

Princípios de otimização dos parâmetros de transporte pneumático de um vaso de pressão original

Adriano Gomes de Freitas¹
Ricardo Borges dos Santos²
Vitor Furlan de Oliveira³
Luis Alberto Martinez Riascos⁴

Resumo

O manuseio de materiais particulados por meio de transporte pneumático é um processo amplamente difundido nas indústrias. As aplicações e estudos historicamente tiveram seu objeto de estudo migrado de transportes em fase diluída para transportes em fase densa, devido a sua redução no consumo energético. No entanto, tais estudos se mostram altamente empíricos e suas conclusões são, na maioria dos casos, limitadas a condições experimentais, de forma que para otimizar um sistema levando em consideração tanto a taxa de transporte quanto a eficiência energética, são necessários a realização de testes experimentais. O presente trabalho apresenta um método sistemático para determinar a pressão e o fluxo de ar necessários para operar um sistema de transporte pneumático visando sua otimização energética. O método foi testado e aplicado a um sistema de transporte pneumático industrial, composto por um vaso de pressão compacto de volume de 100 L, que introduz material em uma tubulação de 133 m de comprimento com diâmetro de 3 pol. É demonstrada a possibilidade de controlar o sistema com o mínimo de dois parâmetros de entrada: limitando a pressão e fluxo de ar de transporte, determina-se a respectiva potência consumida e taxa de transporte. A razão entre os dois últimos parâmetros determina a eficiência energética do processo.

Palavras-chave: Eficiência energética; Transporte pneumático; Vaso de pressão; Alimentador de sólidos.

PRINCIPLES OF OPTIMIZATION FOR THE PARAMETERS OF A NEW COMPACT PRESSURE VESSEL FOR PNEUMATIC CONVEYING

Abstract

The handling of particulate materials by means of pneumatic conveying technique is a widespread process in industries. The applications and studies historically had their object of study migrated from transport in diluted phase to transport in dense phase, due to its reduction in energy consumption. However, such studies are highly empirical and their conclusions are, in most cases, limited to experimental conditions, so that to optimize a system taking into account both the transport rate and energy efficiency, it is necessary to carry out experimental tests. This work presents a systematic method to determine the pressure and the air flow necessary to operate a pneumatic conveying system aiming at its energy optimization. The method was tested and applied to an industrial pneumatic conveying system consisting of a 100 L compact blow tank, which introduces material in a 133 m long pipe with a 3 in diameter. The possibility of controlling the system with a minimum of two input parameters is demonstrated: limiting the pressure and flow of transport air, the respective power consumption and conveying rate are determined. The ratio between the last two parameters determine the energy efficiency of the conveying process.

Keywords: Energy efficiency; Pneumatic conveying; Blow Tank; Solids feeder.

¹ *Bacharel em Ciência e Tecnologia, Engenheiro de Gestão, Mestre em Engenharia e Gestão da Inovação, Doutorando em Energia, Universidade Federal do ABC - UFABC, Santo André, SP/Brasil. Visitor Researcher at Lab for Simulation and Modelling of Particulate Systems, Monash University, Melbourne/AU.*

² *Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Mecatrônica, Doutor em Ciência da Computação, UFABC, Diretor na Zeppelin Systems Equipamentos Industriais LTDA, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.*

³ *Bacharel em Ciência e Tecnologia, Engenheiro de Controle e Automação, Mestrando em Engenharia Mecatrônica, Universidade de São Paulo, USP, SP, Brasil.*

⁴ *Engenheiro, Mestre e Doutor em Engenharia Mecânica, Professor na UFABC.*

1 INTRODUÇÃO

O transporte pneumático é caracterizado pelo deslocamento de sólidos em um fluxo de gás gerado a partir de um soprador, compressor ou gerador de vácuo e tem como objetivo deslocar material a granel de origens para destinos. Essa forma de manuseio de materiais é amplamente difundida no setor industrial, para indústrias alimentícias, petroquímicas, minerais, entre diversas outras. Esta ferramenta é empregada desde meados do século XIX, com sua primeira aplicação documentada para desembarque de grãos de navios, hoje é utilizada em múltiplos processos industriais na produção ou transportando ingredientes ou produto acabado [1]. Os estudos de sistemas de transporte pneumáticos surgiram apenas no século seguinte, no século XX com Gasterstadt, que em 1924 modelou a queda de pressão do transporte pneumático em fase diluída [2].

Por mais de cinco décadas após os primeiros estudos, o tema da eficiência energética no processo de transporte pneumático não foi muito explorado. A maioria dos sistemas foi projetada com foco no transporte do material o mais rápido possível. A energia necessária para produzir o deslocamento desejado não foi frequentemente abordada ou relatada na literatura neste período. A década de 70 trouxe o desenvolvimento do transporte pneumático em fase densa para reduzir o desgaste e os custos operacionais (*Operating Expenses* - OPEX) [3]. Entre outras vantagens, frisa-se a redução no consumo de energia em deslocamentos de particulados, porém, resultando em maior complexidade de operação, o que incorre em maior dispêndio de capital inicial (*Capital Expenses* - CAPEX) se comparado a um sistema em fase diluída.

A escolha da fase em que o transporte, caso possível, deve ser realizada implica diretamente na escolha do dispositivo alimentador de sólidos a ser utilizado no sistema. Neste trabalho, foi utilizado um alimentador de sólidos compacto, desenvolvido para transportar partículas em fluxo livre ou materiais do tipo *pellet* em lotes menores, que permite a operação em fase densa, com redução do consumo de ar, do desgaste da tubulação e do material transportado. Assim sendo, o dispositivo possibilita o avanço da técnica de transporte em fase densa.

Embora o transporte pneumático esteja sendo extensivamente estudado há décadas, com uma breve revisão da literatura de trabalhos experimentais desenvolvidos nesta área, pode-se concluir que na maioria dos casos os resultados apresentados são fortemente limitados pelas condições experimentais e não podem ser generalizados para um amplo espectro de situações [1, 3]. É comum encontrar trabalhos de pesquisa com estudos de caso, nos quais a diferença entre os casos de uso se dá apenas pela seleção do material transportado ou pela disposição da linha de transporte. Além disso, estes trabalhos não apresentam os procedimentos de parametrização do sistema ou variáveis que determinam as condições da fase do transporte.

Este trabalho tem como objetivo apresentar um método de parametrização sistêmica que pode ser aplicado em um sistema de transporte pneumático geral alimentado por um dispositivo de sopro compacto, a fim de obter pontos de operação ótimos em termos de taxa de transporte e eficiência energética. Este método permite a caracterização do desempenho de um sistema de transporte pneumático, utilizando variáveis de potência (queda de pressão x vazão) para diferentes vazões de massa

de sólidos. Os resultados são mostrados em um gráfico de coordenadas cartesianas bidimensionais, método apresentado pela primeira vez por Zenz em 1949, assim sendo chamado por diversos autores de Diagrama de Zenz. Amplamente usado para projetar o transporte pneumático de um pó específico ou sólido granulado.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Sistema de transporte pneumático

O procedimento experimental deste trabalho foi realizado no Centro de Testes da empresa Zeppelin Systems Latin America. Este laboratório permite a realização de testes em escala industrial para sistemas de transporte pneumático de até 10 t/h. O vaso de pressão compacto de 0,1 m³ denominado Batchpump™ desenvolvido pela empresa é projetado para um ciclo operacional de até 50 ciclos por hora e é ilustrado na Figura 1.



Figura 1. Vaso de pressão compacto - Batchpump [4].

O sistema em escala industrial é composto por uma moega (MG-02) responsável por fornecer material particulado para o dispositivo Batchpump. Existem duas válvulas borboleta utilizadas para controlar o processo de dosagem. Um transmissor de pressão monitora a queda total de pressão no sistema e outra válvula borboleta que é responsável por permitir o fluxo de ar para o sistema. Antes disso, um regulador de pressão e uma válvula globo são usados para restringir a pressão máxima e o fluxo de ar nesta fase. No sistema, tanto o ar quanto o material são injetados em uma tubulação de 133 m de comprimento, dos quais 5 m são de altura vertical, com 3 polegadas de diâmetro. No final da linha, o material atinge uma moega receptora com células de carga (MG-04) acoplada a um filtro de ar. Posteriormente, o material é reinserido na moega (MG-02) por gravidade e se reinicia o ciclo.

O ciclo é determinado pela recirculação do material entre as duas moegas. O processo de alimentação determina o início de um ciclo de transporte. Este tempo de dosagem representa o tempo morto do ciclo, uma vez que nenhum material está sendo transportado pneumaticamente. Após o processo de alimentação, as válvulas de dosagem fecham e a válvula borboleta, que permite a entrada de ar no sistema, é aberta. Quando um valor predeterminado de pressão é alcançado, a inserção de ar é

cortada e o dispositivo Batchpump é alimentado novamente, iniciando um novo ciclo de transporte. Este valor de pressão predeterminado é chamado de "pressão de fim de ciclo (Pth)" e tem implicações diretas no desempenho do sistema.

A pressão a montante do Batchpump, o fluxo de ar através do dispositivo e a massa total transportada acumulada são medidas e armazenadas em um sistema supervisor. O controle sequencial das válvulas, que dita o processo cíclico, é realizado por um controlador lógico programável (CLP) [6, 7]. Uma interface humano-máquina (IHM) permite a interação entre o usuário e o sistema de controle. Com esta estação de monitoramento e controle, é possível definir parâmetros relevantes do ciclo de transporte e avaliar seu desempenho para determinado ponto operacional de acordo com os dados coletados. A estrutura do sistema com os principais componentes e instrumentos é mostrada na **Figura 2**.

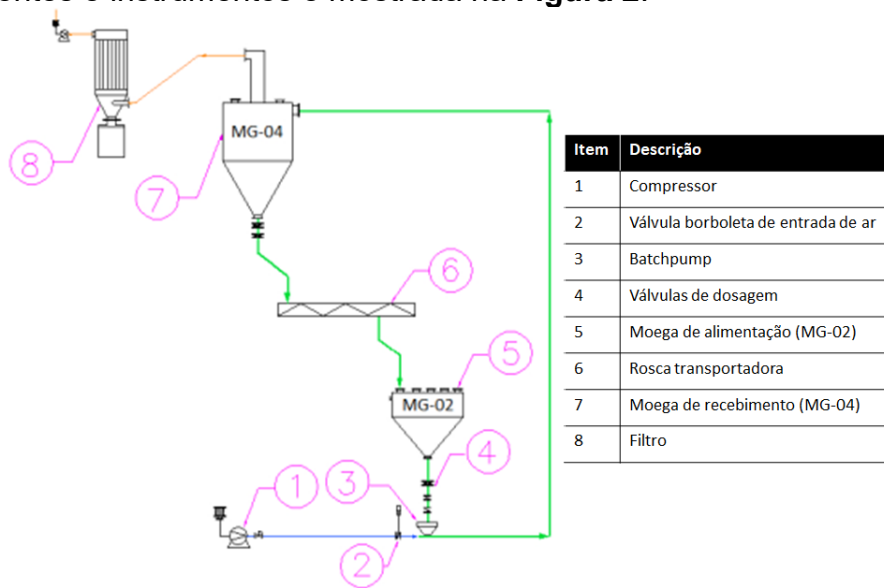


Figura 2. Layout do sistema [5].

O experimento foi conduzido com pressão máxima ajustada para 400 kPa, o Pth foi inicialmente ajustado para um valor maior do que a queda de pressão de uma tubulação de ar limpo e foi posteriormente aumentado entre os testes de forma gradativa até que instabilidades fossem observadas e o entupimento acontecesse. Este entupimento é observado quando a pressão se mantinha no seu valor máximo de 400 kPa por mais de 1 min. Neste ponto, considerou-se que o limite para a respectiva situação de fluxo de ar foi atingido e a restrição de fluxo de ar foi aumentada para refazer a varredura de Pth. Todos os testes tiveram duração de 30 minutos. Esta metodologia simples resume o método empírico proposto neste artigo para ajustar o ponto de operação de um sistema de transporte pneumático geral, que é descrito em maiores detalhes na subseção 2.3.

2.1 Caracterização do material

A primeira etapa do projeto de transporte pneumático é a caracterização da partícula e do volume que será transportado pneumaticamente. Propriedades de pó sólido,

como abrasividade, friabilidade, carga eletrostática e baixo ponto de fusão são algumas das motivações para escolher o design de transporte na fase densa em oposição ao design de fase diluída comumente empregado [9]. Em relação ao comportamento do material e do gás na tubulação, o termo “fase densa” implica em um valor mais alto da razão sólido-gás.

Para avaliar o desempenho do sistema, as variáveis de saída utilizadas são: razão sólido-gás, taxa transportada e o consumo específico de energia. Essas variáveis foram mapeadas em intervalos de 1 segundo para definir os indicadores de desempenho do sistema pneumático.

Razão sólido-gás (μ): quilogramas de material transportado (m_{mat}) dividido pela quantidade de ar (m_{ar}) necessária para o processo de transporte, também em quilogramas.

$$\mu = \frac{m_{mat}}{m_{ar}} \quad (1)$$

Vários estudos propuseram correlações entre as propriedades do material a granel/partícula e seu comportamento quando submetido ao fluxo de gás [10]. Um dos trabalhos pioneiros neste tema é ainda relevante até o momento foi conduzido por D. Geldart em 1973, que propôs categorizar os materiais em 4 grupos de acordo com o tamanho e densidade das partículas, coesividade do material e o tipo de fluidização correspondente [8]. Estudos subsequentes usaram os chamados Grupos de Geldart (de A a D) entre outros métodos de classificação como uma ferramenta de projeto para prever a fase de transporte em sistemas pneumáticos.

Em 2008, [11] modificaram o diagrama de Geldart original, usando a densidade aparente de sólidos vazada em oposição à densidade de partículas. Eles foram capazes de demonstrar que os materiais pertencentes aos Grupos A e C de Geldart tendem a ser transportados no modo de fase densa fluidizada, enquanto os materiais do grupo D são mais propensos a serem transportados no modo *plug* e aqueles do grupo B geralmente só podem ser transportados em fase diluída. Considerando esses resultados, pode-se argumentar que o material como o pó de calcário calcítico utilizado neste trabalho, consistindo principalmente de partículas esféricas de diâmetro médio de 40 μm e densidade aparente sem compactação de 2,710 kg/m^3 pertence ao grupo Geldart C. Este grupo pode ser transportado em fases densas fluidizadas sob condições de alta pressão e baixa velocidade do ar.

Na literatura especializada, a fase densa de transporte também é descrita como uma nuvem densa de partículas fluidizadas. O transporte de materiais com as características acima mencionadas, minimiza os danos aos componentes dos sistemas e ao material transportado, bem como os riscos de acidentes [12].

2.2. Parâmetros e indicadores de desempenho

O indicador de desempenho mais importante para o sistema de transporte pneumático em aplicações industriais práticas é certamente a capacidade, medida em unidades de massa por unidade de tempo, doravante denominada taxa de transporte (\dot{m}).

Atender a \dot{m} projetada garante que a produtividade desejada dos processos antes e depois de cada transportador será alcançada, a produtividade da linha completa e as datas de entrega do produto serão atendidas. A taxa de transporte de massa pode ser obtida simplesmente pela relação entre a quantidade de material (toneladas) transportado durante um determinado período (horas). Em alguns casos, a parametrização do sistema é definida como concluída quando o CR desejado é alcançado, sendo o consumo de energia uma preocupação secundária, mesmo que aumente o OPEX do processo.

Taxa de transporte (\dot{m}): Toneladas de material (m_{mat}) transportadas pelo sistema durante o intervalo de tempo avaliado (Δt) em horas. Em termos matemáticos, é dado pela Equação (2):

$$\dot{m} = \frac{m_{mat}}{\Delta t} \quad (2)$$

Além da taxa de transporte, o consumo de energia é outro fator de extrema importância e justifica a escolha do transporte da fase densa ao invés da fase diluída. De forma simples e comumente utilizada, a potência consumida por um sistema de transporte pneumático pode ser avaliada pelo produto entre a vazão de ar de transporte (Q) e o diferencial de pressão (Δp) ao longo da tubulação [13].

O consumo específico de energia (SEC) de um sistema de transporte pneumático consiste em um parâmetro mais relevante para avaliar a eficiência do sistema [14], geralmente pode ser avaliado pela equação (3).

$$SEC = (Q \cdot \Delta p) / \dot{m} \quad (3)$$

A vazão de ar e a pressão de transporte determinam o ponto operacional de um sistema em termos de taxa de transporte e consumo de energia. Esses parâmetros são geralmente representados no diagrama de Zenz, onde o eixo de abcissas apresenta a vazão de transporte ou a velocidade do ar e a queda de pressão (tradicionalmente por unidade de comprimento da tubulação) é expressa no eixo das ordenadas. Para cada par de coordenadas, a taxa de transporte é determinada e assim as curvas de taxa de transporte constante, chamadas de curvas iso mássicas, podem ser traçadas. A área de um retângulo limitada por um par de coordenadas neste diagrama contém a informação sobre o consumo de energia do sistema, pois o produto entre os eixos expressa a necessidade de potência do referido ponto de operação.

2.3. Método para parametrização do sistema

A parametrização do sistema pode ser entendida como o processo de modificar simultaneamente os parâmetros de entrada para percorrer o diagrama de Zenz e chegar ao ponto de operação desejado. Em outras palavras, os resultados demonstraram como o fluxo de ar e a pressão de transporte variam dependendo dos parâmetros de entrada. Desta forma, a taxa de transporte desejada pode ser alcançada, bem como a necessidade de energia do processo pode ser determinada de forma que, para uma taxa de transporte pré-determinada, a energia disponível para o sistema não seja subutilizada.

Para alcançar essa parametrização, os testes foram feitos sequencialmente, monitorando a queda de pressão total e o fluxo de ar por meio de transmissores de pressão e fluxo de ar. Os testes começaram com um valor superior à queda total de pressão do tubo de ar limpo. O primeiro valor obtido neste caso foi 500 mbar, então esse valor foi escolhido para ser o primeiro valor de Pth. Foi então aumentado em intervalos regulares de 500 mbar até atingir um ponto de entupimento. Uma situação de entupimento é o momento em que nenhum gás ou fluxo de ar adicional é possível e requer limpeza manual da tubulação. Isso é obviamente prejudicial e ocorre em diferentes configurações do fluxo de ar usado no teste.

O primeiro conjunto de testes foi feito utilizando a capacidade total de fluxo de ar nas condições iniciais de pressão máxima de 400 kPa. Observado o entupimento, iniciou-se um novo conjunto de testes com redução do giro da válvula globo em um valor fixo, diminuindo seu diâmetro e reduzindo o fluxo de ar para o teste, com o mesmo ponto inicial e aumentando a Pth nos mesmos intervalos. O fluxograma que descreve essas execuções é ilustrado na **Figura 3**.

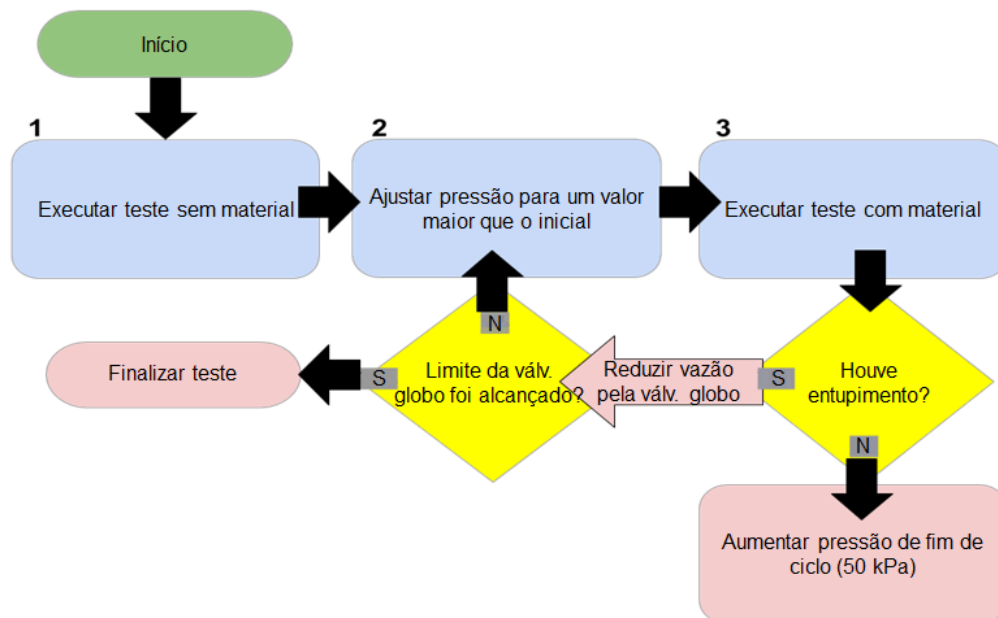


Figura 3. Fluxograma de testes.

Se fez necessário determinar um estado estacionário para o sistema operar, porque o dispositivo Batchpump tem dimensões menores que os vasos de pressão convencionais, então há uma porção maior do regime de transição. Isso foi feito usando a definição de SEC. A partir dos dados experimentais de massa transportada, pressão e fluxo de ar durante o processo de expansão, foi possível avaliar o consumo específico de energia: Substituindo a taxa de transporte pela sua definição $\left(\dot{m} = \frac{m_{mat}}{\Delta t}\right)$ na **equação 2**, pode-se obter: $SEC = (Q \cdot \Delta m) / \dot{m}$ (**eq. 3**) onde Δm é precisamente a massa transportada até o instante τ . Como $P \cdot Q \Delta t = \int P \cdot Q dt$ é a integral da potência ao longo do tempo, o SEC pode ser avaliado ao longo do tempo integrando o produto dos dados do fluxo de ar e a pressão instantânea dividida pela massa transportada, conforme mostrado na equação (4).

$$SEC = \left(\int_0^{\tau} P(\tau) \cdot Q(\tau) dt \right) / \Delta m(\tau) \quad (4)$$

O consumo específico, conforme se observa na **Figura 4**, apresenta um padrão oscilatório em torno de um valor médio que é determinado por ambos os parâmetros de entrada, que são a Pth e a restrição do fluxo de ar na entrada do sistema.

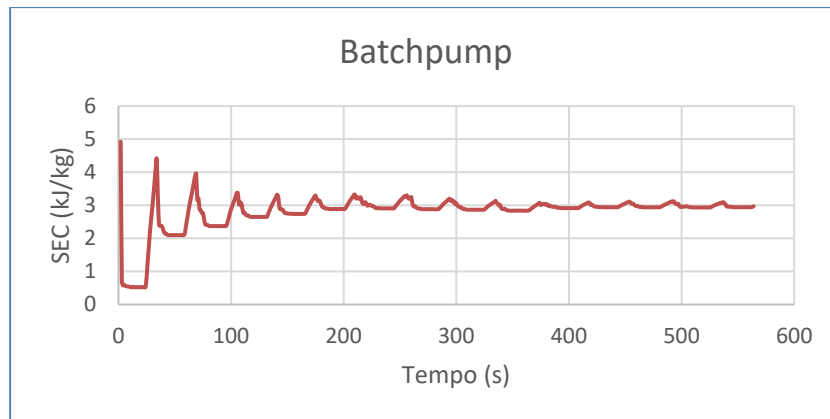


Figura 4. Consumo Específico de Energia em função do tempo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os primeiros resultados apresentados dizem respeito à dependência da vazão e pressão de transporte com os parâmetros de entrada, que são a pressão de fim de ciclo e a restrição de vazão de ar na entrada do sistema. O último parâmetro é controlado pelo fechamento da válvula globo na entrada do sistema, de modo que 0° indica a válvula totalmente aberta. Para uma fonte de pressão fixa de 4 bar, as figuras representam a relação entre a vazão normalizada de transporte (**Figura 5**) e a correlação entre a queda de pressão (**Figura 6**) com os parâmetros de entrada de Pth e restrição da vazão de ar.

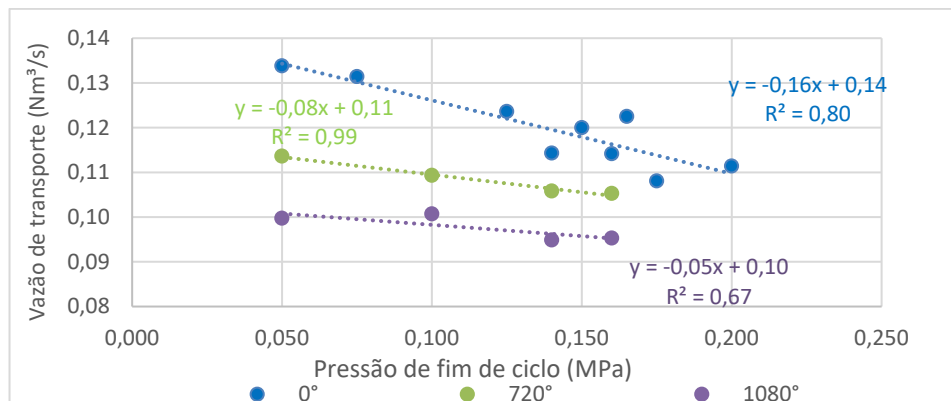


Figura 5. Vazão de transporte em função da Pth e da restrição do fluxo de ar.

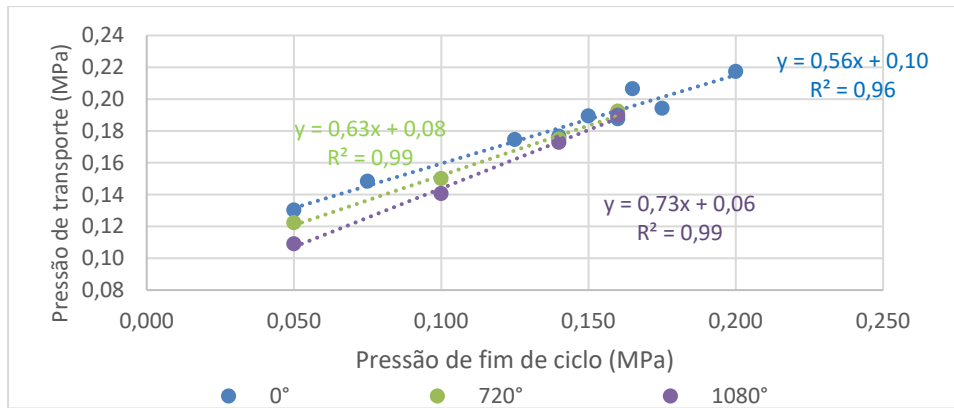


Figura 6. Pressão de transporte em função da Pth e da restrição do fluxo de ar.

Na maioria dos casos de aplicações de projeto industrial de transporte pneumático, observa-se que uma correlação direta entre o \dot{m} e o SEC com os parâmetros de entrada é muito mais útil, principalmente para quem está promovendo o ajuste fino do ponto de operação do sistema após sua instalação. Os resultados obtidos estão representados nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

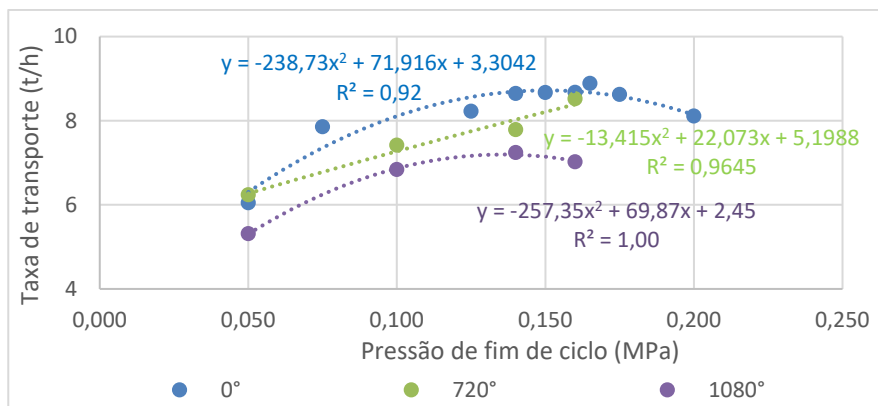


Figura 7. Pressão de transporte em função da Pth e da restrição do fluxo de ar.

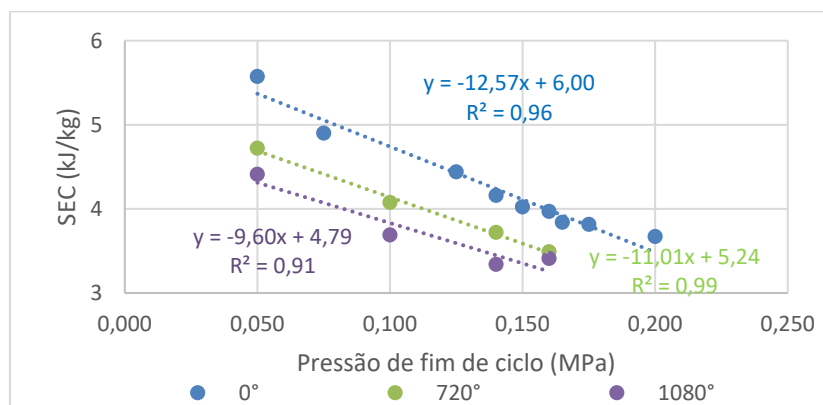


Figura 8. Consumo específico de energia em função da Pth e da restrição do fluxo de ar.

Pode-se fazer algumas considerações com base nos comportamentos observados e descritos pelas figuras de 5 a 8. No início de cada ciclo, o particulado é alimentado no dispositivo Batchpump até o seu nível máximo, portanto, um volume de aproximadamente 100 L. O ciclo de transporte sempre começa na condição de alta razão sólido-gás e, sob alta pressão e baixa velocidade, o calcário calcítico se comporta no modo fase densa fluidizada. Quando o Pth é baixo, significa que a tubulação está sendo limpa e o ar ainda está sendo injetado no sistema com uma alta velocidade, fazendo a transição do transporte para uma condição de fase diluída, resultando em uma baixa taxa de transporte e alto consumo de energia.

Quando o Pth é aumentado, o ciclo de transporte tende a começar e terminar com um alto valor de razão sólido-gás, isto é, há uma alta taxa de transporte para um baixo volume de ar utilizado, logo o consumo específico de energia é menor. O aumento da taxa de transporte com aumento de Pth é limitado: atinge um valor máximo e começa a decair, pois o transporte passa a ser interrompido em uma condição de alta razão sólido-gás. Por conta disto, o sistema leva mais tempo para transportar uma quantidade fixa de massa e, portanto, a taxa de transporte diminui. Além disso, se o Pth for muito alto, o dispositivo Batchpump não será completamente descarregado.

Um diagrama de Zenz experimental do sistema foi desenvolvido combinando **figuras de 4 a 8** [15,16]]. A taxa de transporte é diretamente representada como uma função do fluxo de ar e pressão de transporte. Um cálculo de mínimos quadrados linear foi usado para interpolar os pontos experimentais. O diagrama experimental de Zenz para calcário calcítico para o sistema é apresentado na **Figura 9**, a taxa de transporte em t/h é representada pela intensidade do mapa de cores e as curvas de iso mássica aparecem como linhas azuis.

Com o objetivo de destacar o consumo de energia como informação secundária que pode ser extraída do diagrama de Zenz, foram escolhidos 2 pontos de operação diferentes A e B com a mesma taxa de transporte. Conforme mencionado, as áreas dos retângulos tracejados correspondem ao consumo de energia em estado estacionário desses pontos operacionais [17,18]. Desta forma, para um mesmo \dot{m} , é possível ter melhor eficiência à medida que o processo se distancia da fase diluída e se aproxima do regime da fase densa, com baixo fluxo de ar, justificando a afirmação apresentada na introdução quanto à melhoria da eficiência energética na fase densa.

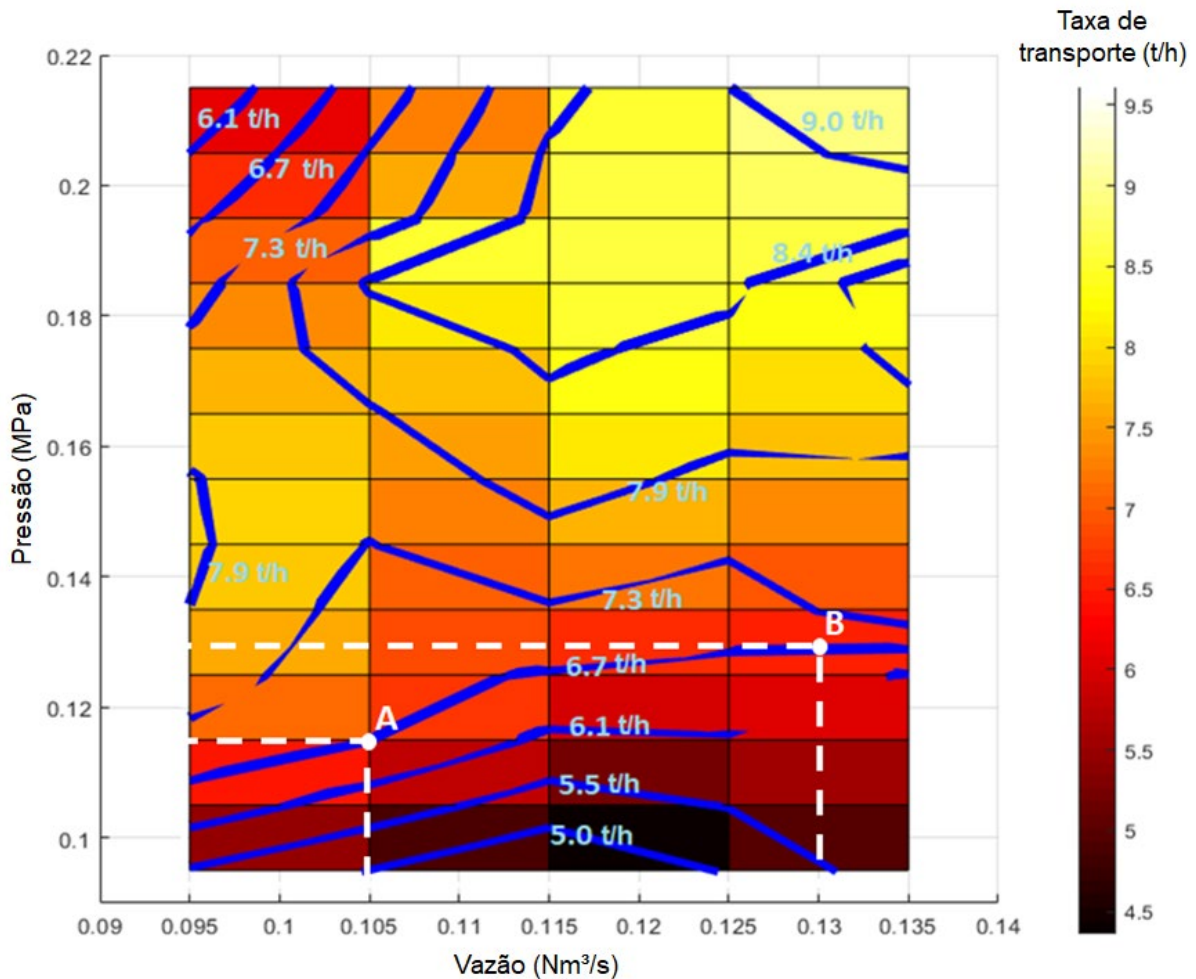


Figura 9. Diagrama de Zenz experimental [19].

Com base nas observações experimentais apresentadas, é possível propor um procedimento sistemático para parametrização do sistema de transporte pneumático. Considerando que a pressão de transporte não demonstra ser dependente da restrição do fluxo de ar de transporte, mas exibe uma correlação direta com P_{th} , este é o primeiro parâmetro que deve ser ajustado, ou seja, deve-se primeiro percorrer horizontalmente no diagrama de Zenz. Quando a pressão de transporte desejada é atingida, o fluxo de ar de entrada pode ser restringido para que seja possível mover-se verticalmente ao longo do diagrama. Desta forma, o ponto de operação desejado pode ser facilmente alcançado não só em termos de taxa de transporte, mas também em relação ao consumo de energia.

3. CONCLUSÃO

A metodologia descrita neste trabalho aplicada na parametrização de um sistema de transporte pneumático levou a resultados que puderam ser explicados de forma geral, não sendo necessário fazer considerações sobre o arranjo experimental do sistema. Condições reais como pressão máxima, queda de pressão da linha limpa e

características do material podem ser entendidas como constantes que deslocaram as curvas de \dot{m} , SEC, pressão de transporte e fluxo de ar apresentados nas **figuras de 5 a 8** ao longo de seus respectivos eixos, mas mantendo o comportamento geral desses parâmetros.

O método de otimização sistemática proposto neste trabalho permite operar um sistema com vaso de pressão compacto nas condições desejadas regulando apenas duas variáveis de entrada, demonstrando que o Batchpump não só é menor e mais barato que os vasos convencionais, como também é de fácil operação. A mesma metodologia pode ser aplicada a um sistema alimentado por vaso de pressão convencional com o objetivo de otimizar o equipamento, embora o ajuste dos parâmetros de entrada possa ser mais complexo, devido ao maior número de entradas de ar e válvulas necessárias para operação. Acredita-se que a aplicabilidade deste procedimento sistemático pode ser explorada e adaptada para diferentes dispositivos de alimentação, que são amplamente utilizados em sistemas de transporte pneumático.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processos: [140368/2018-3], [163815/2018-6] e [200716/2020-4], e ao Programa Erasmus+ pelos estágios de doutorado sanduíche no exterior. à Monash University, a Universidade de Bradford, a Universidade de São Paulo, e principalmente a Universidade Federal do ABC por meio do Programa de Doutorado Acadêmico em Indústria (DAI) e ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PGENE), pelo apoio que viabilizou este projeto, e a empresa Zeppelin Systems Latin America/Brasil por todos os estudos experimentais realizados em sua planta, e as visitas técnicas nas unidades do grupo Zeppelin em Nottingham/UK e sede Friedrichshafen/Alemanha.

REFERÊNCIAS

- [1] G.E. Klinzing, Historical review of pneumatic conveying, **KONA Powder Part. J.** 2018 (2018) 150–159. doi:[10.14356/kona.2018010](https://doi.org/10.14356/kona.2018010)
- [2] G.E. Klinzing, A review of pneumatic conveying status, advances and projections, **Powder Technol.**, 333 (2018) 78–90. doi:[10.1016/j.powtec.2018.04.012](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.012)
- [3] G. Setia, S.S. Mallick, R. Pan, P.W. Wypych, Modeling minimum transport boundary for fluidized dense-phase pneumatic conveying systems, **Powder Technol.**, 277 (2015) 244–251. doi:[10.1016/j.powtec.2015.02.050](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.02.050)
- [4] Freitas, A. G., Y. O. Lima, V. F. Oliveira, R. B. Santos, and L. A. M. Riascos. 2020. Inovação para um Sistemas Industrial: Interação Universidade-Indústria. **Brazilian Journal of Development** 6 (3):9665–78. doi:[10.34117/bjdv6n3-008](https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-008)
- [5] Freitas, A. G. d R. B. d Santos, Y. O Lima, and L. A. M Riascos. 2020. Interactions about Pneumatic Conveying Systems on the Characteristics of Calcitic limestone. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, 7 (2):256–60. doi:[10.22161/ijaers.72.34](https://doi.org/10.22161/ijaers.72.34)
- [6] Freitas, Adriano Gomes de; Santos, Ricardo Borges dos; Oliveira, Vitor Furlan de; Lima,

- Yuri Oliveira; Riascos, Luis Alberto Martinez. Eficiência Energética em um Alimentador de Sólidos Pressurizado para Transporte Pneumático , p. 101-112. In: **40° Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades**, São Paulo, 2019. doi:[10.5151/2594-3626-33719](https://doi.org/10.5151/2594-3626-33719)
- [7] A. G. Freitas, R. B. Santos, Y. O Lima, and L. A. M Riascos. 2020. Energy Efficiency in Pneumatic Conveying: Performance Analysis of an Alternative Blow Tank. **Particulate Science and Technology**, 8 (39): 1146–1160. doi:[10.1080/02726351.2020.1850574](https://doi.org/10.1080/02726351.2020.1850574)
- [8] F.A. Zenz, TWO-PHASE FLUID-SOLID FLOW, **Ind. Eng. Chem.**, Res. 41 (1949) 2801–2806. doi:[10.1021/ie50480a032](https://doi.org/10.1021/ie50480a032)
- [9] D. Mills, Pneumatic Conveying Design Guide, **Elsevier**, 2004.
- [10] M.G. Jones, K.C. Williams, Predicting the mode of flow in pneumatic conveying systems — A review, **Particuology**. 6 (2008) 289–300. doi:[10.1016/j.partic.2008.05.003](https://doi.org/10.1016/j.partic.2008.05.003)
- [11] D. Geldart, Types of Gas Fluidization, **Powder Technol.**, 7 (1973) 285–292. Powder Technology, 7 (1973) 285-292. doi:[10.1016/0032-5910\(73\)80037-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(73)80037-3)
- [12] T. Kano, Reduction of Power Consumption in Pneumatic Conveying of Granular Materials through a Pipeline, **KONA Powder Part. J.** 2 (1984) 24–34. doi:[10.14356/kona.1984007](https://doi.org/10.14356/kona.1984007)
- [13] E. Giacone, S. Mancò, Energy efficiency measurement in industrial processes, **Energy**. 38 (2012) 331–345. doi:[10.1016/j.energy.2011.11.054](https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.054)
- [14] G.E. Klinzing, F. Rikz, R. Marcus, L.S. Leung, Pneumatic Conveying of Solids, **Springer**, 2010. doi:[10.1007/978-90-481-3609-4](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3609-4)
- [15] Freitas, A. G., Lima, Y. O., de Oliveira, V. F., dos Santos, R. B., & Riascos, L. A. M. (2021). Batchpump: an Alternative to Conventional Blow Tanks. **Latin American Applied Research-An international journal**, 51(2), 107-112. doi:[10.52292/J.LAAR.2021.512](https://doi.org/10.52292/J.LAAR.2021.512)
- [16] Gomes de Freitas, Adriano; Borges Dos Santos, Ricardo ; Oliveira, Yuri ; Oliveira, Vitor ; Riascos, Luis Alberto . Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação: Batchpump, Um Novo Alimentador de Sólidos Industrial. In: Cobef 2019, São Carlos. **10º Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação**. São Carlos, SP, Brasil: Abcm, 2019. doi:[10.26678/ABCM.COBEF2019.COF2019-0063](https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEF2019.COF2019-0063)
- [17] A. G. De Freitas, R. B. Dos Santos, L. M. Pereira, Y. O. Lima and L. A. M. Riascos, "Parametrização de um novo alimentador de sólidos em função da eficiência energética," 2021 14th **IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, 2021, pp. 469-474, doi:[10.1109/INDUSCON51756.2021.9529775](https://doi.org/10.1109/INDUSCON51756.2021.9529775)
- [18] A. G. de Freitas, R. Borges dos Santos, L. M. Pereira, Y. O. Lima and L. A. M. Riascos, "Transporte pneumático de particulados – Otimização energética em um novo vaso de pressão," 2021 14th **IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, 2021, pp. 999-1004, doi:[10.1109/INDUSCON51756.2021.9529770](https://doi.org/10.1109/INDUSCON51756.2021.9529770)
- [19] Gomes de Freitas, A., Furlan Oliveira, V., Borges dos Santos, R., Riascos, L. A. M., and Zou, R. (July 28, 2022). "Optimization Method for Pneumatic Conveying

Parameters and Energy Consumption Performance Analysis of a Compact Blow Tank." ASME. **J. Pressure Vessel Technol.** doi:[10.1115/1.4055111](https://doi.org/10.1115/1.4055111)