EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA: REVISÃO DAS PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS E TECNOLOGIAS

João Batista Ferrarez Fincoti[1], Matheus Vinicius de Oliveira[2], Diogo Pereira Soria[3]; Marília Vasconcellos Agnesini[4]

[1]Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto-SP, Brasil (joao.fincoti@sou.unaerp.edu.br)
[2] Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto-SP, Brasil (matheus.voliveira@sou.unaerp.edu.br)
[3] Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto-SP, Brasil (diogo.soria@sou.unaerp.edu.br)
[2] Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental e Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto-SP, Brasil (magnesini@unaerp.br)

Resumo: Sistemas de bombeamento representam uma das principais fontes de consumo energético no abastecimento de água. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sistemática sobre estratégias e tecnologias voltadas à eficiência energética, abordando superdimensionamento de bombas, inversores de frequência, motores PMSM, otimização operacional e tecnologias emergentes de IoT e inteligência artificial. Os estudos evidenciam potencial significativo de redução do consumo energético e modernização dos sistemas de abastecimento.

Palavras-chave: eficiência energética; sistemas de bombeamento; abastecimento de água; inversores de frequência; otimização operacional.

INTRODUÇÃO

O fornecimento de água potável é um serviço essencial à sociedade e demanda elevado consumo de energia elétrica em todas as etapas do sistema, incluindo captação, tratamento, adução e distribuição. Entre essas etapas, os sistemas de bombeamento destacam-se como os principais responsáveis pelos gastos energéticos no setor de abastecimento de água (Kalaiselvan et al., 2016; Shao et al., 2024; Luna et al., 2019).

Estima-se que sistemas de bombeamento urbano possam consumir até 3,3 kWh por metro cúbico de água entregue ao usuário final, enquanto os gastos com eletricidade podem representar cerca de 90% do consumo elétrico total do setor de distribuição (de Souza et al., 2021). Em escala global, a Agência Internacional de Energia aponta que o setor de água é responsável por aproximadamente 4% do consumo mundial de eletricidade, além de registrar crescimento expressivo nos custos energéticos associados ao tratamento de água entre os anos de 2000 e 2024 (Skoczko, 2025).

No Brasil, esse cenário torna-se ainda mais desafiador devido à presença de infraestruturas antigas, elevadas tarifas de energia elétrica e sistemas frequentemente operando com baixa eficiência. Além disso, muitas estações elevatórias e conjuntos motobomba trabalham fora do ponto de melhor eficiência hidráulica, frequentemente em decorrência do superdimensionamento dos equipamentos, ausência de automação e limitações operacionais. Estudos nacionais reforçam a necessidade de avaliações sistemáticas da eficiência energética em poços profundos e estações de bombeamento, evidenciando o potencial de redução do consumo energético e dos custos operacionais (Perroni & Wendland, 2006; Rocha & Barros, 2025; Rodrigues, 2024).

Diante desse contexto, diferentes estratégias vêm sendo aplicadas com o objetivo de aumentar a eficiência energética dos sistemas de abastecimento, destacando-se o uso de inversores de frequência (Kalaiselvan et al., 2016), motores de alto rendimento (Sperlich et al., 2018), otimização operacional (Luna et al., 2019; Shao et al., 2024), sistemas supervisórios e ferramentas associadas à Internet das Coisas (IoT) e à inteligência artificial (Duan et al., 2025).

Assim, o presente trabalho tem como objetivo revisar as principais estratégias e tecnologias aplicáveis à melhoria da eficiência energética em sistemas de

bombeamento para abastecimento de água, discutindo indicadores de desempenho, potencial de economia energética e tendências emergentes voltadas à modernização e sustentabilidade do setor.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido a partir de uma revisão bibliográfica sistemática conduzida em 2026, com base em artigos científicos, dissertações, documentos técnicos e publicações nacionais e internacionais relacionadas à eficiência energética em sistemas de bombeamento para abastecimento de água.

As fontes foram selecionadas nas bases de dados ScienceDirect, MDPI, Repositórios e revistas brasileiras, utilizando os descritores: "pump efficiency", "*water supply energy*", "*variable frequency drive*", "*pump scheduling optimization*", "*PMSM well pump*" e seus equivalentes em português.

Os critérios de inclusão priorizaram publicações contendo dados quantitativos sobre eficiência energética, estudos de caso aplicados em sistemas reais de abastecimento e artigos de revisão publicados a partir de 2006. Foram excluídos trabalhos sem aplicação prática ou que não apresentavam indicadores técnicos relacionados ao desempenho energético dos sistemas de bombeamento.

A análise bibliográfica foi organizada em cinco eixos temáticos: (1) panorama do consumo energético no setor de abastecimento de água; (2) superdimensionamento de bombas e operação fora do ponto de melhor eficiência (BEP); (3) aplicação de inversores de frequência (VFDs); (4) utilização de motores de alta eficiência energética; e (5) otimização operacional e tecnologias emergentes associadas à automação, IoT e inteligência artificial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos estudos selecionados demonstra que o elevado consumo energético nos sistemas de abastecimento de água está diretamente associado a fatores hidráulicos, operacionais e tecnológicos. Entre os principais aspectos identificados destacam-se o superdimensionamento de equipamentos, a operação fora do ponto de melhor eficiência, a ausência de controle operacional automatizado e limitações relacionadas ao gerenciamento energético dos sistemas. Em contrapartida, os trabalhos analisados evidenciam que a adoção de tecnologias de controle, automação e otimização operacional pode proporcionar reduções significativas no consumo de energia elétrica e nos custos operacionais do setor de saneamento.

Panorama do consumo energético no setor de abastecimento de água

Os estudos analisados evidenciam que o consumo energético representa um dos principais custos operacionais dos sistemas de abastecimento de água. Grande parte dessa demanda está associada às etapas de bombeamento, recalque e distribuição, especialmente em sistemas com elevada extensão territorial e diferenças altimétricas significativas. Sistemas de bombeamento urbano podem consumir até 3,3 kWh por metro cúbico de água entregue ao usuário final, e os gastos com eletricidade representam cerca de 90% do consumo elétrico total do setor de distribuição (de Souza et al., 2021). Além do impacto econômico, o elevado consumo de energia elétrica amplia os desafios relacionados à sustentabilidade operacional e à redução das emissões indiretas de gases de efeito estufa.

Nesse contexto, diferentes pesquisas destacam a necessidade de modernização dos sistemas hidráulicos e elétricos utilizados no saneamento, priorizando estratégias voltadas à eficiência energética, automação operacional e monitoramento contínuo dos equipamentos. No Brasil, esse cenário é agravado pela combinação de infraestruturas antigas e tarifas energéticas crescentes, sendo que os custos de energia para tratamento de água aumentaram cerca de sete vezes entre 2000 e 2024 (Skoczko, 2025). Os trabalhos revisados apontam que intervenções em sistemas de bombeamento apresentam elevado potencial de redução do consumo energético e dos custos operacionais, tornando-se uma das principais áreas de investimento para o setor (Perroni & Wendland, 2006; Rocha & Barros, 2025; Rodrigues, 2024).

Superdimensionamento e operação fora do BEP

Um dos problemas mais recorrentes em sistemas de bombeamento é o superdimensionamento. Estima-se que 75% das bombas centrífugas estejam superdimensionadas em mais de 20%, e que 80% dos motores elétricos que as acionam operem fora da região de máxima eficiência (Martin-Candilejo et al., 2020). Essa condição gera perdas energéticas contínuas, desgaste prematuro dos equipamentos e necessidade de controle por válvulas de estrangulamento, agravando ainda mais as perdas hidráulicas e energéticas. A correção do superdimensionamento por meio da substituição ou recalibração das bombas pode gerar economias médias entre 15% e 25% no consumo de eletricidade para bombeamento (Electrical Engineering Portal, 2026).

Inversores de frequência (VFDs)

O uso de inversores de frequência representa uma das estratégias de maior impacto na redução do consumo energético em sistemas de bombeamento. Bombas centrífugas consomem cerca de 20% de toda a eletricidade gerada no mundo, e economias entre 30% e 50% podem ser alcançadas com a aplicação de VFDs em sistemas de bombeamento em paralelo

(Kalaiselvan et al., 2016). Essa tecnologia permite adequar continuamente a rotação da bomba à demanda real do sistema, reduzindo desperdícios associados à operação em velocidade fixa com controle por válvulas. Além disso, a otimização do escalonamento de bombas, por meio da definição das unidades operantes conforme a demanda hidráulica, pode aumentar a eficiência energética em até 25% quando comparada à operação convencional (Luna et al., 2019).

Motores de alta eficiência em poços profundos

Para sistemas de captação subterrânea, a substituição de motores assíncronos convencionais por motores síncronos de ímã permanente (PMSM) tem demonstrado ganhos expressivos de desempenho energético. Estudo realizado em campos de poços nas cidades de Berlim e Hamburgo, na Alemanha, evidenciou que bombas equipadas com motores PMSM apresentaram eficiência global 6,8 pontos percentuais superior à de equipamentos com motores assíncronos convencionais (Beck et al., 2018). Simulações de operação em velocidade variável confirmaram que a associação entre motores PMSM e inversores de frequência representa uma das soluções de maior retorno energético para sistemas de poços profundos (Beck et al., 2018).

Otimização do agendamento operacional

A operação ótima de bombas em sistemas de distribuição pode ser formulada como um problema de programação não linear inteira mista (MINLP). Nesse contexto, abordagens de linearização, como a Programação Linear Inteira Mista (MILP), permitem determinar estratégias operacionais capazes de minimizar os custos de energia, respeitando simultaneamente as restrições hidráulicas e os padrões de qualidade da água. Shao et al. (2024) demonstraram que essas técnicas possibilitam reduções significativas nos custos energéticos por meio da programação temporal das bombas em função das tarifas de energia elétrica e dos níveis dos reservatórios.

Tecnologias emergentes: IoT, SCADA e inteligência artificial

A digitalização dos sistemas de abastecimento representa uma das fronteiras mais promissoras para o aumento da eficiência energética no setor de saneamento. A integração de dispositivos de Internet das Coisas (IoT), como sensores de pressão, medidores de vazão e detectores acústicos de vazamentos, com sistemas SCADA e infraestrutura de medição avançada (AMI), possibilita o monitoramento em tempo real e a detecção precoce de ineficiências e anomalias hidráulicas em redes de distribuição (Skoczko, 2025). Além disso, a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina permite prever demandas, identificar padrões de perdas e automatizar decisões operacionais, configurando um novo paradigma para a gestão energética em sistemas de abastecimento de água.

Análise integrada das estratégias

Os resultados compilados evidenciam que as estratégias de eficiência energética em sistemas de bombeamento não são excludentes, mas complementares. O redimensionamento adequado das bombas estabelece a base para que as demais intervenções sejam eficazes: de pouco adianta instalar inversores de frequência em uma bomba estruturalmente superdimensionada sem corrigir primeiro o projeto hidráulico. Da mesma forma, motores de alta eficiência atingem seu pleno potencial quando associados a VFDs e a sistemas de controle que garantam operação contínua próxima ao BEP.

A otimização do agendamento operacional, por sua vez, potencializa os ganhos tecnológicos ao explorar variações tarifárias e de demanda, reduzindo custos mesmo sem substituição de equipamentos. Por fim, as tecnologias digitais funcionam como camada transversal que amplia a efetividade de todas as demais estratégias, ao fornecer dados em tempo real para tomada de decisão.

Assim, a maior eficiência energética em sistemas de abastecimento tende a ser alcançada por meio de abordagens integradas, que combinem intervenções físicas nos equipamentos com automação, monitoramento contínuo e otimização operacional.

CONCLUSÃO

A revisão realizada evidencia que há um amplo conjunto de estratégias tecnológicas e operacionais capazes de reduzir substancialmente o consumo energético em sistemas de bombeamento para abastecimento de água. Os maiores ganhos individuais são obtidos com o uso de inversores de frequência (30–50% de economia), seguidos pela correção do superdimensionamento de bombas (15–25%), pela adoção de motores PMSM em poços profundos (aproximadamente 7% de ganho de eficiência global) e pela otimização do agendamento operacional por métodos MILP.

A combinação dessas estratégias com tecnologias emergentes de monitoramento em tempo real baseadas em IoT, SCADA e inteligência artificial configura um cenário de alto potencial de transformação do setor. Para o contexto brasileiro, onde os sistemas de saneamento enfrentam desafios de infraestrutura e custos tarifários crescentes, a adoção integrada dessas soluções representa não apenas uma oportunidade de redução de custos operacionais, mas também de contribuição para metas de sustentabilidade energética e ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP) pelo apoio financeiro por meio de concessão de bolsas de estudo.

REFERÊNCIAS

Beck, M.; Sperlich, A.; Blank, R.; Meyer, E.; Binz, R.; Ernst, M., 2018. Increasing Energy Efficiency in Water Collection Systems by Submersible PMSM Well Pumps. Water, v. 10. Disponível em: https://www.mdpi.com.

de Souza, D.F.; da Guarda, E.L.A.; Sauer, I.L.; Tatizawa, H., 2021. Energy Efficiency Indicators for Water Pumping Systems in Multifamily Buildings. Energies, v. 14. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en14217152

Duan, B.; Gao, J.; Cao, H.; Hu, S., 2025. Energy-Efficient Management of Urban Water Distribution Networks Under Hydraulic Anomalies: A Review. Energies. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en18112877

Electrical Engineering Portal. 14 energy efficiency improvement opportunities in pumping systems. Disponível em: https://electrical-engineering-portal.com/14-energy-efficiency-improvement-opportunities-in-pumping-systems. Acesso em: maio de 2026.

Kalaiselva, A. S. V.; Subramaniam, U.; Shanmugam, P.; Hanigovszki, N., 2016. A Comprehensive Review on Energy Efficiency Enhancement Initiatives in Centrifugal Pumping System. Applied Energy 181 (2016) 495–513. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.070

Luna, T.; Ribau, J.; Figueiredo, D.; Alves, R., 2018. Improving Energy Efficiency in Water Supply Systems with Pump Scheduling Optimization. Journal of Cleaner Production 213 (2019) 342e356. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.190

Martin-Candilejo, A.; Santillán, D.; Garrote, L., 2020. Pump Efficiency Analysis for Proper Energy Assessment in Optimization of Water Supply Systems. Water, v. 12. Disponível em: https:// doi:10.3390/w12010132

Perroni, R. A.; Wendland, E., 2006. Avaliação da Eficiência Energética em Poços Profundos Utilizados para Abastecimento Público. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Disponível em: https://revistas.abrhidro.org.br/article.php?Article=391.

Rocha, J.; Barros, R. Ganho de Eficiência Energética em Estações de Bombeamento de Água: uma revisão. UNILAB. Disponível em: https://repositorio.unilab.edu.br/jspui/handle/123456789/7336.

Rodrigues, 2024. Análise de Eficiência Energética em Sistema de Abastecimento de Água. Dissertação (Mestrado). UFMS. Disponível em: https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/9637.

Shao, Y.; Zhou, X.; Yu, T.; Zhang, T.; Chu, S., 2024. Pump Scheduling Optimization in Water Distribution System Based on Mixed Integer Linear Programming. European Journal of Operational Research 313 (2024) 1140–1151. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.08.055

Skoczko, I. 2025. Energy Efficiency Analysis of Water Treatment Plants: Current Status and Future Trends. Energies. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en18051086

Sperlich, A.; Pfeiffer, D.; Burgschweiger, J.; Campbell, E.; Beck, M.; Gnirss, R.; Ernst, M., 2018. Energy Efficient Operation of Variable Speed Submersible Pumps: Simulation of a Ground Water Well Field. Water, v. 10. Disponível em: https:// doi:10.3390/w10091255