

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM ALIMENTADOR DE SÓLIDOS PRESSURIZADO PARA TRANSPORTE PNEUMÁTICO*

Adriano Gomes de Freitas¹
Ricardo Borges dos Santos²
Vitor Furlan de Oliveira³
Yuri Oliveira Lima⁴
Luis Alberto Martinez Riascos⁵

Resumo

O presente trabalho, resultante da parceria público-privada entre a empresa Zeppelin Systems Latin America e a Universidade Federal do ABC, tem por objetivo validar o desempenho em termos de taxa de transporte e consumo energético de um vaso de pressão não convencional, o equipamento atua como alimentador de sólidos industrial para transporte pneumático, desenvolvido para operação de transporte de materiais em fase densa. Calcário é usado como material de deslocamento durante os ensaios no Centro de Testes da empresa, foi verificado que o novo injetor pressurizado tem menores dimensões e complexidade de operação, e possui taxa de transporte e consumo específico efetivo equiparáveis às versões de vasos de pressão convencional.

Palavras-chave: Eficiência Energética; Transporte pneumático; Alimentador de sólidos; Inovação.

ENERGY EFFICIENCY OF AN INDUSTRIAL PRESSURIZED SOLIDS FEEDER FOR PNEUMATIC TRANSPORT

Abstract

This project resulting from the collaboration between the company Zeppelin Systems Latin America and the Federal University of ABC aims to evaluate the performance in terms of rate of transport rate and energy consumption of a non-conventional pressure vessel which is a type of solids feeder for pneumatic conveyance developed by the company to operate in dense phase regimen. By means of pneumatic conveyance of calcitic limestone performed at the company's Test Center, it was verified that the new pressure vessel has a specific transport and specific consumption rate comparable to the traditional versions of the equipment.

Keywords: Energy efficiency; Pneumatic transport; Solids feeder; Innovation.

¹ Engenheiro de Gestão, Mestre em Engenharia e Gestão da Inovação, Doutorando em Energia, Universidade Federal do ABC - UFABC, Santo André, SP, Brasil.

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

³ Bacharel em Ciência e Tecnologia, Graduando em Engenharia de Controle e Automação, UFABC, Santo André, SP, Brasil.

⁴ Engenheiro de Energia, Mestrando em Energia, UFABC, Santo André, SP, Brasil.

⁵ Engenheiro, Mestre e Doutor em Engenharia Mecânica, Professor associado na UFABC, Santo André, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os chamados estudos CTS (ciência, tecnologia e sociedade) demonstram que, historicamente, a evolução das sociedades é fortemente influenciada pelo aperfeiçoamento da ciência/tecnologia e vice-versa. Além disso, Palacios et al [1] mostra que esta área do conhecimento ressalta também que o desenvolvimento das sociedades sempre esteve atrelado ao crescimento na demanda energética. Por esta razão, esforços na busca por fontes alternativas e na otimização no consumo energético se fazem necessários para que seja possível alcançar o desenvolvimento sustentável e contínuo das sociedades, como explica Viana et al [2].

Com relação à demanda energética mencionada, Saidur et al [3] afirma que, em 2009, cerca de 10% da energia elétrica consumida por indústrias na União Europeia foi destinada à produção de gás comprimido, utilizado na maioria das instalações industriais para processos de fabricação. Segundo uma apresentação feita pela empresa *Atlas Copco* em 2014, esta fração no Brasil pode chegar até 40%. Como exemplo de processo extremamente importante e difundido que requer a utilização de gás pressurizado, tem-se o transporte pneumático de materiais, cuja utilização em território nacional é reportada há mais de 50 anos por empresas como *Mikropul-Ducon* e *Johannes Möller do Brasil*, como apresenta Gomes [4].

Ray [5] e Ribeiro [6] apresentam um sistema de transporte pneumático como tendo a função de deslocar um material particulado, usualmente pó, grãos ou flocos, através de uma tubulação na qual é inserido um fluxo de gás pressurizado, que promove um gradiente de pressão entre extremidades da mesma e, conseqüentemente, a movimentação do material. Segundo Klinzing [7] e Freitas et al [8], as características do transporte são determinadas sobretudo pelas propriedades do material a ser manipulado, pela disposição física do sistema e pelos componentes periféricos (silos, moegas, roscas e etc.).

Os regimes de operação dos sistemas podem ser divididos em fase densa, semi-densa e diluída, de modo que um quarto modo, o instável, pode ser identificado na transição entre as duas primeiras. Esta classificação leva em conta a pressão de operação e a velocidade terminal do gás injetado. Para o transporte de materiais abrasivos, como é o caso deste projeto, recomenda-se utilizar o regime de fase densa, por promover a redução da degradação da tubulação por conta do atrito do material com as paredes da mesma.

Neste trabalho, resultante da cooperação entre a empresa *Zeppelin Systems Latin America (ZSLA)* e a Universidade Federal do ABC (UFABC), estuda-se o desempenho em termos de eficiência energética e taxa de transporte de um sistema pneumático que dispõe de um alimentador de sólidos não convencional desenvolvido pela empresa e nomeado *Batchpump*. O objetivo deste projeto consiste em encontrar o ponto de operação ótimo do sistema, a fim de validar a hipótese que este novo produto possui capacidade de transporte e consumo comparáveis aos de um vaso de pressão comum.

2 DESENVOLVIMENTO

Os procedimentos experimentais deste projeto foram realizados no Centro de Testes Hans-Dieter Zamburek da empresa *Zeppelin Systems*. As instalações deste espaço reproduzem, em dimensões reais, um sistema de transporte pneumático industrial. Trabalhando em regime cíclico e de fase densa, estudou-se o desempenho do sistema em transportar calcário calcítico, material utilizado largamente pelo setor

agrícola para controle de pH e estabilização do solo; em construção civil; mineração e etc.

A alimentação de material na linha de transporte e consecutiva injeção de ar pressurizado para deslocamento do mesmo foi feita por meio do vaso de pressão Batchpump. Este equipamento, com dimensões reduzidas em relação aos vasos de pressão tradicionais, foi desenvolvido pela empresa para atuar no transporte pneumático em fase densa, que requer a aplicação de gás em alta pressão e baixa velocidade no transporte, o que se torna inviável para alimentadores pressurizados comuns, tipicamente com capacidade de armazenar algumas centenas de litros de material.

Além do Batchpump, o sistema pneumático disponível no centro de testes é composto por duas moegas para armazenamento do material, sendo que uma delas (MG-02) é posicionada exatamente acima do Batchpump para alimentação do mesmo por gravidade e a outra (MG-04) mais distante, que recebe material a saída da linha de transporte e é dotada de um filtro de mangas para purificação do ar a ser liberado. Uma rosca transportadora executa o transporte de material entre as moegas. O escoamento do material das moegas é controlado por duas válvulas guilhotina pneumáticas e uma válvula guilhotina manual adicional na moega MG-04. Estes dispositivos cessam o transporte caso a quantidade de material (medida por meio de três células de carga na moega MG-04) nas moegas é inferior à requerida para operação.

Duas válvulas borboletas fazem a dosagem de material no Batchpump e uma válvula borboleta controla a entrada de ar no alimentador pressurizado. Além disso, uma válvula globo controla a vazão deste fluxo ar, cujo valor, em m^3/s , é aferido por um medidor de vazão volumétrica. Por fim, o sistema dispõe de uma tubulação *standard* de 3" e cerca de 130m, possuindo diferença de cota de 5m entre as moegas. Com relação ao monitoramento dos parâmetros deste sistema, utilizou-se um medidor de vazão, dois transmissores de pressão, além de um CLP, IHM e *software* supervisor. A representação simplificada do sistema é apresentada na figura 1.

O ciclo de transporte inicia com o transporte do material da moega MG-04 até a MG-02 por meio da rosca transportadora. Com a abertura das válvulas borboletas de dosagem durante um tempo pré-estabelecido, o Batchpump é alimentado e a válvula que controla a entrada de ar pressurizado na linha de transporte é então aberta, causando o deslocamento do material ao longo da tubulação e permitindo a expansão do gás dentro desta, o que causa a diminuição da pressão na linha.

Quando um valor mínimo de pressão pré-determinado é atingido, o transporte cessa temporariamente por meio do fechamento da válvula de controle de entrada de ar e as válvulas de dosagem são abertas, fazendo com que o vaso de pressão seja novamente alimentado. Por meio desta descrição, é possível deduzir que o sistema opera de maneira intermitente, também conhecida como regime de bateladas.

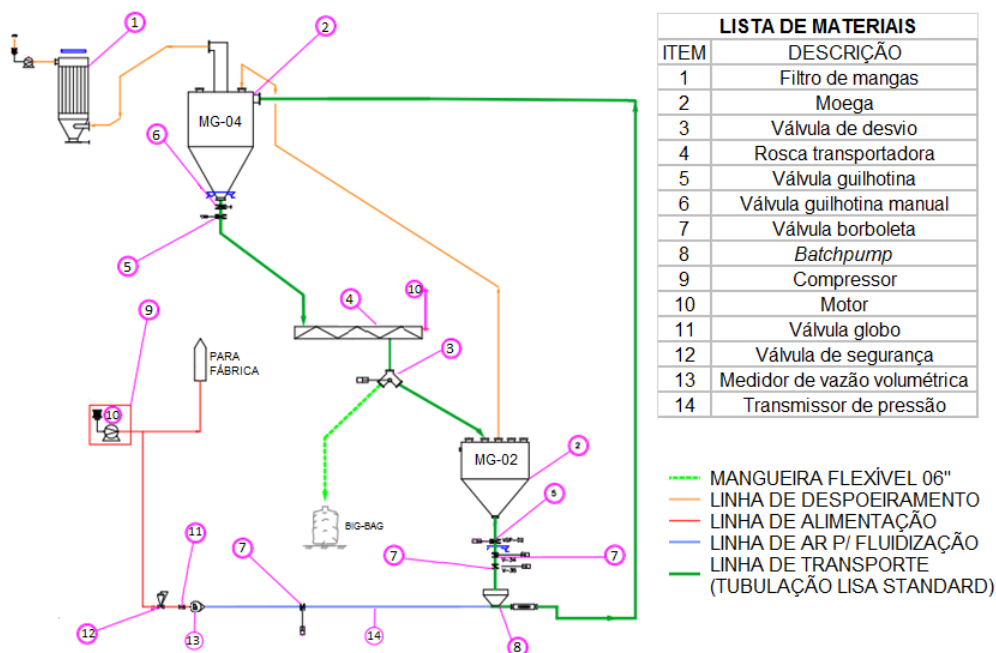


Figura 1. Layout simplificado do sistema de transporte pneumático.

Feita a apresentação do *layout* e do ciclo, deve-se fazer a seguinte consideração: a dosagem de material no Batchpump é controlada por tempo e não por verificação da quantidade de material depositada no mesmo, pois testes previamente realizados utilizando chaves de nível não resultaram em sucesso, pois tais sensores indicavam falso positivo em diversas situações. Para obter o tempo de dosagem ótimo, foram realizados testes variando tal parâmetro e monitorando variáveis de saída relevantes para tal análise.

Como segundo adendo, destaca-se o controle do transporte em malha fechada, por monitoramento da pressão na linha. Tal escolha é justificada pelo fato de que a modelagem do comportamento do material dentro da linha de transporte não é um trabalho trivial a ser feito e o controle do sistema em malha aberta torna inviável a otimização do processo. Testes preliminares foram realizados controlando apenas o tempo durante o qual gás pressurizado era injetado no vaso. Sem a possibilidade de realizar uma estimativa confiável da quantidade e distribuição de material contida ao longo do sistema de transporte, uma série de entupimentos e consequente pressurização reversa ocasionou rompimento da tubulação em diversos pontos.

Para análise do desempenho do vaso de pressão Batchpump e do sistema como um todo, foram controladas as variáveis de *setup* do sistema de transporte pneumático e, monitorando seus parâmetros de saída, foi possível obter empiricamente a região de operação ótima, que corresponde à máxima taxa de transporte com mínimo consumo de energia possível.

2.1 Definição de variáveis

Neste trabalho, as variáveis de entrada que regem a dinâmica do sistema de transporte pneumático foram escolhidas como sendo: pressão de fim de ciclo; restrição de vazão; e pressão máxima de operação. Deve-se entender por pressão de fim de ciclo aquela que, quando atingida, o transporte é temporariamente cessado para que ocorra a dosagem de material no Batchpump, como foi descrito na subseção anterior. Pressão máxima de operação é aquela em que o transporte se inicia, ou seja, corresponde à pressão em que o ar é fornecido ao sistema. Por fim, a

restrição de vazão é dada pelo número de voltas em uma válvula globo para que controle o fluxo de ar que entra no sistema.

As variáveis de saída utilizadas como base para avaliação do desempenho do Batchpump e do sistema como um todo foram: pressão de transporte; vazão de ar pressurizado injetado (posteriormente corrigida para vazão em descarga livre); massa transportada; além de sinais elétricos para as válvulas guilhotina. Todas estas variáveis foram mapeadas em uma base de tempo e através delas foi possível definir os indicadores de desempenho do sistema pneumático. São eles:

Taxa de transporte (\dot{m}): Quantidade total em toneladas de massa (M_T) transportada em pelo sistema durante o intervalo de tempo avaliado (Δt) em horas. Em termos matemáticos, é dada pela equação (1) abaixo apresentada:

$$\dot{m} = \frac{M_T}{\Delta t} \quad (1)$$

Consumo específico efetivo (CEE): Ao avaliar a eficiência de motores à combustão, o chamado rendimento efetivo corresponde à potência mecânica gerada, em kW, pela combustão do combustível durante um intervalo de tempo. É dado em unidades de massa de combustível por energia gerada e corresponde ao inverso do consumo específico efetivo, mais comumente utilizado. Nesta pesquisa, tem-se o oposto: o rendimento efetivo fornece a quantidade em quilogramas de material transportada para 1 kJ de energia mecânica fornecida ao sistema. Seu cálculo é feito por meio da expressão (2):

$$\eta_{ef} = \sum_{t=t_0}^{t_f} \frac{3.6M_T \times 10^9}{\Delta P_t Q_t} \quad (2)$$

Neste caso, ΔP_t corresponde ao gradiente de pressão (em bar) entre a entrada da linha de transporte e sua saída (exposta à pressão atmosférica) no instante de tempo t ; Q_t corresponde à vazão em descarga livre em m³/s do fluxo de ar injetado calculada no instante de tempo correspondente. A relação entre a vazão volumétrica aferida pelo sensor utilizado e a vazão em descarga livre é dada pela expressão 3:

$$Q = \frac{Q_{FL02}(P_{atm} + P_{PT01})}{1013.25} \quad (3)$$

Em que Q_{FL02} é o valor de vazão volumétrica aferida com o sensor utilizado (o qual é identificado por FL02), P_{atm} é a pressão atmosférica e P_{PT01} é a pressão aferida através do transmissor de pressão (identificado por P_{PT01}). Uma vez que o consumo específico efetivo é o inverso do rendimento efetivo, o ideal é que este parâmetro seja tão baixo quanto possível. É dado em kJ/kg e é definido como:

$$CEE = \sum_{t=t_0}^{t_f} \frac{\Delta P_t Q_t}{3.6M_T \times 10^9} \quad (4)$$

2.2 Caracterização do material e fase de transporte

Como foi dito na introdução, a caracterização do material é de extrema importância para o projeto de um sistema de transporte pneumático. As primeiras propriedades a serem levadas em conta nesta etapa são o tamanho e formato das partículas. Estas características podem ser dinâmicas caso o material seja friável, isto é, que devido às colisões que ocorrem entre as próprias partículas e com os componentes do sistema de transporte, o material pode ser degradado, quebrado em partículas

menores e com formato diferente do original. A tabela 1 apresenta diferentes aplicações do calcário dependendo do tamanho médio dos seus grãos.

Tabela 1. Aplicações do calcário para diferentes tamanhos dos grânulos

Tamanho dos grânulos	Aplicações
40 – 100 mm	Fornos de cimento e alguns fornos de aço
11 – 22 mm	Indústria civil e pavimentação de estradas
6,0 – 10 mm	Misturas e blocos de concreto
1,5 – 4,0 mm	Tratamento de água e filtração
0,1 – 1,5 mm	Indústria de vidro, cerâmica, química e de construção
100 µm	Agricultura, aditivo para indústria de petróleo e gás
45 µm	Tintas, fibra de vidro, mineração

The Limestone Processing Handbook (2018) [9].

Além de características das partículas, Klinzing [7], Anantharaman et al [10] e Ganesan [11] afirmam que as propriedades do *bulk*, ou seja, do material como um todo, suas características volumétricas devem ser estudadas. Nesta etapa, deve-se avaliar parâmetros de densidade, composição da mistura (no caso do material ser composto de mais de uma substância), umidade própria e a capacidade de remover umidade do ambiente, tendência à compactação e etc.

Por meio dos parâmetros em questão, pode-se enquadrar o material em um dos chamados grupos de Geldart [12] e assim obter o correspondente tipo de fluidização que o material assume quando é submetido à um fluxo de gás pressurizado. Demais particularidades do material devem ser levadas em conta no projeto do sistema de transporte, como temperatura de fusão; toxicidade; capacidade de adquirir cargas eletrostáticas; abrasividade e etc. Todas estas propriedades requerem cuidados especiais a ser tomados durante o transporte.

Através da caracterização descrita, determina-se a fase em que o transporte deve ocorrer a fim de preservar tanto o material a ser transportado quanto as instalações físicas do sistema. Como mencionado na seção anterior, o regime de operação do transporte pode ser classificado como de fase diluída, semi-densa ou densa.

Na figura 2 é apresentado o diagrama de fases de transporte que permite associá-las à pressão de operação e velocidade terminal do gás. Recomenda-se notar que, em fase diluída, tem-se alta velocidade do gás e baixa pressão de operação, totalmente o inverso da fase densa. Já o modo de operação em fase-semi densa é desenvolvido sob velocidade terminal do gás e pressão intermediária. Segue abaixo a descrição destes três modos de operação, que são ilustrados ao lado do diagrama de fases na figura 2.

- Fase diluída: recomendado para materiais de baixa abrasividade, sobretudo os que se enquadram nos grupos A e B de Geldart. Neste modo de operação, o material é transportado em suspensão no fluxo de gás devido à suspensão ou sopro, análogo a uma diluição, como a própria designação sugere.
- Fase semi-densa: Consiste em uma situação intermediária entre as fases diluída e densa. Uma fração do material é depositada na tubulação (o que não significa que esta não será transportada) e a porção restante fica suspensa no fluxo de ar. Permite o transporte em velocidade reduzida em relação ao regime anterior, oferecendo assim menos danos ao material e à tubulação, sendo aplicada geralmente em pó seco e abrasivo.

- Fase densa: Aplicada geralmente na manipulação de materiais erosivos, combustíveis, friáveis e que adquirem facilmente cargas eletrostáticas, este modo de operação é caracterizado por transportar o material em formato de dunas dentro da tubulação ou preenchendo-a totalmente em algumas seções separadas por um *gap* de ar.

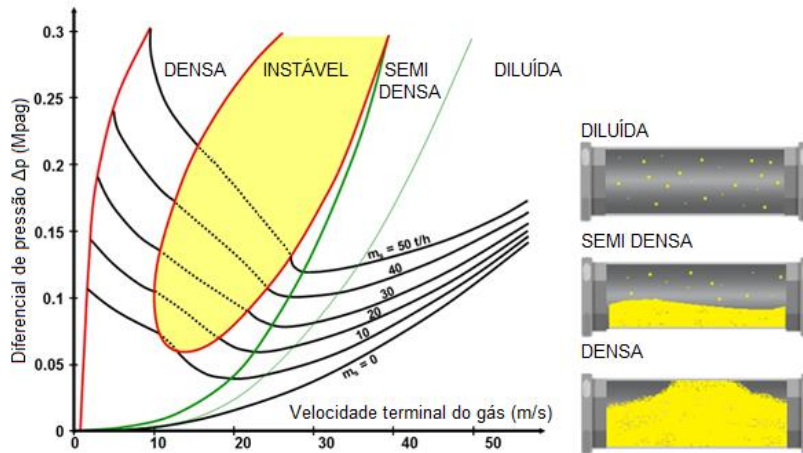


Figura 2. Diagrama de fases de transporte pneumático.

Neste trabalho, para realização dos testes foi utilizado calcário calcítico. Este material consiste em um composto de minérios que apresenta abrasividade consideravelmente alta, o que é um indicativo para a fase em que deve ser transportado. Além disso, apesar do calcário calcítico não ser composto por uma variedade de componentes, o que o torna menos susceptível a formar aglomerados, apresenta coesividade alta e que, segundo Lumay et al [13] e Diederich et al [14], uma parcela desta pode ser atribuída à presença de cargas eletrostáticas. As razões apresentadas justificam a escolha do uso do material calcário para testes de transporte em fase densa, regime no qual o Batchpump foi projetado para operar. Ademais, foram feitas análises da composição do material em termos de granulometria, densidade aparente e ângulo de repouso, que permitem estimar o impacto causado pelo transporte. Para o primeiro estudo, utilizou-se um conjunto de seis peneiras de diferentes aberturas submetidas à agitação e, quantificando o material retido em cada uma das peneiras, determina-se a distribuição do tamanho das partículas que constituem a amostra utilizada. Para obtenção da densidade aparente, um cilindro de volume conhecido foi preenchido pelo material sem que houvesse compactação do mesmo e então foi aferida a massa de calcário necessária para preencher o recipiente. Este estudo é particularmente importante para o projeto de equipamentos de armazenamento de materiais, como silos. Por fim, para obtenção do ângulo de repouso, o cilindro utilizado no procedimento de análise de densidade aparente foi novamente preenchido com o material e, suspendendo lentamente o cilindro, foi possível observar a deposição do calcário em formato de cone, cujo ângulo em relação à superfície foi aferido por meio de um goniômetro e é denominado ângulo de repouso. Os testes foram realizados antes e depois do transporte e uma comparação é apresentada na próxima subseção.

2.3 Resultados

Conforme foi apresentado na seção anterior, os indicadores escolhidos para análise e otimização da eficiência energética do sistema pneumático em questão consistem

nos indicadores de desempenho rendimento efetivo e taxa de transporte. Estes parâmetros são inicialmente apresentados nas figuras 3 a 6 como funções de duas variáveis de entrada, sendo elas pressão de fim de ciclo e restrição de vazão. Como os testes foram realizados com poucos graus de liberdade para a segunda variável de entrada, os indicadores de desempenho são apresentados em função da pressão de fim de ciclo e parametrizados pela restrição de vazão, dada pelo número de voltas na válvula globo. Ajustes do tipo $f(x) = ax^2 + bx + c$ foram inseridas para obtenção de uma modelagem empírica do sistema. As figuras 3 e 4 ilustram os resultados obtidos.

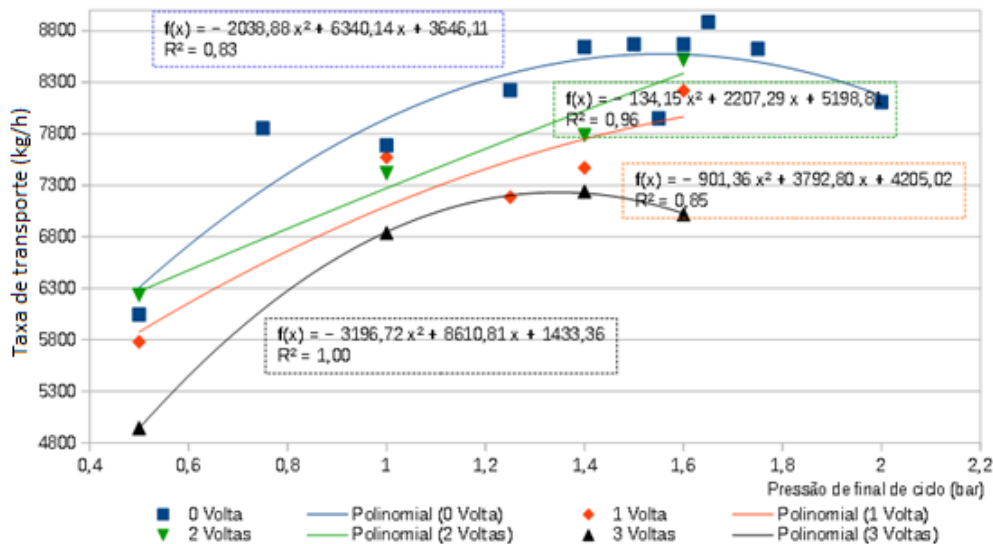


Figura 3. Curvas de taxa de transporte em função da pressão fim de ciclo e parametrizadas pela restrição de vazão.

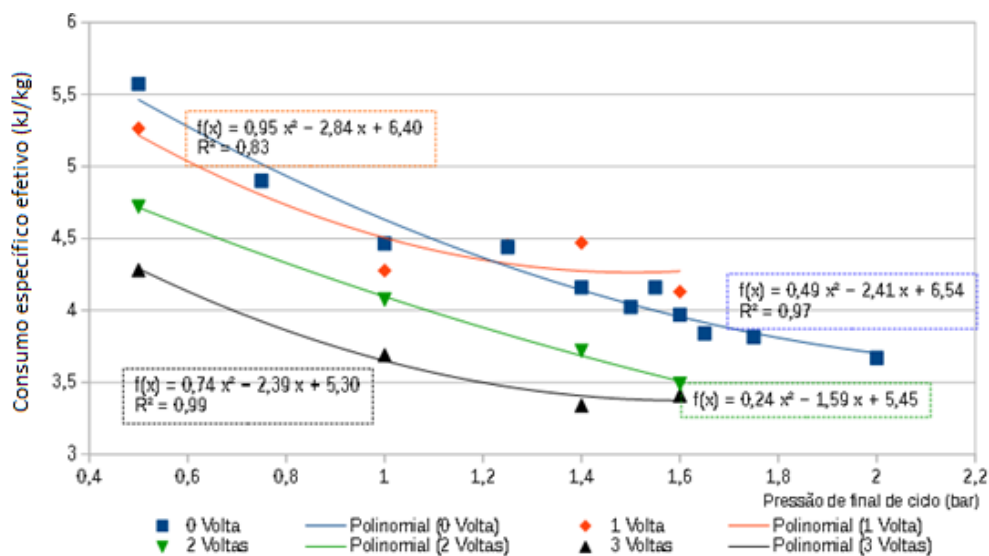


Figura 4. Curvas de consumo específico efetivo em função da pressão fim de ciclo e parametrizadas pela restrição de vazão

Considerando que os melhores resultados de taxa de transporte foram obtidos na situação em que não havia restrição de vazão por parte da válvula globo, utilizou-se esta configuração para avaliar o comportamento dos indicadores de desempenho em função da pressão de fim de ciclo e pressão máxima de operação, como pode ser visto nas figuras 5 e 6.

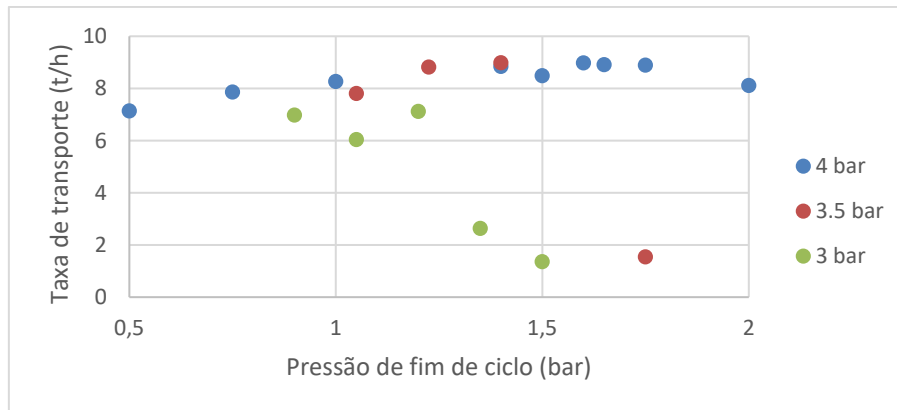


Figura 5. Representação tridimensional da taxa de transporte em função da pressão de fim de ciclo e da máxima de operação.

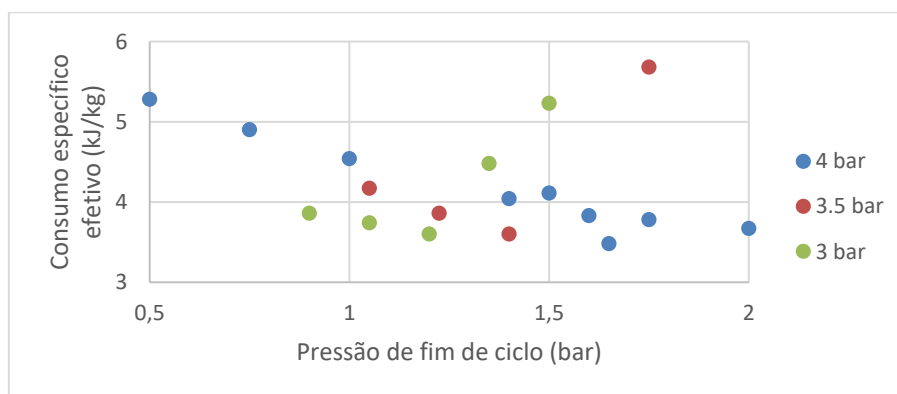


Figura 6. Representação tridimensional do consumo específico efetivo em função da pressão de fim de ciclo e da máxima de operação.

Nota-se que, para pontos comuns de operação dos gráficos 3 e 5, 4 e 6, obtém-se valores correspondentes de taxa de transporte e consumo específico. Além disso, é possível analisar o grau de influência dos parâmetros de entrada nos indicadores de desempenho. Esta discussão é melhor detalhada na seção seguinte. Com a finalidade de apresentar uma descrição gráfica do ciclo de transporte e assegurar a estabilidade do mesmo, a figura 7 ilustra a evolução temporal dos indicadores de desempenho.

Destes dados, foi executada uma análise estatística dos dados por meio de teste F, que relaciona a variância dos parâmetros de desempenho com diferentes meios de tratamento, que no caso correspondem à três diferentes valores de pressão de fim de ciclo, sendo estas 1,65; 1,75 e 2 bar, mantendo a pressão da fonte em 4 bar e sem restrição de vazão por meio da válvula globo. Foram obtidos dez valores de taxa de transporte para cada meio de tratamento e, a partir destes, foram calculados o quadrado médio dos meios de tratamento ($QM_{trat.}$) e ao mesmo parâmetro, mas para os desvios ($QM_{res.}$). Como resultado desta avaliação estatística, obteve-se o valor de F de 421,03, calculado através da expressão 5. A discussão acerca deste valor é apresentada na seção seguinte.

$$F = \frac{QM_{trat.}}{QM_{res.}} \quad (5)$$

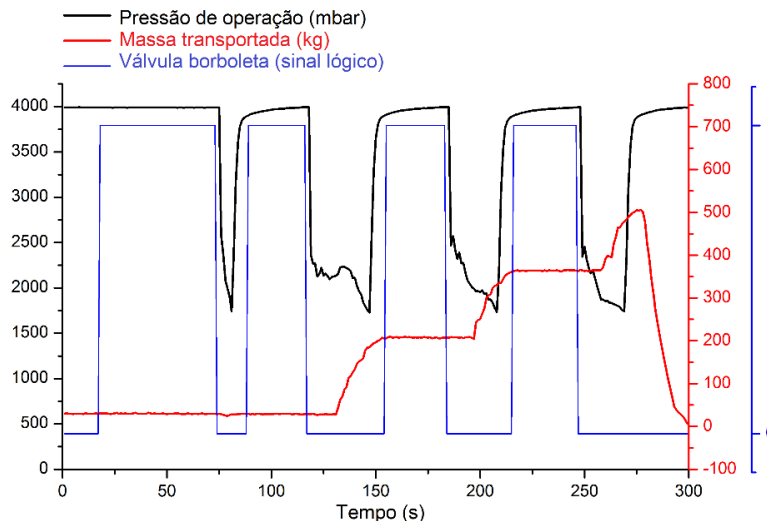


Figura 7. Evolução temporal do ciclo de transporte pneumático.

Por meio dos procedimentos descritos na metodologia, foi avaliado o efeito do transporte pneumático nas características do material. A comparação entre as propriedades ângulo de repouso, densidade, diâmetro efetivo e máximo, coeficiente de não uniformidade e módulo de finura são ilustrados na tabela 2.

Tabela 2. Comparação das propriedades do calcário antes e depois do transporte

Propriedade	Antes	Depois
Ângulo de repouso	44 °	45 °
Densidade	970 kg/m ³	757 kg/m ³
Diâmetro efetivo	42 µm	39 µm
Coeficiente de não uniformidade	2,14	3,07
Módulo de finura	0,05147	0,03500

2.4 Discussão

Como pode ser visto pelas figuras 3 e 5, a taxa de transporte do sistema alimentado pelo Batchpump pode atingir valores comparáveis aos de um vaso de pressão tradicional. Evidencia-se que, operando a 4 bar de pressão e sem restrição de vazão, o sistema opera transportando 9 toneladas de material por hora na implementação realizada, um resultado satisfatório frente à taxa de transporte média de um vaso convencional, que pode chegar a 11 toneladas por hora.

Por meio dos gráficos 4 e 6, observa-se também que, conforme a taxa de transporte decresce (regiões em que a pressão de fim de ciclo é inferior à ótima), o consumo específico efetivo aumenta. Esta relação pode ser justificada pelo seguinte raciocínio: quando a pressão fim de ciclo é ajustada para um valor inferior ao ponto de operação ótimo, significa que a linha de transporte já não está com uma quantidade de material suficiente e o sistema tende a operar em uma fase mais diluída. Nesta situação, o ar injetado não promove o transporte da maior quantidade possível de material. Em outras palavras, para uma dada quantidade de energia, a quantidade de massa transportada é inferior a massa que seria transportada em fase mais densa. Desta maneira, o consumo específico aumenta.

O mesmo ocorre quando a pressão de fim de ciclo é superior à ótima: nesta situação, o sistema cessa o transporte antes do momento ideal, fazendo com que ainda haja uma quantidade elevada de material na linha. Isto faz com que durante uma fração do tempo não ocorra transporte, consistindo no que pode ser chamado

“tempo morto”, o que reduz a taxa de transporte e promove inclusive entupimentos na linha, como se observa pelo decréscimo nas curvas da figura 3 após atingirem um ponto de máximo.

Por fim, o teste F fornece uma comparação entre a variância da resposta de um sistema para diferentes meios de tratamento e considerando os resíduos. Promovendo esta análise, pode-se concluir que a diferenciação dos parâmetros de saída é efetivamente associada ao meio de tratamento (pressão de fim de ciclo) e não aos resíduos. Como o valor obtido é superior à 1 e ao tabelado (tabela de Fisher-Snedecor), conclui-se que é possível a realização de um ajuste fino dos indicativos de desempenho do sistema, ou seja, do seu ponto de operação.

Na tabela 3 é apresentada uma comparação entre o Batchpump e um vaso de pressão convencional, com transportes similares (de 9 a 11t/h) em que são ressaltadas as principais características tidas como base para escolha do equipamento a ser utilizado no projeto do sistema de transporte industrial. A redução no tamanho do vaso não só consiste em uma vantagem por si só, mas também implica na quantidade de matéria prima utilizada em sua fabricação. Esta implicância, associada à redução do número de atuadores (válvulas) necessários para operação do *Batchpump*, faz com que o custo inicial para aquisição e implementação, ou seja, o CAPEX do *Batchpump* seja menor.

Devido ao tamanho reduzido do *Batchpump* e ao seu modo de operação, o sistema de transporte atinge sua pressão de fim de ciclo mais rápido do que aqueles que são alimentados por vasos convencionais. Sendo assim, as válvulas de alimentação do vaso e de entrada de ar no sistema comutam mais vezes do que quando são utilizados vasos tradicionais, o que acarreta no desgaste mais rápido destes atuadores, aumentando a princípio o OPEX. Entretanto, o transporte em fase densa, mais adequado para ser executado utilizando o *Batchpump*, promove menor desgaste da tubulação, o que acarreta na redução dos seus custos de manutenção. Esta economia, associada à redução dos custos iniciais e do tamanho do Batchpump, bem como à sua simplicidade de instalação e operação, promovem a viabilidade do novo vaso de pressão.

Tabela 3. Comparação entre o Batchpump e um vaso de pressão convencional

Propriedade	Batchpump	Vaso convencional
Altura	1,5 m	3,3 m
Automação	Simple	Complexa
Setup/ operação	Simple	Complexo
Taxa de transporte	9 t/ h	11 t/ h
Capex	Reduzido	Elevado
Opex	Elevado	Reduzido
Custo avaliado para aquisição	R\$ 7.500,00	R\$ 22.500,00

3 CONCLUSÃO

Por meio da metodologia implementada para execução dos testes, pode-se observar nas duas subseções anteriores que é possível controlar o desempenho do sistema de transporte pneumático alimentado pelo Batchpump mediante o controle de duas das três variáveis de entrada apresentadas. Pelas figuras 3 e 4, é demonstrada a viabilidade de maximização da taxa de transporte e redução do consumo específico efetivo na região entre 1,65 e 2 bar de pressão de fim de ciclo, sem restrições da válvula globo. Já nas figuras 5 e 6, mostra-se a possibilidade de operação na região

ótima controlando a pressão da fonte e pressão mínima de operação. Desta maneira, exemplifica-se a simplicidade de automação, *setup* e operação mencionadas na tabela 3. Por meio da mesma tabela, destaca-se demais vantagens do Batchpump em relação aos vasos convencionais que justificam sua implementação para transporte pneumático em fase densa.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo 163815/2018-6), à Universidade Federal do ABC e à Zeppelin Systems Latin America, ao programa de Doutorado Acadêmico Industrial e ao Programa de Pós-graduação em Energia pelo suporte garantido durante o presente projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 Palacios EMG, Galbarte JCG, Bazzo, W. Introdução aos estudos CTS (Ciencia, Tecnología e Sociedad). Organización de Estados Iberoamericanos (OEI), 2005.
- 2 Viana ANC, Bortoni EDC, Nogueira FJH, Haddad J, Nogueira LAH, Venturini OJ, Yamachita RA. Eficiência Energética- Fundamentos e Aplicações. Campinas: FUPAI; 2012.
- 3 Saidur R, Rahim NA, Hasanuzzman M. A review on compressed-air energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14 (4): 1135-1153.
- 4 Gomes, LM. Contribuição à análise do transporte pneumático em fase diluída. Tese de Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais. 2011. 169 f. UFPA, Belém.
- 5 Ray EPPS. Pneumatic delivery system with braking. U.S. Patent n. 8,500,373, 6 ago. 2013.
- 6 Ribeiro DS. Transporte Pneumático – Tecnologia, projetos e aplicações na indústria e nos serviços. São Paulo: Artliber; 2005.
- 7 Klinzing GE. A review of pneumatic conveying status, advances and projections. *Powder technology*. 2018, 333: 78-90.
- 8 Freitas AG, Santos RB, Lima YO, Oliveira VF e Riascos LAM. “Energy efficiency in the development of an innovative industrial pressurized solids feeder for pneumatic conveying systems”, *International Journal of Development Research*, 2019, 09 (04): 27147-27152.
- 9 Feeco International, The Limestone Processing Handbook. FEECO Material Processing Series. 2018 [acesso em 03 de junho de 2019]. Disponível em: http://go.feeco.com/acton/attachment/12345/f-00a3/1/-/Library/Caches/Adobe%20InDesign/Version%208.0/en_US/InDesign%20ClipboardScrap1.pdf
- 10 Anantharaman A, Cahyadi A, Hadinoto K, Chew JW. Impact of particle diameter, density and sphericity on minimum pickup velocity of binary mixtures in gas-solid pneumatic conveying. 2016; *Powder technology*, 297: 311-319.
- 11 Ganesan V, Rosentrater KA, Muthukumarappan K. Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders—a review with implications for DDGS. 2008; *biosystems engineering*, 101(4): 425-435.
- 12 D. Geldart, “Types of Gas Fluidization”, *Powder Technology*; 1973; vol. 7, p. 285–292.
- 13 Lumay G, Boschini F, Traina K, Bontempi S, Remy, JC, Cloots R, Vandewalle N. Measuring the flowing properties of powders and grains. *Powder Technology*. 2012; 224: 19-27.
- 14 Diederich P, Mouret M, De Ryck A, Ponchon F, Escadeillas G. The nature of limestone filler and self-consolidating feasibility—relationships between physical, chemical and mineralogical properties of fillers and the flow at different states, from powder to cement-based suspension. *Powder technology*. 2012; 218: 90-101.