



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA DE
ALIMENTAÇÃO DE BIOMASSA EM UM SISTEMA DE
TRANSPORTE PNEUMÁTICO

MARCELO AUD LOURENÇO

Uberlândia-MG

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA DE
ALIMENTAÇÃO DE BIOMASSA EM UM SISTEMA DE
TRANSPORTE PNEUMÁTICO

MARCELO AUD LOURENÇO

Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como parte
dos requisitos necessários para a aprovação na
disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso
do Curso de Engenharia Química.

Orientador: Carlos Henrique Ataíde

Uberlândia-MG

2019

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA
DISCIPLINA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE MARCELO
AUD LOURENÇO APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA, EM 08 DE FEVEREIRO DE 2019.

Carlos Henrique Ataíde

Orientador

Claudio Roberto Duarte

Convidado 1

Thais Logetto Caetité Gomes

Convidado 2

Uberlândia-MG

2019

Dedico este trabalho à Deus e toda minha Família.

Resumo

A utilização de biomassa em processos industriais vem aumentando nos últimos tempos, principalmente, devido à necessidade de dar uma utilidade e valor comercial às partículas que antes eram descartadas. O manuseio dessas partículas é essencial, pois são finas e podem ser perdidas no ar, dessa forma o transporte pneumático se apresenta como alternativa, principalmente pelo fato deste transporte ser enclausurado. Este trabalho tem como objetivo avaliar e comparar a eficiência de alimentação em uma unidade de transporte pneumático operada em transporte em fase diluída utilizando-se o bagaço de cana e a serragem de madeira. Para obter os dados de eficiência a serem comparados, foi necessária a caracterização das partículas e a realização de 9 experimentos variando a velocidade de rotação da válvula e a velocidade do ar. Desta maneira, valores de eficiência foram obtidos para diferentes condições de funcionamento, constatando que a velocidade de rotação da válvula influencia de forma negativa a eficiência de alimentação, enquanto a velocidade do ar de maneira positiva. Além disso, quando comparadas as duas partículas, foi evidenciado que para densidades maiores, a eficiência de alimentação é mais alta. Assim, ao comparar as duas partículas, foi possível notar as semelhanças de comportamentos, quando alterada a velocidade de rotação e a velocidade do ar, e diferenças nos valores da eficiência de alimentação associadas às diferentes densidades das partículas.

Palavras chaves: Transporte pneumático, eficiência, alimentação, bagaço de cana, serragem.

Lista de Figuras

Figura 1 - Transporte em fase densa.....	5
Figura 2 - Transporte em fase diluída	6
Figura 3 - Diagrama de estado no transporte pneumático horizontal.....	6
Figura 4 - Diagrama de Geldart.....	8
Figura 5 - Diagrama de Dixon's Slugging	8
Figura 6 - Modelos de válvulas para alimentadores de sólidos.....	10
Figura 7 - Válvula Rotativa	11
Figura 8 - Comportamento da eficiência de alimentação com a variação da vazão.....	12
Figura 9 - Unidade de transporte pneumático	14
Figura 10 - Serragem de Madeira (SMA)	15
Figura 11 - Eficiência de alimentação em função da rotação da válvula para $v_{ar} = 10\text{m/s}$	19
Figura 12 - Eficiência de alimentação em função da rotação da válvula para $v_{ar} = 14\text{m/s}$	20
Figura 13 - Eficiência de alimentação em função da rotação da válvula para $v_{ar} = 18\text{m/s}$	21

Lista de tabelas

Tabela 1 - Experimento para velocidade de 10 m/s.....	17
Tabela 2 - Experimento para velocidade de 14 m/s.....	17
Tabela 3 - Experimento para velocidade de 18 m/s.....	17
Tabela 4 - Propriedades das partícula de bagaço de cana e serragem	18
Tabela 5 - Eficiência de alimentação para $v_{ar} = 10\text{m/s}$	19
Tabela 6 - Eficiência de alimentação para $v_{ar} = 14\text{m/s}$	20
Tabela 7 - Eficiência de alimentação para $v_{ar} = 18\text{m/s}$	22

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 Biomassa.....	2
2.1.1 Bagaço de Cana de Açúcar.....	3
2.1.2 Serragem de Madeira	3
2.2 Transportadores Pneumáticos	4
2.3 Classificação do Transporte Pneumático	4
2.3.1 Influência dos materiais no modo de fluxo	7
2.4 Alimentação	9
2.4.1 Válvula Rotativa.....	11
2.4.1.1 Eficiência na alimentação da válvula	12
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1 Unidade Experimental	14
3.2 Material Transportado.....	15
3.3 Procedimento Experimental.....	15
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5.2 Caracterização do material.....	18
5.1 Estudo comparativo da eficiência de alimentação das partículas de SMA e BCA.....	18
6. CONCLUSÃO.....	23
REFERÊNCIAS	24

1. INTRODUÇÃO

Processos envolvendo biomassa são de interesse crescente, entretanto, a manipulação e o transporte dessas partículas são desafiadores devido às suas propriedades físicas singulares. Em função da versatilidade, flexibilidade e a garantia de não emitir particulado para o meio ambiente, o transporte pneumático torna-se uma opção viável para o manuseio desses materiais, a partir do qual sólidos são deslocados no interior de uma tubulação através de uma corrente gasosa. Com equipamentos modernos, é possível transportar materiais particulados a grandes distâncias (de 500 a 1000 metros) com capacidade de até 100 toneladas por hora.

Dentre as partes que compõem um leito pneumático, a alimentação de sólidos é uma das mais importantes, devido à complexidade fluidodinâmica dessa região, além de afetar a estabilidade operacional, viabilidade técnica-econômica e a eficiência do sistema (LOPES, 2011).

O dispositivo de alimentação provavelmente mais utilizado em sistemas de transporte pneumático é a válvula rotativa, responsável por vedar e dosar o sólido na linha. Um dos problemas observados em sua utilização está relacionado ao vazamento de ar durante o seu funcionamento. Isso pode afetar o fluxo do produto e o desempenho do sistema, especialmente quando a pressão da linha de transporte é maior que a do silo sobre a válvula (LOURENÇO et al., 2018).

Diferentes propriedades dos materiais, como densidade, umidade e tamanho das partículas também afetam consideravelmente o desempenho dos sistemas de alimentação. De acordo com Gundogdu (2004), a equalização da pressão entre o silo e a linha de transporte aumenta a eficiência de alimentação da válvula para partículas de biomassa. Assim, a operação do sistema de alimentação com o silo fechado aparece como uma alternativa para a manutenção de uma taxa de alimentação homogênea na linha de transporte.

Neste trabalho, o objetivo foi comparar a eficiência de alimentação de duas biomassas, pós de bagaço de cana (BCA) e serragem de madeira (SMA), com o intuito de avaliar o efeito da densidade da partícula, velocidade de transporte e rotação da válvula na eficiência de alimentação em um sistema de transporte pneumático operado em fase diluída.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biomassa

O uso da biomassa vem ganhando espaço, principalmente, como uma alternativa aos combustíveis fósseis. Por muito tempo, os combustíveis não renováveis vêm dominando o mercado da produção de energia. Porém, com os impactos ambientais e a dependência energética dos países em relação a outros, a produção de energia por fontes renováveis tem sido estimulada.

Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), em aproximadamente 20 anos, cerca de 30% do total da energia consumida pela humanidade será proveniente de fontes renováveis, que hoje representam 14%. Apesar das boas perspectivas, a utilização da biomassa como fonte de energia ainda não se mostrou eficiente e competitiva economicamente como os combustíveis fósseis (CORTEZ, GÓMEZ e OLIVARES, 2008).

A energia proveniente da biomassa proporciona inúmeros benefícios ambientais, econômicos e sociais, tais como a diminuição da emissão de CO₂, geração de empregos, desenvolvimento tecnológico e entre outros. Existem diversas formas de transformar a biomassa em energia. A combustão direta de resíduos agrícolas e animais é uma tecnologia tradicional, porém quando ocorre um processamento prévio da biomassa, a tecnologia já é considerada moderna. (CORTEZ, GÓMEZ e OLIVARES, 2008).

Assim, o estudo da biomassa se torna peça fundamental para o crescimento de um país, especialmente para aquelas nações que desejam uma independência energética e um desenvolvimento tecnológico, social e econômico.

2.1.1 Bagaço de Cana de Açúcar

A cana de açúcar é uma das plantas mais cultivadas no território brasileiro devido à sua grande contribuição no cenário socioeconômico do país. Esta é constituída por 30% de caldo e o restante de bagaço (SANTOS, LIMA, *et al.*, 2011).

A utilização do caldo para transformação de produtos como etanol, açúcar e outros derivados, já está em grande desenvolvimento. Porém, as possíveis aplicações do bagaço da cana ainda foram pouco exploradas. Atualmente, a maior parte do bagaço é utilizado como fonte de energia nas próprias usinas, gerando vapor de água para o processo e para a produção de energia elétrica. Essa forma de utilização do bagaço traz benefícios econômicos e ambientais em relação aos combustíveis tradicionais, uma vez que a sua natureza é renovável. Além disso, o uso do bagaço como fonte de energia proporciona um destino mais nobre para o resíduo da indústria sucroalcooleira, diminui o uso de combustíveis não renováveis e é mais barato em relação à lenha ou derivados do petróleo (SANTOS, LIMA, *et al.*, 2011).

Além do uso como combustível na caldeira, o bagaço pode ser utilizado como ração animal e atualmente até mesmo para a produção de etanol de segunda geração, sendo esta uma tecnologia recente e ainda economicamente pior em relação à sua queima (SANTOS, LIMA, *et al.*, 2011).

2.1.2 Serragem de Madeira

Serragem de madeira é um resíduo proveniente do mercado madeireiro. Ao cortar a madeira, pequenos pedaços são gerados, formando a serragem. A princípio, este resíduo não possuía função alguma dentro do mercado. Porém, com o avanço dos estudos ambientais, foi visto que a serragem tem potencial para exercer uma etapa no tratamento de água, sendo responsável pela filtração mecânica. Pelo fato do leito de serragem ser um meio poroso, partículas que contaminam a água acabam ficando retidas, melhorando a qualidade da água. Efluentes de criadouros de gado e da indústria têxtil são alguns exemplos de efluentes tratados pelo uso da serragem como elemento de filtrante (MONACO, MATOS, *et al.*, 2004).

2.2 Transportadores Pneumáticos

Transporte pneumático é uma operação unitária em que partículas de variados tamanhos são arrastada por uma corrente de gás através de tubulações (KLINZING, RIZK, *et al.*, 2009).

Esse tipo de transporte tem sido aproveitado por diversos tipos de indústria, como alimentícias, minerais, químicas, farmacêuticas, metalúrgicas, processamento de grãos e de plástico, devido à versatilidade do modo de operação, forma de configuração do leito e em alguns casos diminuindo riscos gerados pelas condições diferenciadas nos ambientes, tais como, incêndio, explosão ou insalubridade (TAVARES, 2014). Outras vantagens presente nesse tipo de transporte são o baixo custo de manutenção, facilidade de montagem, automação e controle, operação limpa, redução de perdas de material e viabilidade de combinações de funções de captação e distribuição de sólidos em diferentes pontos de uma planta industrial dentro de um mesmo equipamento (TAVARES, 2014). Porém, muitas vezes o transporte pneumático é preterido em função do alto consumo de energia, degradação excessiva dos produtos transportados, erosão do sistema (linhas, curvas, etc.), excessiva vibração e entupimentos da tubulação (GOMES, 2011).

Algumas propriedades das partículas, como diâmetro médio e densidade são de suma importância para especificação de um transporte (SANTOS, 2009). Além dessas propriedades, a escolha do gás transportador é de grande relevância. Normalmente é usado ar atmosférico por questões econômicas, porém, em casos de risco de explosão, ameaças à saúde humana e até mesmo possibilidade de incêndio gases inertes podem ser empregados, como o nitrogênio (RIBEIRO, 2005).

2.3 Classificação do Transporte Pneumático

Segundo Gomes (2011), destaca-se na classificação do transporte pneumático a pressão e o modo de transporte.

No transporte com pressão positiva, a captação de sólido ocorre em um ponto após o compressor e a descarga pode ser feita em vários pontos. Neste caso o compressor proporcionará a pressão para o transporte enquanto o alimentador será o responsável por introduzir o material na linha (GOMES, 2011).

Para o transporte negativo é ao contrário, a captação de sólido se localiza antes do compressor e ao invés de soprar o material este será sugado, acarretando um fluxo de ar que

arrasta o material para a descarga em um único ponto. Esse sistema tem como alimentador o próprio bico de sucção, possibilitando a coleta do material em pontos distintos (GOMES, 2011).

No sistema combinado, são utilizados os dois sistemas descritos acima. A combinação de pressão positiva e pressão negativa gera um sistema versátil (GOMES, 2011).

De acordo com a concentração de partículas na linha é possível classificar o modo de fluxo do transporte pneumático como fase densa ou diluída (KLINZING, RIZK, *et al.*, 2009)

- **Fase Densa**

A fase densa, na qual está representada pela Figura 1, é caracterizada pelas altas concentrações de sólido na linha, maior que 30% em volume, e altas quedas de pressão por unidade de comprimento de tubo, gerado pela baixa velocidade do gás transportador, tipicamente entre 1 e 5 m/s). (KLINZING, RIZK, *et al.*, 2009)

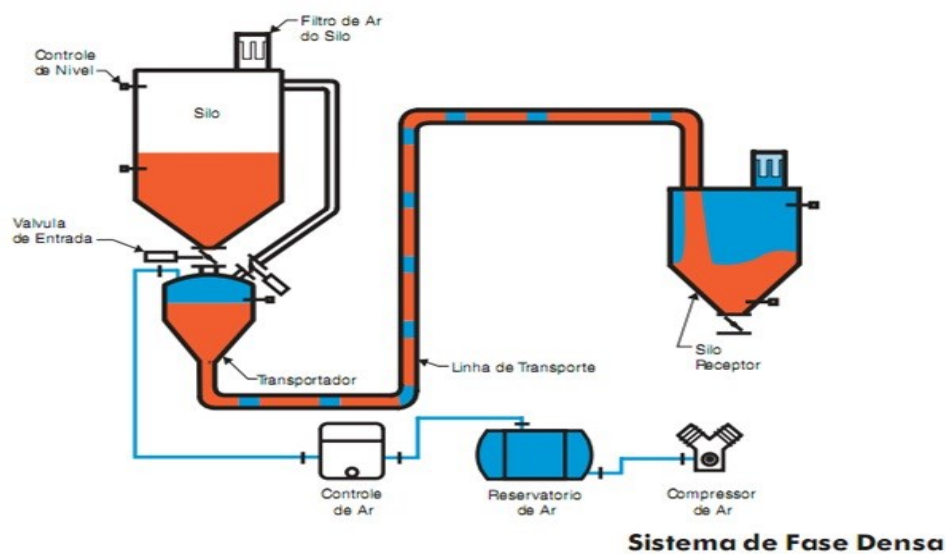


Figura 1 - Transporte em fase densa

- **Fase Diluída**

A fase diluída, na qual está representada pela Figura 2, é caracterizada pelas pequenas concentrações de sólido na linha, menor que 1% em volume, baixas quedas de pressão por unidade de comprimento do tubo. Isso é possível pela alta velocidade do gás transportador, em geral maior que 10 m/s, fazendo com que a força fluido-partícula predomine no sistema. (KLINZING, RIZK, *et al.*, 2009)

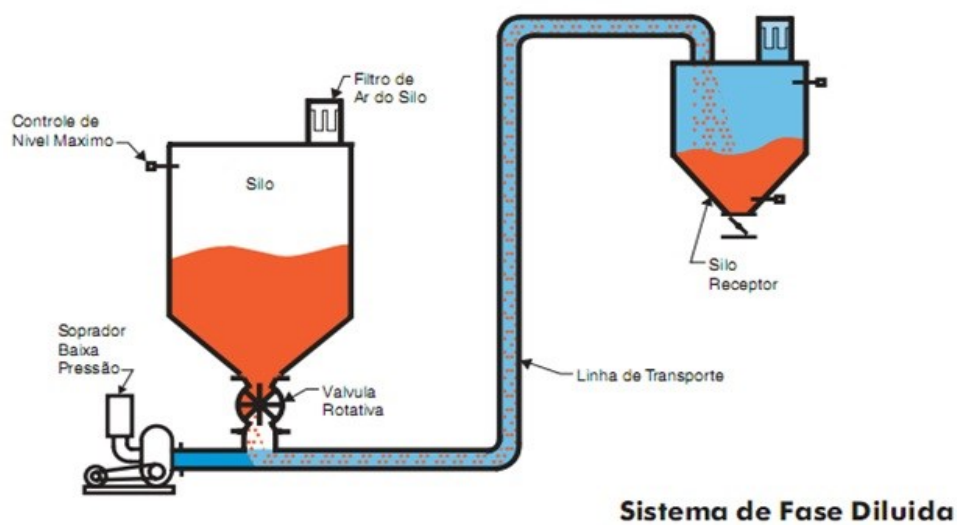


Figura 2 - Transporte em fase diluída

Para determinar com confiabilidade o modo de fluxo, deve-se avaliar o comportamento da queda de pressão em um trecho horizontal reto na região de escoamento estabelecido em função da velocidade de transporte. A Figura 3 representa a transição da fase diluída para fase densa.

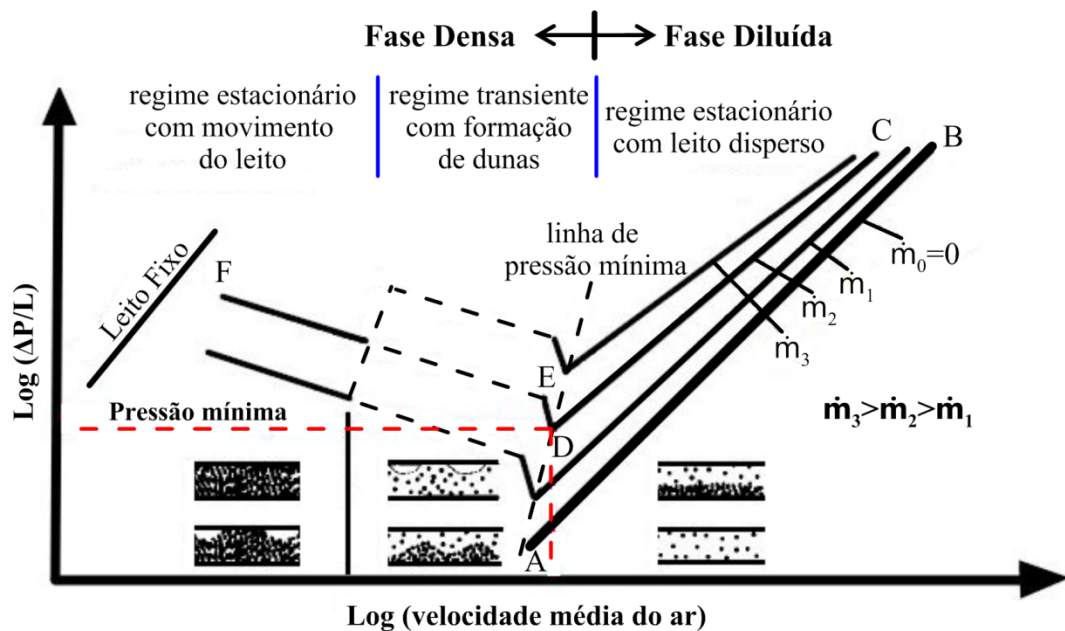


Figura 3 - Diagrama de estado no transporte pneumático horizontal

(KLINZING et al., 2010)

Na Figura 3, a linha AB (sem nenhuma partícula alimentada) representa a perda de carga do gás em um trecho horizontal de uma tubulação.

As linhas acima de AB também representam a perda de carga, mas com alimentação constante de sólidos no sistema de transporte. Assim, para uma mesma velocidade de transporte, a perda de carga aumenta na medida que a vazão mássica aumenta (queda de pressão aumenta de B para C), visto que o arrasto sobre as partículas sólidas e a interação das partículas com a parede geram um aumento da queda de pressão.

Quando a velocidade do ar é reduzida para uma vazão mássica constante (andando sobre a linha CD), a perda de carga diminui, haja vista que com menor velocidade do sólido o atrito é reduzido (KLINZING et al., 2010).

O ponto D representa a condição mínima para o sólido ser transportado em fase diluída (partículas em suspensão), isso é possível somente se a velocidade do gás e a taxa de alimentação imposta não sofrer alterações ao longo do tempo (estado estacionário). Assim, a velocidade do ar correspondente ao ponto D é crítica, podendo ser chamada de velocidade de saltitação. Qualquer diminuição na velocidade de saltitação irá gerar uma deposição de sólido na tubulação, ocasionando um maior atrito e consequentemente um aumento da perda de carga (do ponto D para ponto o E) (KLINZING, RIZK, *et al.*, 2009).

Com uma redução mais drástica na velocidade do gás, além do aumento da perda de carga, o transporte do sólido será realizado parcialmente em suspensão, havendo uma camada de sólido que deposita no fundo do tubo (slug-flow).

2.3.1 Influência dos materiais no modo de fluxo

Segundo PAN (1999) e SANTOS (2009), inúmeros materiais sólidos com propriedades diferentes entre as partículas, como tamanho, forma, densidade e dureza superficial, influenciam nos regimes de transporte. Sendo assim, a importância das propriedades dos materiais sobre o desempenho dos sistemas de transporte pneumático tem sido estudada por muitos pesquisadores de uma forma qualitativa.

Umas das correlações mais relevantes disponíveis na literatura relacionam as propriedades dos materiais com o modo de transporte mais adequado. Nesse contexto, o diagrama de Dixon's Slugging classifica os materiais baseado no diâmetro médio das partículas e sua densidade. Este diagrama, o qual tem como base o diagrama de Geldart, propicia a classificação em quatro grupos de materiais, demonstrados nos gráficos abaixo:

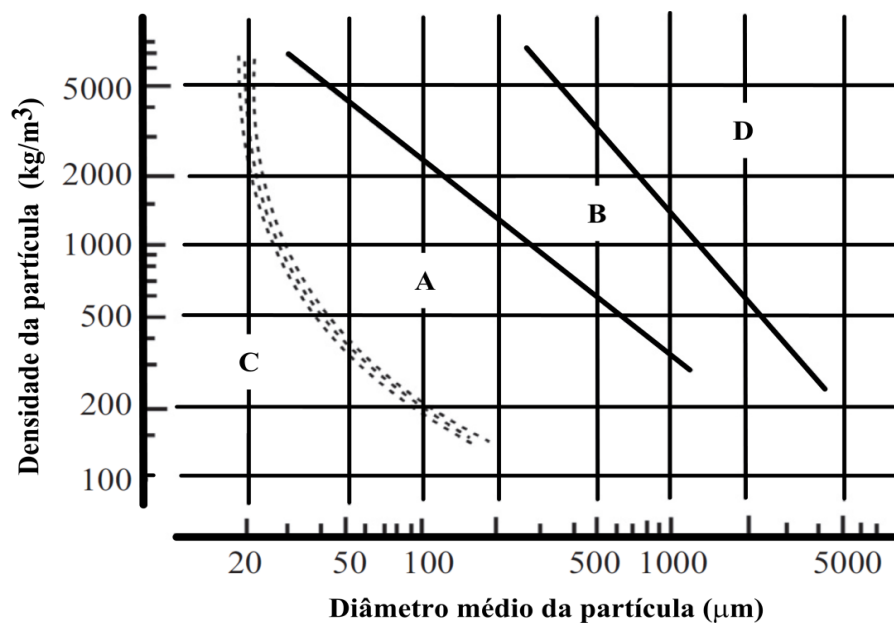


Figura 4 - Diagrama de Geldart

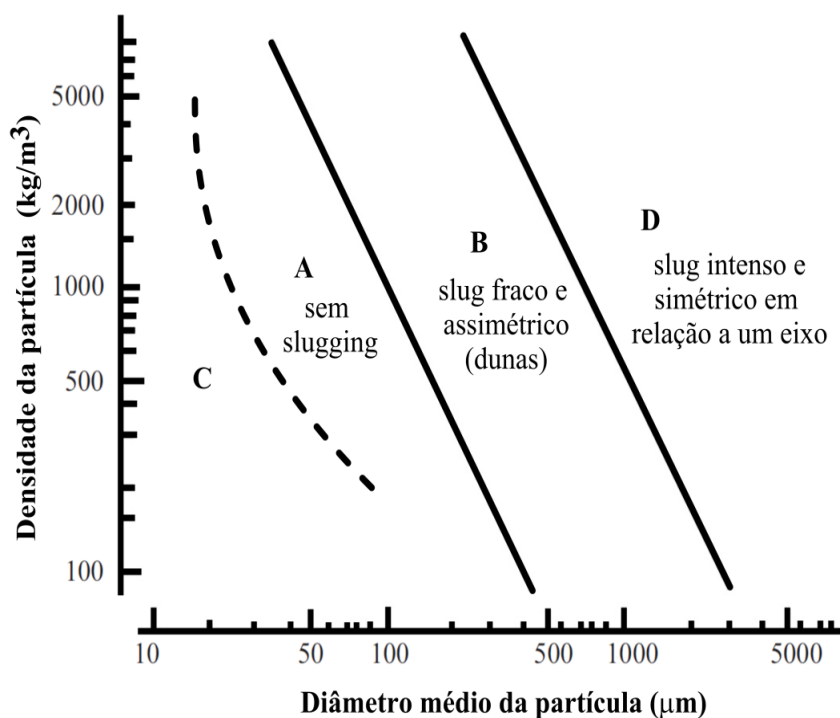


Figura 5 - Diagrama de Dixon's Slugging

O grupo A constitui-se de partículas capazes de fluidizar, sendo o melhor para aplicações de transporte em fase densa. O grupo B são materiais mais grosseiros que não são

adequados para transporte em fase densa em um sistema convencional, estando restritos a fase diluída. O grupo C são coesivos ou pós finos que podem ser difíceis de fluidizar, embora muitas vezes tenham boas características de retenção de ar. Estes materiais podem ser transportados em fase densa, mas podem ser problemáticos principalmente no ponto de alimentação. Já o grupo D são produtos com partículas maiores, que são possíveis candidatos aos regimes de *plug* ou *slug flow*, desde que a distribuição granulométrica das partículas não tenha uma faixa muito extensa. A relevância desta classificação é, justamente, permitir uma previsão do modo de fluxo antes da realização dos testes em uma unidade experimental, por meio do conhecimento prévio das propriedades do material (KLINZING, RIZK, *et al.*, 2009).

2.4 Alimentação

Todos os sistemas de transporte pneumático, sejam do tipo de pressão positiva ou negativa, transportando continuamente ou em modo descontínuo, possuem algum dispositivo de alimentação (MILLS, 2015).

O funcionamento eficaz de um sistema de transporte pneumático está intimamente relacionado à eficiência de alimentação do material na tubulação. Dispositivos de alimentação tem como funções a vedação, em que não permite o gás escapar da linha, e o controle da taxa de alimentação. O controle dessas funções é essencial, pois, uma interferência na taxa de alimentação ou na vedação pode ocasionar aumento na queda de pressão, mudança do regime de fluxo e até mesmo provocar um entupimento da linha (MILLS, 2015).

A alimentação em sistemas de pressão positiva pode apresentar alguns problemas particulares. Nos casos em que o sistema de transporte opera com o silo aberto, ou seja, na pressão atmosférica, o fluxo de ar pode impedir a alimentação do material por gravidade, uma vez que a pressão na linha é maior que a atmosférica. Além disso, a diferença de pressão entre o silo e a linha de transporte ocasiona um vazamento do gás transportador, consequentemente uma perda de eficiência do sistema e um aumento de custo energético (MILLS, 2015). Neste caso, a operação do sistema de alimentação com o silo fechado aparece como uma alternativa para o problema, pois, a vedação total do silo diminui o gradiente de pressão entre o silo de armazenamento e a linha de transporte (GUNDOGDU, 2004). A partir disso, é possível prever problemas de alimentações em sistemas que transportem partículas com baixa densidade bulk (biomassas) e em altas velocidades, já que um pequeno aumento da pressão na linha pode ser suficiente para interferir na alimentação por gravidade.

Os dois problemas descritos acima foram encontrados durante a realização de experimentos deste trabalho. Uma alternativa para resolver essa adversidade foi fechar o silo alimentador de tal forma que a pressão do silo se aproximasse da pressão da linha, minimizando o gradiente de pressão.

Na Figura 6 está representado os alimentadores mais usuais, os quais são classificados em relação à dependência da vazão de sólidos e à vazão de ar de transporte (não-mecânicos ou mecânicos) (LOPES, 2011).

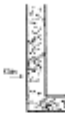
Alimentadores mecânicos	Alimentadores não-mecânicos
 Parafuso helicoidal	 Válvula – L
 Válvula rotativa tipo palheta	 Válvula-J
 Válvula rotativa tipo borboleta	 Válvula –V
 Válvula tipo cônica	 Leito de jorro

Figura 6 - Modelos de válvulas para alimentadores de sólidos (OLIVEIRA, 2001; FERREIRA E FREIRE, 2009).

No transporte pneumático, os alimentadores mecânicos são os mais utilizados, pois este tipo de dispositivo faz o controle da vazão de sólidos na linha sem necessitar de um monitoramento constante. Além disso, os alimentadores mecânicos possuem uma melhor vedação em relação aos outros. A válvula rotativa é um exemplo de alimentador mecânico, na

qual ajustando a rotação ocorre o aumento ou diminuição da descarga de sólido. (LOPES, 2011)

2.4.1 Válvula Rotativa

Entre os alimentadores mecânicos, a válvula rotativa (Figura 7) é o dispositivo mais utilizado para alimentação do sistema de transporte pneumático.

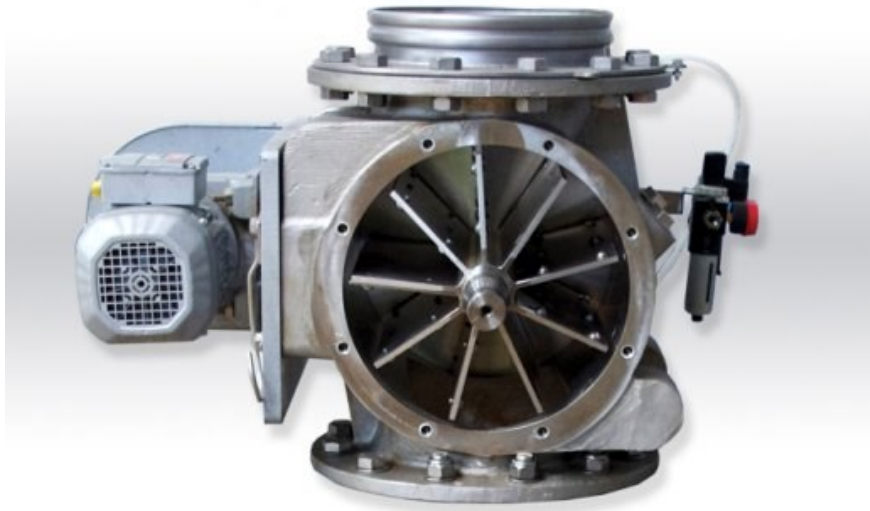


Figura 7 - Válvula Rotativa.

A válvula rotativa é constituída por um rotor em um invólucro estacionário. O rotor consiste em espaços segmentados que coleta materiais de uma abertura no invólucro e entrega o material para a linha de transporte (KLINZING, RIZK, *et al.*, 2009).

Como dito anteriormente, a válvula desempenha a função de vedação e isso é de extrema importância, pois o desempenho do transporte, a eficiência de alimentação e o custo do processo está intimamente relacionado com a eficácia de vedação do dispositivo. Porém, independente da melhor instalação da válvula, nunca terá 100% de eficiência, ocorrendo um vazamento. Assim, medidas como uso de selos de eixo, redução dos tubos do rotor (ambos superior e lateral) e a carcaça, minimiza o efeito de vazamento (KLINZING, RIZK, *et al.*, 2009).

2.4.1.1 Eficiência na alimentação da válvula

A literatura evidencia que a eficiência de alimentação de um sistema está relacionada com a eficácia com que o bolso da válvula é preenchido. Porém, sabe-se que a densidade bulk está relacionada com a efetividade do enchimento da válvula. Assim, a eficiência de alimentação dependerá tanto da velocidade de rotação, quanto da densidade bulk da partícula transportada (MILLS, 2015).

A Figura 8 exibe um aumento na vazão de alimentação devido o acréscimo da velocidade de rotação da válvula.

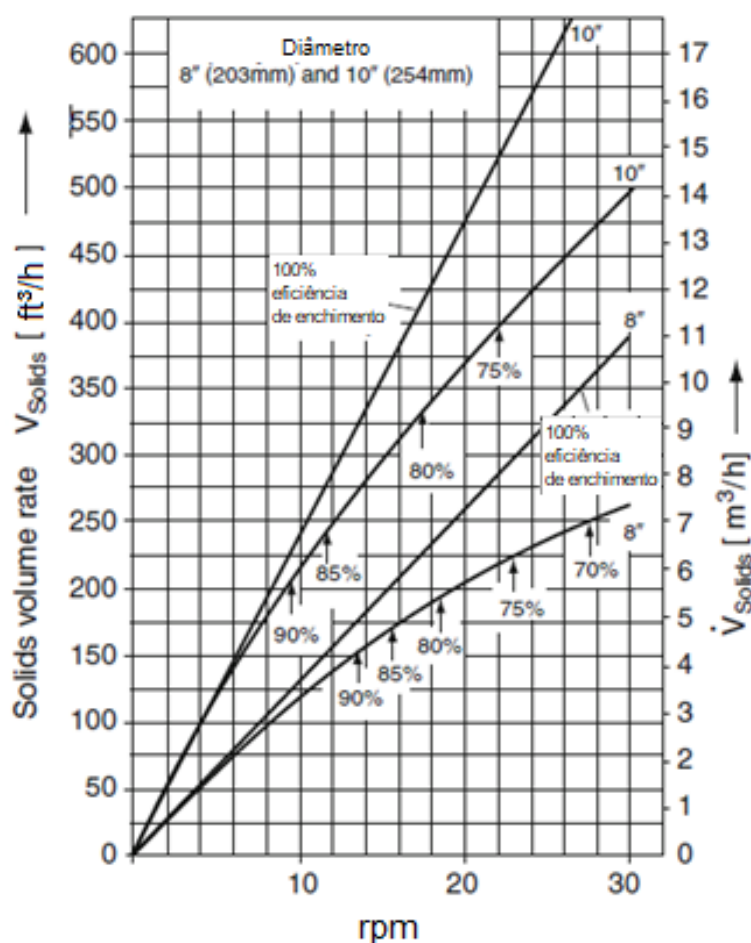


Figura 8 - Comportamento da eficiência de alimentação com a variação da vazão
(KLINZING, RIZK, *et al.*, 2009).

Pela curva que não possui 100% de eficiência de enchimento, curva real, é visto a quantidade alimentada é, até certo ponto, proporcional à velocidade de rotação. O limite de proporcionalidade é atingido à uma velocidade crítica, fazendo com que uma rotação acima

da velocidade crítica torne o tempo insuficiente para descarga completa (KLINZING, RIZK, *et al.*, 2009).

Cada material transportado tem uma velocidade crítica, a qual depende das características do material, fazendo com que para uma mesma velocidade a eficiência de enchimento seja distinta dependendo do material (KLINZING, RIZK, *et al.*, 2009).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Unidade Experimental

Os experimentos foram realizados em uma unidade de transporte pneumático, representada pela Figura 9.

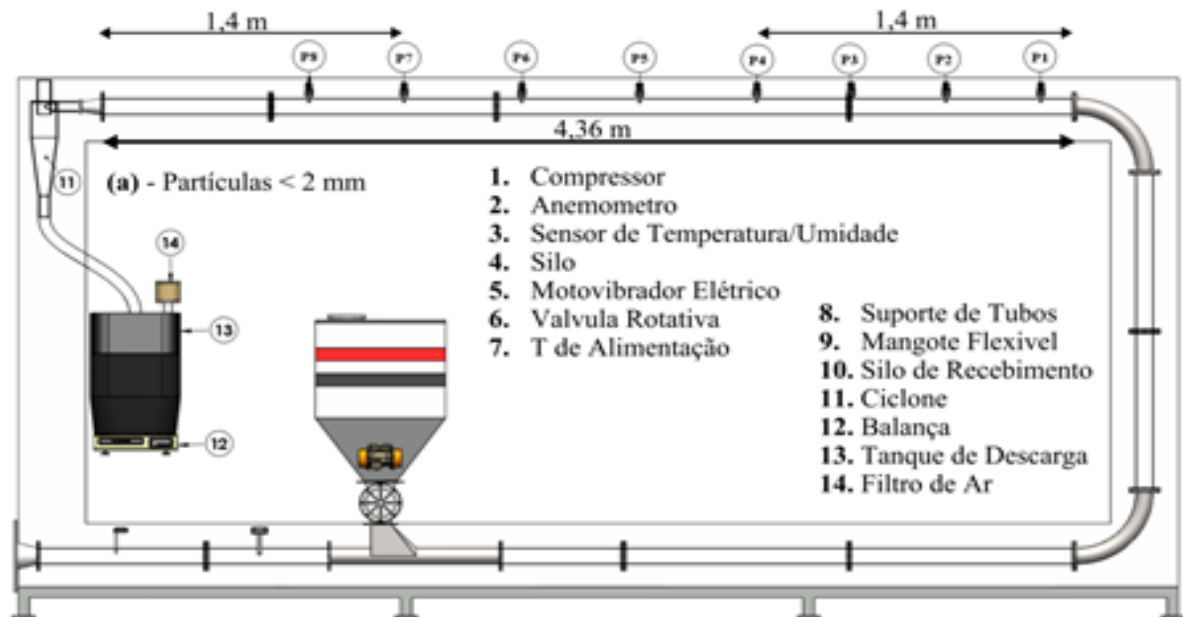


Figura 9 - Unidade de transporte pneumático. Adaptado de Lourenço et al., (2019).

A linha de transporte possuía módulos de tubos com diâmetro interno de 74 mm, construídos em acrílico, sendo 2,5 m de tubulação horizontal após o T de alimentação, 1,5 m de trecho vertical, 4,36 m de trecho horizontal na parte superior da estrutura e duas curvas em PVC com raio de curvatura (R) de 300 mm ($R/D = 4$). Para o deslocamento do ar no interior da tubulação, foi utilizado um compressor radial duplo IBRAM de 10 CV, vazão máxima de $7,6 \text{ m}^3/\text{min}$, pressão de 6800 mmca e vácuo de 5800 mmca. Este estava conectado à linha de transporte por uma mangueira flexível de 75 mm de diâmetro interno e 1,5 m de comprimento.

O sistema de alimentação era composto por um silo alimentador de 171 L de volume e uma válvula rotativa com rotor aberto de 8 compartimentos e capacidade 1,1 L. Para acoplar a válvula rotativa à linha de transporte foi usado um alimentador do tipo T. Além disso, foram

usados dois motovibradores MVL de 75 FC (Força Centrífuga), instalados em lados opostos na região piramidal do silo.

Na separação dos materiais foi empregado um ciclone da família Stairmand de alta eficiência, com diâmetro característico (D_c) de 115 mm feito em acrílico.

A velocidade média do ar foi uma variável de controle dessa unidade experimental. A aquisição de dados foi realizada através do anemômetro de fio quente da Dwyer - Series 641-6-Led. O sensor enviava os dados de velocidade para a placa de aquisição (NI-USB 6211) e através de um software supervisor LabVIEW calculava-se a resposta para tomada de ação de controle. Um inversor de frequência vetorial (WEG -CFW500D28P0T2DB20) era o responsável por regular a rotação do motor do compressor e, por conseguinte, a velocidade do ar na linha de transporte.

3.2 Material Transportado

O material estudado neste trabalho foi a serragem de madeira (SMA), como pode ser observado na Figura 10. Para caracterização do SMA foi necessária a determinação da sua densidade bulk (ρ_b), densidade aparente (ρ_{ap}), umidade em base seca (U_{bs}), diâmetro médio de Sauter (d_{ms}) e ângulo de repouso (α) como descrito no trabalho de (LOURENÇO *et al.*, 2019).



Figura 10 - Serragem de Madeira (SMA)

3.3 Procedimento Experimental

Para a realização dos experimentos, o silo era abastecido com 40 L do material e em seguida fechado. O sistema de controle e aquisição de dados era ligado e a velocidade média de transporte desejada era inserida para início da passagem de ar no sistema. Quando a velocidade se estabilizava, a válvula rotativa era ligada na rotação especificada e o

cronômetro era disparado a partir do momento que a válvula despejava o primeiro montante de sólido na linha. O cronômetro era parado no momento em que o último montante de sólido era despejado na linha. Em seguida, esperava-se todo sólido ainda contido na linha ser transportado para o silo de recebimento para assim efetuar o desligamento do compressor. Todo material transportado era coletado em um recipiente posicionado sobre a balança (URANO, com 30 kg de capacidade e 5 g de precisão), que mensurava a massa de material alimentado no sistema.

Com a massa e o tempo de alimentação era possível determinar a vazão mássica de sólidos experimental ($\dot{m}_{exp}$). A eficiência de alimentação (Y) do sistema foi determinada pela divisão entre a vazão mássica experimental ($\dot{m}_{exp}$) e a vazão mássica teórica [$\dot{m}_{teórica}$], como observado na Equação 1, em que [$\dot{m}_{teórica}$] depende do volume útil da válvula (V_{usef}) e da velocidade de rotação (ω), como está descrito na Equação 2.

$$Y = \frac{\dot{m}_{exp}}{(\dot{m}_{teórica})} \quad (1)$$

$$(\dot{m}_{teórica}) = \omega \rho_{bulk} V_{usef}. \quad (2)$$

Um estudo comparativo entre a eficiência de alimentação de partículas de pó de bagaço de cana de açúcar (BCA), transportados no trabalho de Lourenço et al. (2019), e partículas de SMA, transportados neste trabalho, foi realizado. Com isso, foi possível avaliar a influência da densidade bulk das partículas, da velocidade do ar de transporte (v_{ar}) e da rotação da válvula (ω) na alimentação.

Para isso, foram realizados três experimentos para cada velocidade do ar de transporte (10, 14 e 18 m/s), considerando a rotação da válvula de 7, 16 e 25 RPM, sendo medida, experimentalmente, a eficiência de alimentação das partículas de serragem de madeira (Y_{SMA}). Os resultados obtidos foram comparados aos encontrados por Lourenço *et al.* (2019), que realizou o estudo da eficiência de alimentação das partículas de BCA. As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam o planejamento experimental proposto.

Tabela 1 - Experimento para velocidade de 10 m/s.

Experimentos	v_{ar} (m/s)	ω (RPM)	Y_{BCA} (%)	Y_{SMA} (%)
1	10	7	Lourenço et al. (2019)	Dados Coletados
2	10	16		
3	10	25		

Tabela 2 - Experimento para velocidade de 14 m/s.

Experimentos	v_{ar} (m/s)	ω (RPM)	Y_{BCA} (%)	Y_{SMA} (%)
1	14	7	Lourenço et al. (2019)	Dados Coletados
2	14	16		
3	14	25		

Tabela 3 - Experimento para velocidade de 18 m/s.

Experimentos	v_{ar} (m/s)	ω (RPM)	Y_{BCA} (%)	Y_{SMA} (%)
1	18	7	Lourenço et al. (2019)	Dados Coletados
2	18	16		
3	18	25		

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.2 Caracterização do material

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos a partir da caracterização das partículas de SMA, bem como os dados das propriedades das partículas de BCA obtidos no trabalho de Lourenço *et al.* (2019).

Tabela 4 - Propriedades das partículas de bagaço de cana e serragem.

Material	<i>Geldart</i>	ρ_b (kg / m ³)	ρ_{ap} (kg / m ³)	*U _{bs} (%)	d _{ms} (μm)	*α (°)
BCA	A	181,3 ± 2,4	827,5 ± 16,1	6,3 ± 0,0	224,6	43,1 ± 4,0
SMA	A	370,0 ± 5,9	1107,11 ± 19,1	3,21 ± 0,1	149,5	41,0 ± 1,9

5.1 Estudo comparativo da eficiência de alimentação das partículas de SMA e BCA.

Os resultados do planejamento experimental realizado estão apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7, assim como resultados obtidos no trabalho de (LOURENÇO, 2018), com o intuito de comparação entre as partículas.

Tabela 5 - Eficiência de alimentação para $v_{ar} = 10\text{m/s}$

Experimentos	v_{ar} (m/s)	ω (RPM)	Y_{BCA} (%)	Y_{SMA} (%)
1	10	7	73,70	87,90
2	10	16	67,24	82,41
3	10	25	61,77	82,52

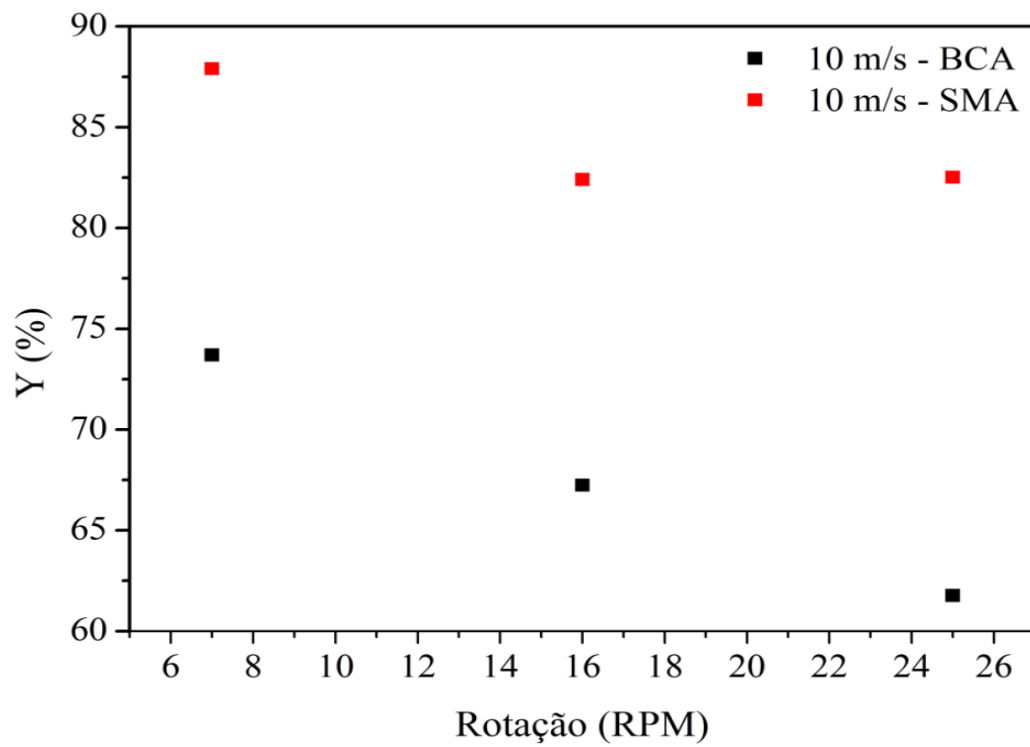


Figura 11 - Eficiência de alimentação em função da rotação da válvula para $v_{ar} = 10\text{m/s}$.

Tabela 6 - Eficiência de alimentação para $v_{ar} = 14\text{m/s}$.

Experimentos	v_{ar} (m/s)	ω (RPM)	Y_{BCA} (%)	Y_{SMA} (%)
1	14	7	89,57	95,47
2	14	16	72,95	83,20
3	14	25	66,71	81,35

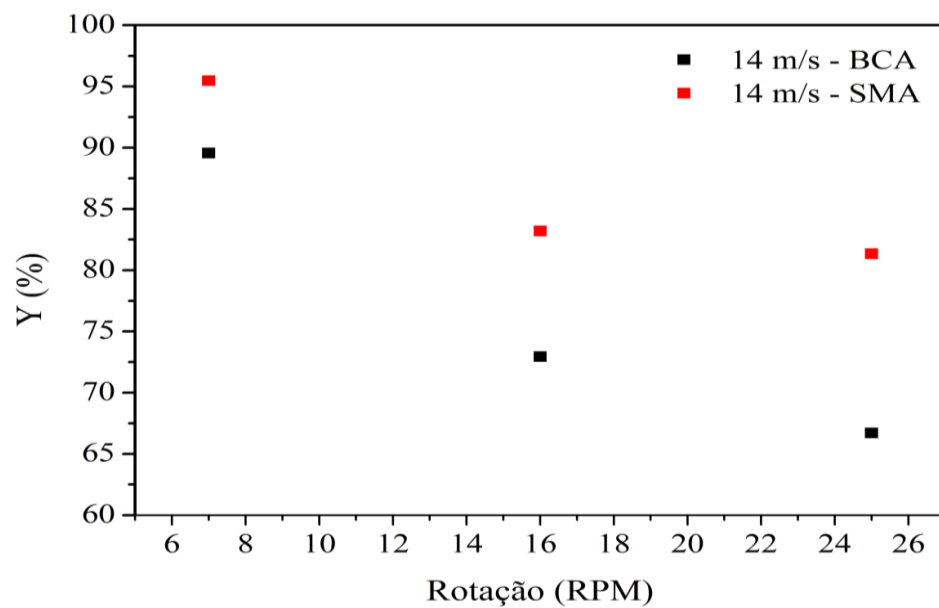


Figura 12 - Eficiência de alimentação em função da rotação da válvula para $v_{ar} = 14\text{m/s}$.

Tabela 7 - Eficiência de alimentação para $v_{ar} = 18\text{m/s}$

Experimentos	v_{ar} (m/s)	ω (RPM)	Y_{BCA} (%)	Y_{SMA} (%)
1	18	7	90,06	96,60
2	18	16	81,19	86,65
3	18	25	66,65	82,75

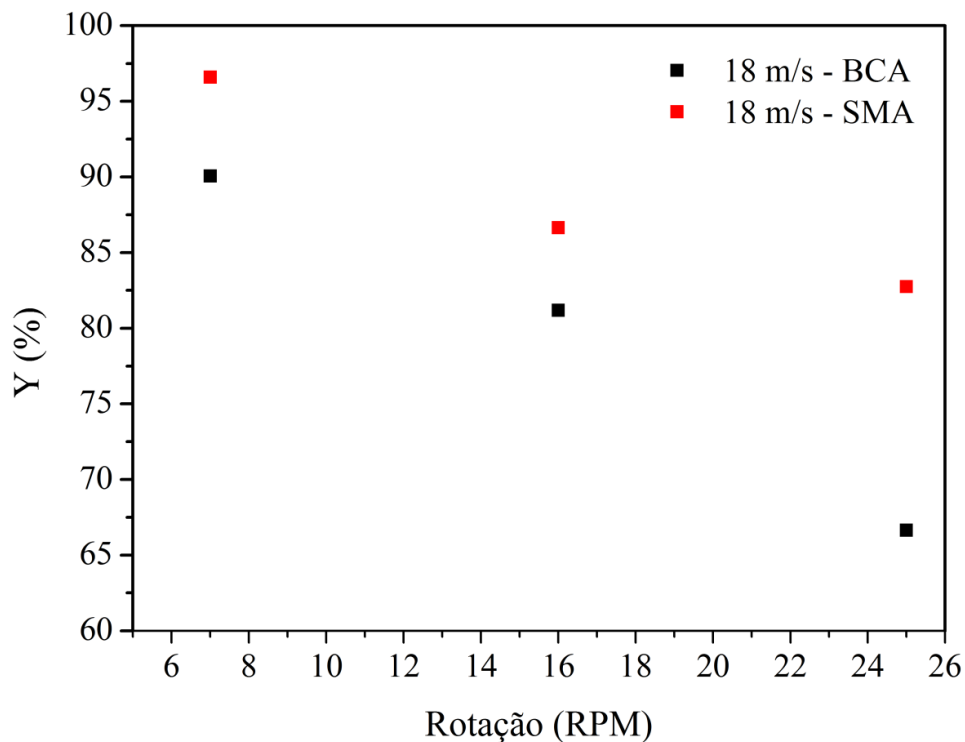


Figura 13 - Eficiência de alimentação em função da rotação da válvula para $v_{ar} = 18\text{m/s}$

Como visto no trabalho de LOURENÇO (2018), é possível concluir que o aumento da velocidade de rotação da válvula causa uma redução da eficiência de alimentação das partículas na linha de transporte. Segundo o autor, isso pode estar associado ao tempo insuficiente para o preenchimento completo dos bolsos da válvula rotativa, gerando espaços vazios e, conseqüentemente, diminuindo a eficiência de alimentação.

Além da velocidade de rotação da válvula, verificou-se que a velocidade do ar também tem influência direta na eficiência de alimentação, porém com um comportamento inverso, ou seja, o aumento da velocidade do ar provoca um aumento de eficiência de alimentação da

serragem no sistema. Como explicado por (LOURENÇO, 2018), o aumento da velocidade do ar gera uma turbulência próxima ao bocal de alimentação do silo, descompactando as partículas e favorecendo o descongestionamento na região.

Assim, ambas as partículas tiveram comportamentos semelhantes diante das alterações da velocidade de rotação da válvula e velocidade do ar.

Com os dados da Tabela 5 foi gerado um gráfico que relaciona a eficiência de alimentação com a velocidade de rotação (Figura 11). Visualizando o gráfico, fica evidente a queda de rendimento provocado pelo aumento da velocidade de rotação da válvula, principalmente para a partícula com menor densidade bulk, neste caso, o bagaço de cana.

Com os dados da tabela 6 também foi gerado um gráfico (Figura 12) retratando a queda de rendimento ocasionado pelo aumento de rotação. Porém, quando comparado com o gráfico anterior, é possível verificar que o aumento da velocidade do ar provocou um aumento geral e uma aproximação nos valores de eficiência de alimentação do bagaço de cana e da serragem, constatando que a velocidade do ar tem mais influência sobre as partículas de menor densidade.

Apesar das similaridades, é evidente que a partícula de serragem possui maior eficiência de alimentação que a partícula de bagaço de cana, pois a diferença de densidade é relevante. No caso, a partícula com densidade maior possui eficiência de alimentação mais elevada quando comparada com a partícula de menor densidade. Um dos possíveis motivos é o fato da partícula de maior densidade sofrer menos influência do contra fluxo do ar próxima ao local de alimentação. Além dessa diferença entre as partículas, a eficiência de alimentação da serragem não sofreu alteração significativa nas condições de 16 rpm e 25 rpm. Isto ocorre pois, pelo fato da partícula de serragem possuir densidade mais elevada, a pequena variação da velocidade de rotação não foi suficiente para ocorrer uma mudança significativa na eficiência. Já para a partícula de bagaço de cana, a qual possui uma menor densidade, a pequena variação gerou um maior impacto.

6. CONCLUSÃO

No trabalho experimental desenvolvido é possível concluir que a densidade aumenta a eficiência de alimentação das partículas de biomassa, haja vista que para todas as velocidades testadas observou-se uma superioridade da eficiência de alimentação das partículas de SMA.

Também é possível afirmar que o aumento da rotação proporciona a diminuição da eficiência de alimentação, como apresentado nos trabalhos de Lourenço et al. (2019). No entanto, para faixa experimental estudada, as partículas de SMA não apresentam uma redução de eficiência significativa para rotações superiores a 16 RPM quando comparada à partícula de menor densidade bulk (BCA). Na rotação de 25 RPM, foi possível observar o maior desvio entre as eficiências de alimentação das partículas de SMA e BCA, independentemente da velocidade em que o transporte foi realizado.

REFERÊNCIAS

CORTEZ, L. A. B.; GÓMEZ, E. E. S. L.; OLIVARES, E. **Biomassa para Energia**. Campinas: Unicamp, 2008.

GOMES, L. M. **Contribuição à análise do transporte pneumático em fase diluída**. Universidade. Belém. 2011.

GUNDOGDU, M. Y. Design improvements on rotary valve particle feeders used for obtaining suspended airflows. **Powder Technology**, v. 139, n. 1, p. 76–80, 2004.

KLINZING, G. E. et al. **Pneumatic Conveying of Solids**. 3º. ed. [S.l.]: [s.n.], v. VIII, 2009.

LOPES, C. S. **Estudo da alimentação de sólidos em sistemas de transporte pneumático**. [s.l.] UFScar, 2011.

LOURENÇO, G. et al. **Estudo da eficiência de alimentação de um sistema de transporte pneumático**. Cobeq. **Anais...**São Paulo: 2018

LOURENÇO, G. A. et al. Experimental study of efficiency in pneumatic conveying system's feeding rate. **Powder Technology**, v. 343, p. 262–269, 2019.

MILLS, D., *Pneumatic conveying design guide*. Butterworth-Heinemann, 2015

MONACO, P. A. L. et al. Influência da granulometria da serragem de madeira como material filtrante no tratamento de águas residuárias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. VIII, Fevereiro 2004.

PAN, R., “Material properties and flow modes in pneumatic conveying”, **Powder Technology**, v. 104, 1999.

RIBEIRO D. S. Transporte Pneumatico – Tecnologia, projetos e aplicacoes na industria e nos servicos, ARTLIBER, 2005.

SANTANA, C. C., PEREIRA, J. A. R., MASSARANI, G. Transporte pneumático vertical em fase densa. In: ENEMP, VIII, 1980, Curitiba. **Anais do VIII ENEMP**, Curitiba, 1980

SANTOS, M. L. D. et al. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Quim. Nova**, Franca, v. XXXIV, n. 3, Janeiro 2011.

SANTOS, S. M. D. **Projeto e montagem de unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída para estudo da relação entre a perda de carga e a distribuição de partículas granulares na seção transversal de dutos industriais**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2009.

TAVARES, V. A. **Transporte pneumático de soja em fase diluída: obtenção da perda de carga e distribuição de partículas na seção transversal da tubulação horizontal**. Universidade Santa Cecília. Santos. 2014.