



ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA E APLICAÇÃO NUMÉRICA SIMPLIFICADA SOBRE FATORES QUE AFETAM O CONSUMO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO INDUSTRIAIS

Bianca Lucena dos Santos¹, Katarina Estrela Viana Brito¹, Lucas Oliveira Nunes¹,
Nadia Evangelista Dos Santos¹, Phamilla Gracielli Sousa Rodrigues^{1,*}

¹ Universidade Federal Rural da Amazônia, Parauapebas, Brasil
(phamilla@ufra.edu.br)*

Resumo: Nos processos industriais, os sistemas de bombeamento têm um papel fundamental no transporte de fluidos e representam uma parte grande do consumo de energia elétrica. Com isso, há a necessidade de reduzir os custos operacionais e aumentar a eficiência, sendo importante adotar estratégias para minimizar o consumo energético desses sistemas. Este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de revisão bibliográfica e aplicação numérica ilustrativa, os principais fatores que influenciam o consumo de energia em sistemas de bombeamento industriais. São discutidos aspectos como perdas de carga, dimensionamento de tubulações, rendimento do conjunto motor-bomba, seleção adequada da bomba, uso de inversores de frequência, manutenção preventiva, controle de vazamentos e características do fluido bombeado, destacando a contribuição da Mecânica dos Fluidos e da Engenharia de Produção para a melhoria da eficiência operacional.

Palavras-chave: Mecânica dos Fluidos; Sistemas de Bombeamento; Eficiência Energética; Engenharia de Produção.

INTRODUÇÃO

O aumento constante da busca pela eficiência energética tem elevado a procura das indústrias por meios alternativos capazes de reduzir o consumo de energia nos processos sem comprometer a produtividade.

Nesse contexto, a engenharia de produção possui um papel fundamental na busca pela otimização de recursos, diminuir custos operacionais e melhorar o desempenho dos sistemas industriais. Com a grande variedade de equipamentos que se encontram nas indústrias, os sistemas de bombeamento se destacam no transporte de fluidos, sendo assim, uma grande parcela do consumo de energia elétrica neste ramo.

Segundo Fox et al. (2018), o escoamento dos fluidos em tubulações é fortemente influenciado por grandezas como pressão, velocidade e vazão, além das perdas de energia decorrentes do atrito e dos componentes presentes na linha de escoamento. O estudo desses fenômenos é importante para o dimensionamento e a otimização dos sistemas de transportes de fluidos e bombeamento industrial. A vazão do fluido, a pressão de operação e as perdas de cargas são importantes para o correto dimensionamento de sistemas de bombeamento.

Ainda de acordo com Fox et al. (2018), a conservação da massa e da energia em escoamentos pode ser

descrita por equações clássicas da Mecânica dos Fluidos, por exemplo a equação da continuidade e a equação de Bernoulli. Complementarmente, Çengel e Cimbala (2015) destacam que essas relações são fundamentais para a análise do comportamento dos fluidos em sistemas hidráulicos e para a avaliação da eficiência operacional.

Ademais, as perdas de carga são principalmente provocadas pelo atrito das tubulações e materiais, podendo aumentar ainda mais a potência necessária pelas bombas. Conforme Karassik et al. (2008), a redução dessas perdas contribui diretamente para a diminuição do consumo energético e para o aumento da eficiência dos sistemas de bombeamento.

No setor de mineração, os sistemas de bombeamento são muito utilizados no transporte de polpa mineral, drenagem de minas, recirculação de água e movimentação de rejeitos, durante todo os processos. Devido ao alto consumo energético desses sistemas, é essencial buscar soluções que relacionem os conceitos da Mecânica dos Fluidos às ferramentas da Engenharia de Produção, buscando a redução de custos operacionais e o aumento da eficiência dos processos.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar os principais fatores que influenciam o consumo de energia em sistemas de bombeamento



industriais, relacionando os conceitos da Mecânica dos Fluidos às práticas de gestão operacional da Engenharia de Produção.

MATERIAL E MÉTODOS

O projeto foi desenvolvido por meio de pesquisa bibliográfica, utilizando livros relacionados à mecânica dos fluidos e artigos científicos relacionados à eficiência energética em sistemas de bombeamento. A revisão permitiu identificar os principais fatores que influenciam o consumo de energia, com destaque para as perdas de carga, dimensionamento das tubulações, rendimento das bombas, uso de inversores de frequência, manutenção preventiva, controle de vazamentos e características do fluido bombeado.

Além disso, foi elaborado um exemplo numérico ilustrativo para demonstrar a influência dos parâmetros hidráulicos no desempenho energético dos sistemas de bombeamento, possibilitando discutir estratégias para a redução do consumo de energia e a melhoria da eficiência operacional em ambientes industriais.

Foram analisados parâmetros hidráulicos como vazão, densidade do fluido, aceleração da gravidade, altura manométrica e perda de carga. A potência hidráulica foi estimada pela equação $P_h = \rho g Q H$, permitindo discutir como alterações na altura manométrica e nas perdas do sistema podem impactar a potência requerida e, consequentemente, os custos operacionais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa dos conceitos da Mecânica dos Fluidos aplicados aos sistemas de bombeamento mostrou que o consumo de energia está ligado às perdas de carga presentes nas tubulações e ao rendimento das bombas utilizadas. Segundo Fox et al. (2018), o atrito entre o fluido e as paredes da tubulação provocam dissipação de energia, exigindo maior potência do sistema para manter a vazão. Para ilustrar a influência das perdas de carga no desempenho energético dos sistemas de bombeamento, foi elaborado um exemplo comparativo, com dados ilustrativos, apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Influência do diâmetro da tubulação na perda de carga

Diâmetro da tubulação (mm)	Perda de carga (m)
50	12
75	7
100	4

Observando a tabela 1, pode-se perceber que o aumento do diâmetro da tubulação reduz as perdas de carga nas tubulações. Esse comportamento pode ser explicado pela equação de Darcy-Weisbach, que relaciona a perda de carga contínua de um fluido que percorre um trecho retilíneo de tubulação, ao comprimento da tubulação (L), diâmetro interno da tubulação (D) à velocidade média do escoamento (v) e ao fator de atrito de Darcy-Weisbach (f) (Çengel e Cimbala, 2015).

$$h_c = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

Desse modo, as tubulações que possuem maior diâmetro têm menores perdas energéticas.

A redução das perdas de carga contribui para a diminuição da energia necessária para o transporte do fluido, garantindo maior eficiência operacional e menores custos de operação. Do ponto de vista da engenharia de produção, a redução das perdas de carga não representa apenas uma melhoria técnica do sistema, mas também uma oportunidade de reduzir os custos operacionais (Çengel e Cimbala, 2015; Fox et al., 2018).

Outro fator importante é a correta seleção da bomba de operação. Um superdimensionamento pode levar a um maior consumo energético, aumento de custos operacionais e risco de falhas como cavitação ou sobrepessão. Assim, evita folgas excessivas de capacidade, e reduz desperdícios, e tem como resultado menor consumo de energia elétrica (Karassik et al., 2008). Para a exemplificação da avaliação da potência hidráulica desejada pelo sistema, utilizou-se a equação:

$$P_h = \rho g Q H_{tot} \quad (2)$$

Considerando uma vazão (Q) de 0,02 m³/s, densidade da água igual a 1000 kg/m³ (ρ), aceleração da gravidade local (g) de 9,81 m/s² e altura manométrica total (H_{tot}) de 15 m, sendo que H_{tot} já inclui as perdas (e configura um valor para fins de exemplificação, independente dos dados da tabela 1), obtemos:

$$P_h = 1000 \times 9,81 \times 0,02 \times 15 \quad (3)$$

$$P_h = 2943W \quad (4)$$

$$P_h \approx 2,94kW \quad (5)$$

O resultado mostra que a potência hidráulica necessária para o funcionamento do sistema é de aproximadamente 2,94 kW, com uma potência elétrica estimada de 4,20 kW considerando um rendimento global de 70% (2,94/0,7 kW), esta potência seria mais alta num caso de tubulação de menor diâmetro, onde o acréscimo de perdas de cargas elevaria a altura manométrica total.



Nas operações de mineração, a redução das perdas de carga pode apresentar uma significativa economia financeira, pois, os sistemas de bombeamento operam continuamente durante longos períodos. A engenharia de produção busca a melhoria contínua desses processos, devido a busca pela diminuição do consumo energético que contribui para a redução dos custos operacionais, aumento dessa forma a eficiência produtiva e melhoria dos indicadores de desempenho da organização. Desse modo, qualquer diminuição das perdas de carga contribui para a redução do consumo energético e dos custos operacionais.

Outro fator importante na redução do consumo energético é manter o conjunto motor-bomba operando em suas faixas de rendimento máximo. A otimização desse conjunto garante que maior parte da energia elétrica seja efetivamente transformada em energia mecânica, sendo uma das formas mais eficazes de reduzir o consumo de energia em indústrias (Marques, Haddad e Guardia, 2007).

A manutenção preventiva é outro fator importante na redução de perdas. Segundo Marques, Haddad e Guardia (2007), perdas por desgastes, desalinhamento, tensão inadequada de correias, limpeza e lubrificação são fatores que contribuem na redução do rendimento do conjunto motor-bomba. Karassik et al. (2008) adiciona ainda que a redução de vazamentos evita bombeamento desnecessário de fluido, e consequentemente, reduzindo o gasto energético, e evitando predispor o conjunto a falhas por sobreaquecimento.

Também estudos sobre eficiência energética mostram que a utilização de inversores de frequência possibilita o controle da velocidade das bombas conforme a demanda do processo, diminuindo desperdícios de energia e aumentando a vida útil dos equipamentos (Saidur, 2010). Saidur (2010) também destaca que tecnologias voltadas à eficiência energética podem gerar economias significativas no consumo de energia de sistemas motorizados industriais. Logo, a redução das perdas hidráulicas e controle eficiente da operação representa uma estratégia importante para a otimização dos sistemas de bombeamento industriais.

Além destes fatores, Karassik et al. (2008) frisa que as características do fluido, como viscosidade, presença de sólidos e abrasividade também influenciam no consumo. À medida que a viscosidade sobe, a vazão e a altura manométrica caem, mas a potência consumida pelo motor sobe bruscamente, e o rendimento da bomba diminui. O autor também afirma que a presença de partículas no fluido ao longo da tubulação e dentro da bomba, demanda muito mais torque e potência do motor. Além disso, a abrasividade do

fluido pode ocasionar o desgaste dos componentes internos da bomba, ampliando as folgas e aumentando o vazamento interno e recirculação de fluido, o que aumenta o consumo energético ao longo do tempo.

CONCLUSÃO

As observações realizadas mostraram que uma maior eficiência no consumo de energia nos sistemas de bombeamento industriais está ligada às perdas de carga, dimensionamento de tubulações, rendimento do conjunto motor-bomba, seleção adequada da bomba, uso de inversores de frequência, manutenção preventiva, controle de vazamentos e características do fluido bombeado. Os resultados obtidos indicaram que o controle destes fatores pode aumentar o rendimento no funcionamento do sistema, contribuindo para uma operação mais eficiente e econômica dos processos.

Dessa forma, portanto, a aplicação dos conceitos da Mecânica dos Fluidos, associada a práticas de otimização e gestão dos processos produtivos, se torna fundamental para o desenvolvimento dos sistemas de bombeamento se tornando mais eficientes. Além de reduzir os custos operacionais, essas ações contribuem para aumentar a competitividade das empresas e promover maior sustentabilidade nos processos industriais.

REFERÊNCIAS

- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.
- MARQUES, Milton César Silva; HADDAD, Jamil; GUARDIA, Eduardo Crestana (Coord.). **Eficiência Energética: Teoria & Prática**. 1. ed. Itajubá: FUPAI; Eletrobrás/PROCEL, 2007.
- KARASSIK, I. J.; MESSINA, J. P.; COOPER, P.; HEALD, C. C. *Pump Handbook*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
- SAIDUR, R. *A review on electrical motors energy use and energy savings*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p. 877-898, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.018>