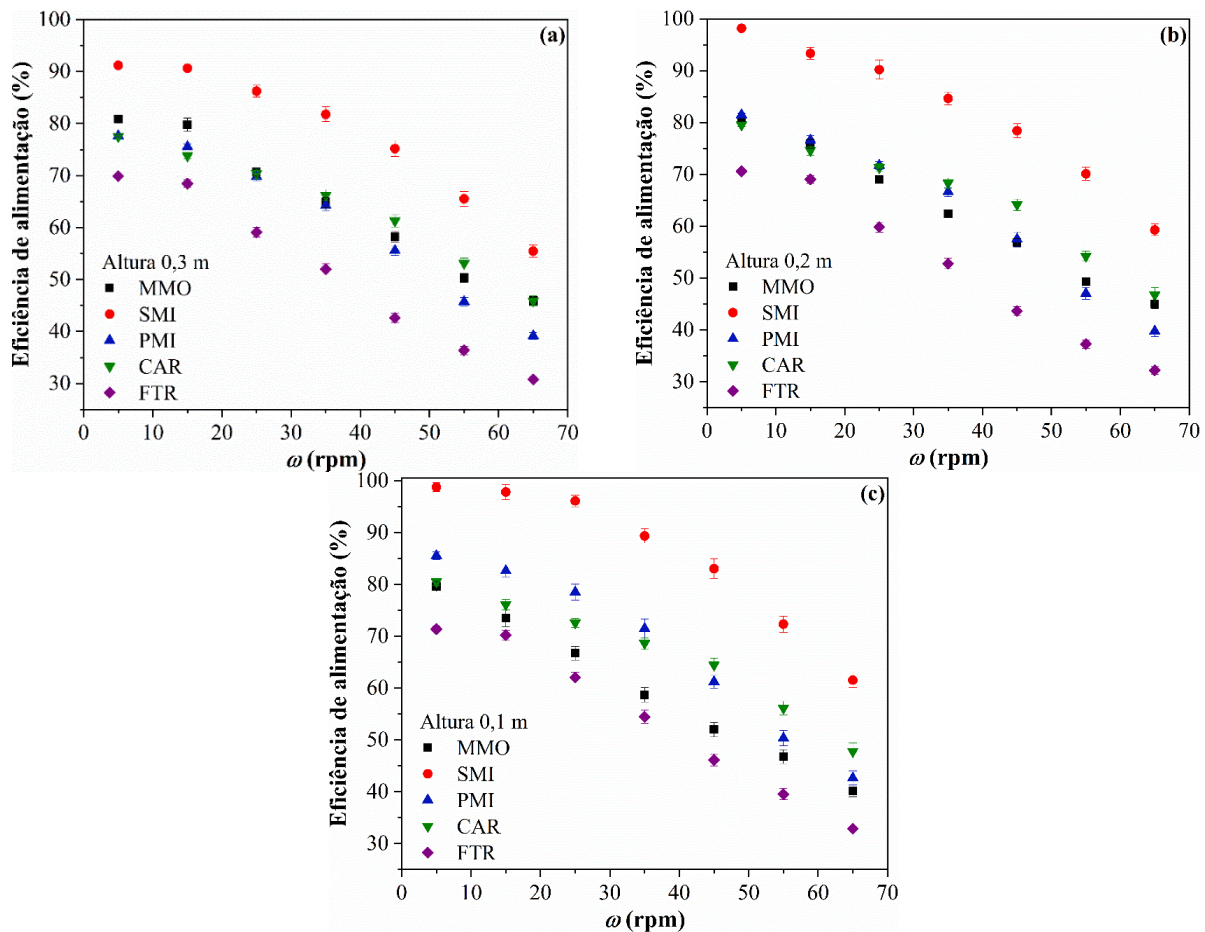


Figura 7: Variação da eficiência de alimentação com a rotação para diferentes biomassas, considerando a altura de material no silo de 0,3 m (a), 0,2 m (b) e 0,1 m (c).

Em concordância com a classificação de escoabilidade de partículas segundo o índice de Hausner (Abdullah e Geldart, 1999), o sabugo de milho foi o material que apresentou maior facilidade de escoamento, o que lhe proporcionou as maiores eficiências de alimentação, conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 7.

Durante os testes experimentais, o farelo de trigo se mostrou um material denso e o mais coesivo, sendo este fato confirmado pelo ângulo de repouso superior a 41° e índice de Hausner superior a 1,4. Deste modo, a sua baixa escoabilidade acabou comprometendo o preenchimento dos compartimentos da válvula rotativa, conferindo a este material menores eficiências de alimentação quando comparado aos demais.

CONCLUSÃO

Os resultados encontrados apontaram informações relevantes para o estudo da alimentação de biomassa em sistemas de transporte pneumático, a partir dos quais foi

possível concluir que além da velocidade de rotação, a altura de material no silo também influencia a eficiência de alimentação da válvula rotativa.

Além disso, foi possível avaliar o comportamento de cada material em relação ao processo de alimentação. Para biomassas com menor densidade *bulk*, foi verificado maiores eficiências de alimentação para as condições de menor altura de material no silo, em razão da maior facilidade de quebra dos arcos mecânicos/coesivos formados. Por outro lado, a pressão de sólidos atuou de forma mais efetiva para o milho moído devido à sua maior densidade *bulk*, promovendo maiores eficiências de alimentação para as condições de maiores alturas.

O sabugo de milho foi o material com maior facilidade de escoamento, apresentando as maiores eficiências de alimentação no estudo, enquanto o farelo de trigo se mostrou um material denso e o mais coesivo, apresentando as menores eficiências de alimentação quando comparado aos demais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro concedido pela FAPEMIG, CNPQ e CAPES e à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

NOMENCLATURA

A	Área de cobertura da projeção da partícula	$[\mu\text{m}^2]$
D	Diâmetro interno da tubulação	$[\text{mm}]$
d_s	Diâmetro médio de Sauter das partículas	$[\mu\text{m}]$
HR	Índice de Hausner	$[-]$
\dot{m}_s	Taxa mássica de sólidos experimental	$[\text{kg}/\text{h}]$
$\left(\dot{m}_s\right)_{teórica}$	Taxa mássica de sólidos teórica	$[\text{kg}/\text{h}]$
m	Massa de material no interior do silo de alimentação	$[\text{kg}]$
P	Perímetro medido a partir da projeção da partícula	$[\mu\text{m}]$
t	Tempo gasto pela válvula rotativa para alimentar todo o material na linha	$[\text{h}]$
U_{bs}	Teor de umidade em base seca	$[-]$
$V_{útil}$	Volume útil da válvula rotativa	$[\text{m}^3]$
Y	Eficiência de alimentação da válvula rotativa	$[-]$
α	Ângulo de repouso estático	$[-]$
ρ_{ba}	Densidade <i>bulk</i> aerada	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ρ_{bc}	Densidade <i>bulk</i> compactada	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ρ_{real}	Densidade real	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ρ_s	densidade da fase sólida	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ψ	Esfericidade de partícula	$[-]$

ω	Velocidade de rotação da válvula rotativa	$[\text{rpm}]$
----------	---	----------------

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, E. C.; GELDART, D. (1999), The use of bulk density measurements as flowability indicators, Powder Technology, Vol 102, p. 151-165.
- AL-DIN, N.; GUNN, D. J. (1983), Metering of solids by a rotary valve feeder, Powder Technology, Vol 36, p. 25-31.
- AYIK, M. (1990), Establishment of a Cyclone Test-Rig and Experimental Determination of Cyclone Performance, Ms. Thesis, Gazi University, Ankara/Turkey.
- CAI, L.; JIAYING, C.; GUILING, X.; PAN, X.; XIAOPING, C.; CHANGSUI, Z. (2013), Experimental investigation and stability analysis on dense-phase pneumatic conveying of coal and biomass at high pressure, Korean Journal of Chemical Engineering, Vol 30, p. 295-305.
- CARDOSO, C. R.; OLIVEIRA, T. J. P.; SANTANA JUNIOR, J. A.; ATAÍDE, C. H. (2013), Physical characterization of sweet sorghum bagasse, tobacco residue, soy hull and fiber sorghum bagasse particles: Density, particle size and shape distributions, Powder Technology, Vol 245, p. 105-114.
- CHUNHUI, H.; XIANMEI, C.; JIANHAO, W.; HONGLIANG, N.; YUPENG, X.; HAIJUN, Z.; YUANQUAN, X.; XIANGLIN, S. (2012), Conveying characteristics and resistance characteristics in dense phase pneumatic conveying of rice husk and blendings of rice husk and coal at high pressure, Powder Technology, Vol 227, p. 51-60.
- CUI, H.; GRACE, J. R. (2006), Pneumatic conveying of biomass particles: A review, China Particuology, Vol 4, p. 183-188.
- DAI, J.; CUI, H.; GRACE, J. R. (2012), Biomass feeding for thermochemical reactors, Energy and Combustion Science, Vol 38, p. 716-736.
- DAI, J.; GRACE, J. R. (2008), A model for biomass screw feeding, Powder Technology, Vol 186, p. 40-55.

- DAI, J.; GRACE, J. R. Biomass granular screw feeding: An experimental investigation, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 35, p. 942-955, 2011.
- DRESCHER, A.; WATERS, A. J.; RHOADES, C. A. (1995a), Arching in hoppers: I. Arching theories and bulk material flow properties, *Powder Technology*, Vol 84, p. 165-176.
- DRESCHER, A.; WATERS, A. J.; RHOADES, C. A. (1995b), Arching in hoppers: II. Arching theories and critical outlet size, *Powder Technology*, Vol 84, p. 177-183.
- GUNDOGDU, M. Y. (2004). Design improvements on rotary valve particle feeders used for obtaining suspended airflows, *Powder Technology*, Vol 139, p. 76-80.
- GUNDOGDU, M.Y. (1995), Swirling Flow Generators and Swirling Flow Separators, Ms. Thesis, University of Gaziantep, Gaziantep/Turkey.
- HASSAN, S.; BJÖRN, K. (2000), Pneumatic conveying of wood powder by using a steam-jet ejector, *Biomass Bioenergy*, Vol 19, p. 103-117.
- KLINZING, G. E.; RIZK, F.; MARCUS, R.; LEUNG, L. S. (2010), *Pneumatic conveying of solids: A theoretical and practical approach*, New York: Springer.
- LAM, P. S.; SOKHANSANJ, S.; BI, X.; LIM, C. J. (2008), Effect of particle size and shape on physical Properties of biomass grinds, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol 24, p. 351-358.
- LI, P.; WANG, N.; SI, H; CHANG, J. (2020), Feeding characteristics of a novel double-bin pneumatic feeder of biomass particles, *Powder Technology*, Vol 363, p. 735-744.
- MARINELLI, J.; CARSON, J. W. (1992), *Solve solids flow problems in bins, hoppers, and feeders*, American Institute of Chemical Engineers.
- MCKENDRY, P. (2002), Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass, *Bioresource Technology*, Vol 83, p. 37-46.
- MILLS, D. (2016), *Pneumatic Conveying Design Guide*, Elsevier Ltd.
- SOUSA, M. L.; FERREIRA, M. C. (2020), On the performance of a spouted bed type device for feeding spent coffee grounds to a circulating fluidized bed reactor, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol 160, p. 31-38.
- SOUSA, M. L.; FERREIRA, M. C.; HOU, Q. F.; YU, A. B. (2020). Feeding spent coffee grounds into reactors: TFM simulation of a non-mechanical spouted bed type feeder, *Waste Management*, Vol 109, p. 161-170.
- TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J. J.; SYNNOTT, E. C. (1999), Characterization of food powder flowability, *Journal of Food Engineering*, Vol 39, p. 31-37.