AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DO MOTOR ELÉTRICO E DA BOMBA NO TRANSPORTE DE POLPA DE MINÉRIO DE FERRO.

EVALUATION OF THE ELECTRIC MOTOR AND PUMP EFFICIENCY IN THE TRANSPORT OF IRON ORE SLURRY

Arthur Dantas Rezende, Beatriz Sousa Veiga, Luiz Felipe de Morais da Costa Barros, Letícia Jatczak Almeida, Raoní Melo Medina, Pedro Russo Marques, Daniel Pereira Medeiros, Vitor da Silva Rosa, Álvaro Luiz Moreira Conrado, Nelize Maria de Almeida Coêlho

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica
E-mail para contato: arthurdrezende300902@gmail.com

RESUMO – O Brasil possui mais de 1600 km de dutos de transporte de minério. Dessa forma, a compreensão da eficiência dos equipamentos envolvidos na operação de bombeamento é essencial para garantir sustentabilidade ao processo. O objetivo do estudo foi avaliar, em unidade de bancada, o rendimento do motor e da bomba centrífuga com rotor semiaberto durante o transporte de polpa de pellet feed de minério de ferro à 5 %vol. Os ensaios demonstraram que a potência efetivamente convertida em energia hidráulica pela bomba foi bastante reduzida, da ordem de 7-8 %, em relação à potência mecânica do eixo, indicando perdas hidráulicas e mecânicas importantes ao longo da transmissão. O motor operou longe do ideal, sugerindo a necessidade de ajustes mecânicos e sua substituição por modelo mais compatível.

Palavras-chave: Mineroduto; Rendimento de motor; Rendimento de bomba; Rotor semiaberto; *Pellet feed* de minério de ferro.

ABSTRACT – Brazil has more than 1,600 km of mineral ore pipelines. Therefore, understanding the efficiency of the equipment involved in the pumping operation is essential to ensure the sustainability of the process. The objective of this study was to evaluate, on a bench-scale unit, the performance of the motor and the semi-open impeller centrifugal pump during the transport of iron ore pellet feed slurry at 5% vol. The tests showed that the power effectively converted into hydraulic energy by the pump was quite low — around 7–8% of the shaft's mechanical power — indicating significant hydraulic and mechanical losses throughout the transmission. The motor operated far from its ideal condition, suggesting the need for mechanical adjustments and replacement with a more suitable model.

Keywords: Iron ore pipeline; Motor efficiency; Pump efficiency; Semi-open impeller; Iron ore pellet feed.

1. INTRODUÇÃO

Em 2023, o Brasil alcançou a exportação de 392 milhões de toneladas de minérios, movimentando aproximadamente 42 bilhões de dólares. Desse total, o minério de ferro representou 71%, o que equivale a cerca de 30 bilhões de dólares, consolidando o país como um dos maiores exportadores mundiais desse minério (IBRAM, 2024).

As principais reservas brasileiras de ferro estão localizadas no Centro-Sul de Minas Gerais e na Serra dos Carajás, no Pará. Como esses locais ficam distantes dos principais portos, é fundamental ter um transporte eficiente e sustentável para manter a competitividade internacional. Entre as opções de transporte disponíveis, como ferroviário, rodoviário, hidroviário, cabotagem e mineroduto, estudos da Universidade Federal de Santa Catarina e do Ministério de Minas e Energia apontam o mineroduto como o modal de menor custo, conforme simulações do Observatório Nacional de Transporte e Logística (LABTRANS/UFSC, 2022).

Os minerodutos são dutos que conduzem o minério, na forma de polpa aquosa, por longas distâncias até o ponto de processamento, minimizando os impactos ambientais e logísticos associados aos modais tradicionais e prevenindo atrasos e perdas no transporte. Segundo a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (MINAS JR CONSULTORIA MINERAL, 2018), um mineroduto pode substituir o equivalente a 1,5 mil caminhões por dia para o transporte de 60 mil toneladas de minério. Contudo, o transporte da polpa, devido à presença de sólidos em suspensão, provoca desgaste acelerado em componentes críticos dos sistemas, como rotores e carcaças das bombas, aumentando os custos de manutenção e reduzindo a disponibilidade dos equipamentos (FIGUEIRA JR, 2017).

Nas bombas centrífugas, o fluido é succionado até o centro do rotor, de onde é lançado para as extremidades pela força centrífuga das pás. Ao deixar o rotor, o fluido ganha pressão e velocidade, e parte dessa energia é convertida em pressão por meio do design do corpo da bomba, normalmente uma voluta. Os rotores do tipo fechado são mais eficientes pois minimizam vazamentos ao longo das pás; no entanto, podem entupir mais

facilmente, principalmente ao operar com fluidos contendo sólidos em suspensão. Neste caso, são recomendados rotores do tipo aberto ou semiaberto, uma vez que reduzem o risco de obstrução. Por outro lado, esses rotores apresentam baixos rendimentos pois permitem um certo deslizamento do fluido entre as pás e a parede da bomba, de forma que parte da energia é dissipada nessas recirculações internas (HENN, 2019).

No caso específico de bombas para transporte de polpas, são normalmente empregados rotores semiabertos pois se privilegiam robustez, passagem livre e menor risco de obstrução, mesmo à custa de eficiência hidráulica reduzida. Normalmente são operadas com rotações inferiores a 1800 rpm para evitar o desgaste excessivo dos componentes (FIGUEIRA JR, 2017). Entretanto, há uma rotação mínima necessária para garantir velocidade suficiente às partículas para que não se depositem no fundo do duto, evitando entupimentos. Essa velocidade é denominada velocidade crítica e é um parâmetro muito importante no transporte hidráulico de minérios (PINTO, 2012). Segundo Chaves (2002), a velocidade mínima de transporte para polpas heterogêneas é de 4,5 m/s e de 1,5 m/s para polpas homogêneas.

Nesse contexto, a compreensão e a determinação do rendimento da bomba e do motor empregados no sistema de bombeamento tornam-se fundamentais para a avaliação do desempenho global da instalação, já que tais componentes exercem influência direta sobre a eficiência energética e o custo operacional do sistema. A ausência de monitoramento ou análise adequada desses parâmetros pode resultar em consumo excessivo de energia, elevação da temperatura de operação, ocorrência de falhas mecânicas e redução da vida útil dos equipamentos. Por outro lado, quando compreendidos, possibilita a otimização do rendimento, o aumento da confiabilidade operacional, o melhor desempenho mecânico e econômico.

O objetivo do presente estudo foi determinar os rendimentos do motor da bomba e da bomba centrífuga com rotor semiaberto, responsáveis pelo transporte hidráulico de minério de ferro em escala de bancada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios experimentais foram conduzidos no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília utilizando um sistema de bombeamento, em circuito fechado, operado com polpa de *pellet feed* de minério de ferro à 5 %vol. O circuito era composto por um tanque equipado com um impulsor axial mecânico, um *looping* de tubulação em PVC transparente de 1", válvulas de controle e direcionamento de fluxo e uma bomba centrífuga com rotor semiaberto movida por um motor elétrico controlado por inversor de frequência. O conjunto motobomba era formado por um motor da marca Kohlbach com potência nominal de 5 CV e uma bomba centrífuga Schneider, modelo MCI-EF. O inversor de frequência era da marca WEG, modelo CFW09. A Figura 1 apresenta um esquema da unidade experimental utilizada.

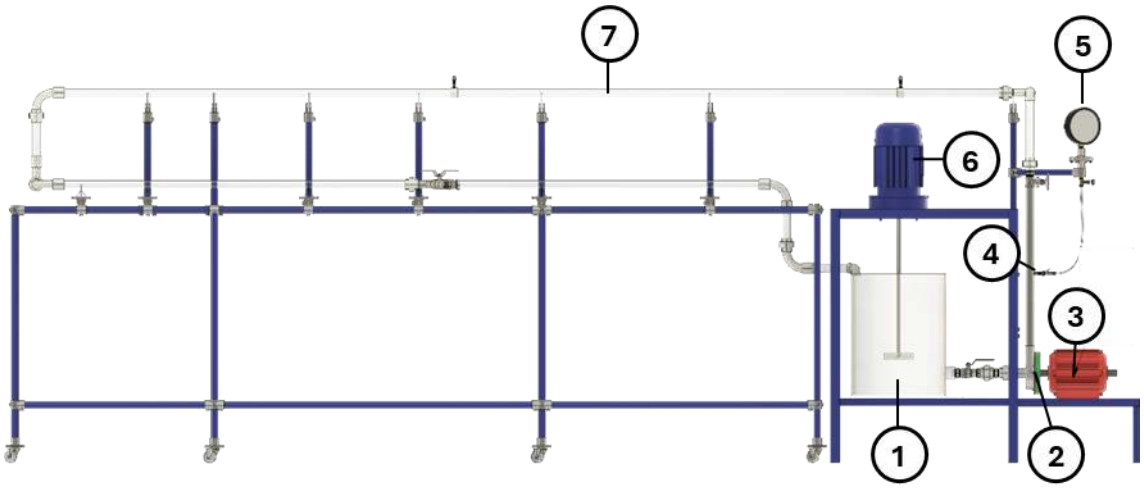

Figura 1: Unidade experimental do presente estudo. Composta por: 1) Tanque equipado com impulsor mecânico para armazenamento e homogeneização da polpa, 2) Bomba com rotor semiaberto, 3) Motor para acionamento da bomba, 4) Tomada de pressão à jusante da bomba (cálculo de eficiência da bomba), 5) Manômetro com selo hidráulico, 6) Motor para acionamento do impelidor, 7) Percurso de tubulação do mineroduto.

A unidade experimental permitiu uma faixa de trabalho do motor entre 900 e 1900 rpm. Durante os ensaios, foram registrados os parâmetros elétricos (tensão, corrente e potência ativa) na entrada do motor, o torque desenvolvido pelo motor, a pressão a jusante da bomba e a vazão de polpa escoada. O torque foi determinado por meio de um dinamômetro de tração conectado ao braço fixo em três posições, situadas a 19 cm, 22,5 cm e 26,5 cm de distância a partir do eixo do motor. Já a vazão volumétrica, em cada rotação estudada, pela relação entre a massa de polpa bombeada em um intervalo de tempo e a densidade da polpa. Todos os ensaios foram realizados em quintuplicata.

O cálculo do rendimento do motor elétrico da bomba foi realizado relacionando-se a potência de entrada, medida através de um wattímetro trifásico YEW com capacidade de 25 A e fator de escala 50, e a potência de saída, obtida pela análise do motor em balanço (Equação 1). A relação de rendimento está expressa pela Equação 2. Já o rendimento da bomba foi calculado relacionando a potência útil (Equação 3), ou seja, a energia aproveitada pelo fluido que sai da bomba num intervalo de tempo para o seu escoamento e a potência de saída do motor. Essa relação está representada na Equação 4.

$$Pot_s = \frac{2\,\pi\,.F.b\,.n}{60} = \frac{2\,\pi\,.T\,.n}{60} \quad (1)$$

$$\eta_m = \frac{Pot_s}{Pot_e}.100 \quad (2)$$

$$Pot_u = Q.P \quad (3)$$

$$\eta_b = \frac{Pot_u}{P_s}.100 \quad (4)$$

Em que:
- Pot_s é a potência de saída do motor $[W]$
- Pot_e é a potência de entrada do motor $[W]$
- Pot_u é a potência útil da bomba $[W]$
- F é a força desenvolvida pelo motor no braço fixo para conter seu balanço $[N]$
- b é o comprimento do braço desde o eixo do motor $[m]$
- n é a rotação do eixo do motor $[rpm]$
- T é o torque do motor $[J]$
- Q é a vazão de polpa $[m^3/s]$
- P é a pressão à jusante da bomba $[Pa]$
- η_m é o rendimento do motor $[\%]$
- η_b é o rendimento da bomba $[\%]$

Os testes foram realizados em diferentes rotações dentro da faixa operacional mencionada, mantendo-se constante a concentração da polpa. Para cada condição, foram executadas três repetições das medições, a fim de reduzir a influência de erros experimentais. Os dados obtidos foram organizados em uma planilha, possibilitando o

cálculo das médias e a elaboração do gráfico representando o comportamento do rendimento do motor em função da rotação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios iniciais foram direcionados à obtenção da relação entre a rotação do motor e a vazão de polpa (Figura 2). Foi observada uma forte correlação linear entre essas variáveis, com coeficiente de determinação próximo de 1, indicando boa consistência dos dados experimentais. A equação resultante dessa regressão (indicada no gráfico) foi adotada para converter a frequência de operação da bomba em vazão volumétrica correspondente à polpa com 5 %vol.

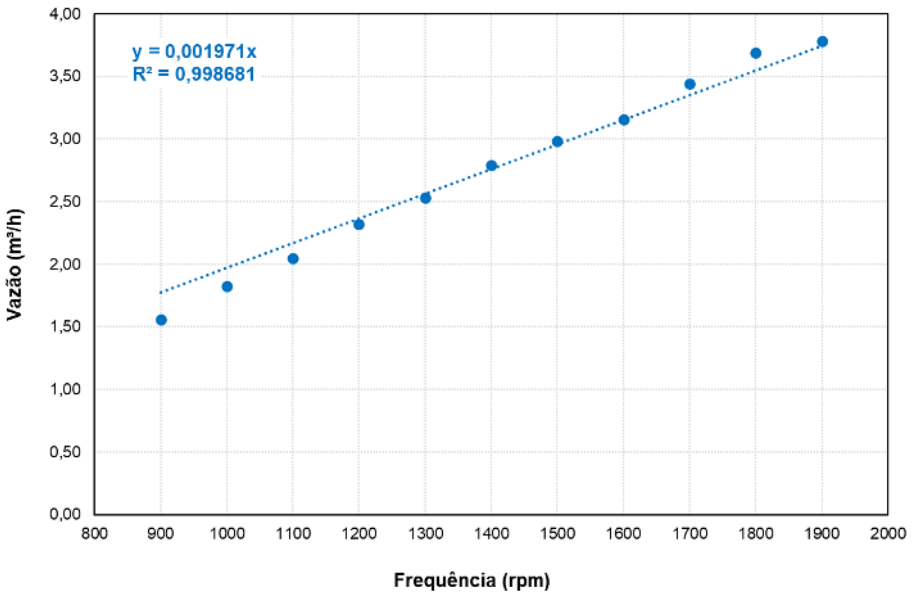

Figura 2: Relação entre a vazão de polpa transportada e a rotação do motor.

Na sequência, a potência hidráulica (útil) e as potências na entrada e saída do motor foram determinadas, originando as curvas exibidas na Figura 3.

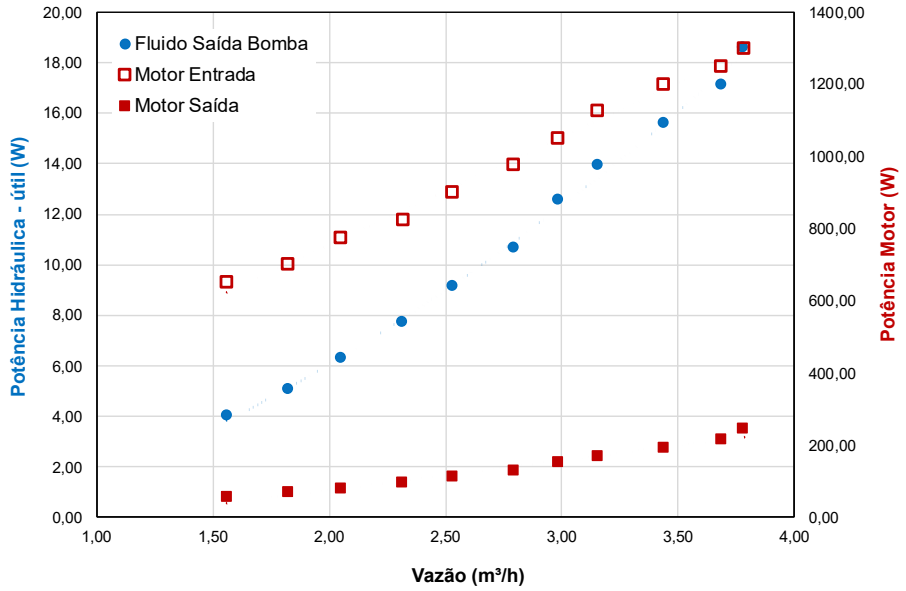

Figura 3: Comportamento da potência na janela de operação da unidade experimental.

Conforme apresentado na Figura 3, a potência elétrica na entrada do motor (marcadores vermelhos abertos) e a potência mecânica de saída (marcadores vermelhos preenchidos) demonstraram crescimento quase linear com o aumento da vazão, se diferenciando em relação aos valores absolutos e à inclinação das retas, menos acentuada para a variável de saída. Essa observação expôs que, para a faixa de operação da unidade, apenas uma pequena fração da potência fornecida ao motor foi efetivamente convertida em energia hidráulica, mesmo com uma maior transferência de energia ao fluido. Essas perdas acumuladas ao longo da transmissão de potência podem ser associadas como de origem hidráulica na bomba, mecânica no eixo/mancais e elétricas no próprio motor.

Em relação ao rendimento do motor, os resultados obtidos estão em concordância com o comportamento esperado: em cargas mais altas, motores tendem a operar próximos ao seu ponto ótimo de desempenho, reduzindo perdas e elevando a eficiência (Figura 4). Todavia, os números observados revelaram que o sistema ainda não operava em sua faixa ideal de eficiência, tendo o motor potencial para alcançar rendimentos mais elevados. Neste caso, a limitação energética global muito provavelmente foi resultado de restrições hidráulicas impostas pela bomba, cujo rendimento se manteve baixo e praticamente constante, em torno de 7 a 8 %, para a janela de operação. A curva do rendimento da

bomba evidenciou o comportamento típico de bombas centrífugas operando com polpas ou fluidos mais viscosos, em que há a ocorrência de perdas hidráulicas importantes.

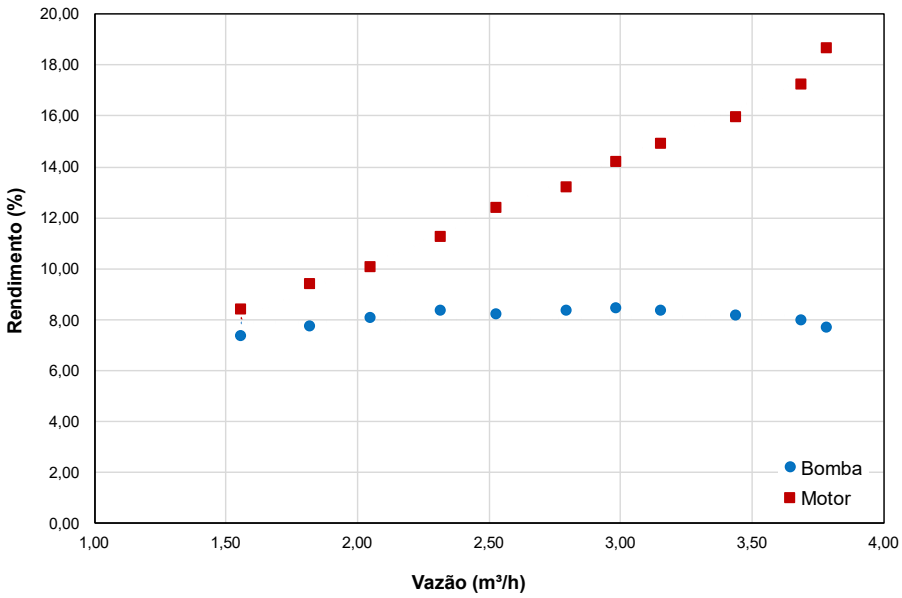

Figura 4: Rendimento da bomba e do motor para a janela de operação da unidade experimental.

Dessa forma, para melhorar o desempenho do conjunto, sugere-se efetuar uma varredura completa de todos os componentes mecânicos, garantindo alinhamento otimizado, peças em boas condições de uso e ajuste rigoroso do espaço entre as pás e a parede da bomba. Do ponto de vista de processo, uma vez que o motor se mostrou superdimensionado, propõe-se sua substituição por outro de menor potência nominal, logo mais compatível com a carga hidráulica da bomba. Estudos futuros também podem explorar o bombeamento de polpas mais concentradas, que certamente aumentariam a demanda de torque, permitindo a observação de rendimentos mais próximos ao ponto ótimo. Importante reforçar, todavia, que ajustes no projeto e operação poderiam buscar melhorias energéticas, mas dentro de um limite que é naturalmente imposto pelas propriedades do fluido e pelas características construtivas do rotor.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no presente estudo permitiram compreender o comportamento dos equipamentos envolvidos na operação de bombeamento em minerodutos, contribuindo para aprimorar a sustentabilidade desse processo. Observou-se que a potência efetivamente convertida em energia hidráulica pela bomba foi uma fração bastante reduzida da potência total fornecida ao motor, indicando perdas significativas que são, provavelmente, oriundas tanto das características hidráulicas do rotor quanto das perdas mecânicas e elétricas no sistema.

O rendimento do motor revelou-se conforme o esperado, melhorando em condições de maior carga. Porém o conjunto não atingiu sua eficiência ideal durante os testes, sugerindo que ajustes no sistema, como alinhamento, condições dos componentes e substituição do motor por um modelo mais adequado à carga hidráulica, podem melhorar o desempenho geral e a eficiência energética. Por fim, destacou-se que as características do rotor semiaberto, indicadas para o bombeamento de polpas abrasivas, trazem limitações características de eficiência.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAVES, Arthur Pinto. *Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem*. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

HENN, Érico Antônio Lopes. Máquinas de fluido. 4. ed. Santa Maria: Editora UFSM, 2019. 496 p. ISBN 9788573913262.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. *Informativo Anual 2024: dados da indústria mineral brasileira*. Brasília: IBRAM, 2024. Disponível em: https://ibram.org.br/. Acesso em: 30 set. 2025.

LABTRANS/UFSC. Relatório final de estudos e pesquisas para a elaboração de levantamento e de análises acerca da infraestrutura do transporte e da logística do setor mineral no Brasil, assim como dos investimentos esperados no setor. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pnm-2050/estudos/caderno-4-competitividade-da-industria-

mineral-brasileira/InfraestruturadeTransporteeLogsticadoSetorMineralBrasileiro.pdf. Acesso em: 27 jun 2024.

FIGUEIRA JR, E.A. – Estudo e concepção de rotores de disco para bombeamento de fluidos abrasivos. 2017. 118f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.

MINAS JR CONSULTORIA MINERAL. Entenda o que é um mineroduto. Disponível em: <https://www.minasjr.com.br/entenda-o-que-e-um-mineroduto/>. 2018. Acesso em: 12 de ago 2024.

PINTO, Thiago César de Souza**.** *Modelagem da velocidade crítica de transporte de polpas minerais contendo partículas grossas*. 2012. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.