



I CONGRESSO PERNAMBUCANO DE RECURSOS HÍDRICOS

Água para o Desenvolvimento
Recife, 24, 25 e 26 de Março de 2026

APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO NA MINIMIZAÇÃO DE CUSTOS ENERGÉTICOS EM UM SISTEMA ADUTOR

*Pedro Henrique Leite de Lima¹ ; Saulo de Tarso Marques Bezerra²; Sabrina da Silva
Corrêa Raimundo³ & Armando Dias Duarte⁴.*

Palavras-chave: gerenciamento hídrico, eficiência energética, algoritmo genético.

INTRODUÇÃO

O gerenciamento operacional dos sistemas de abastecimento de água no Brasil enfrenta desafios significativos, resultando em falhas na qualidade dos serviços, como interrupções frequentes e grandes perdas. As decisões dos profissionais da área muitas vezes não priorizam as alternativas mais eficientes e econômicas, levando a custos elevados para as empresas. Por outro lado, a escassez e a distância dos mananciais exigem a implementação de sistemas adutores complexos para o abastecimento urbano, os quais demandam um controle operacional refinado.

Diante desse cenário, é fundamental que haja um gerenciamento operacional otimizado, que considere a relação direta entre a demanda de água e o custo energético associado. Isso significa que é preciso encontrar um equilíbrio entre o volume de água transportado e o consumo de energia elétrica, visando minimizar os custos operacionais.

As estações elevatórias representam uma parte considerável dos custos operacionais no setor de saneamento, com o consumo energético desses sistemas no Brasil correspondendo a cerca de 3% do total de energia consumida no país, somando R\$ 9 bilhões em despesas em 2022, com 12,6 TWh destinados ao abastecimento (SNIS, 2022). Em nível global, os sistemas urbanos de água consomem entre 1% e 4% da eletricidade de um município (Souza *et al.*, 2021) e podem significar até 65% do orçamento de uma concessionária (Chen *et al.*, 2021), sendo que 20% da eletricidade mundial é utilizada em bombeamento. O que enfatiza a necessidade urgente de adotar medidas para otimizar o consumo de energia e alcançar economias significativas, mesmo com pequenas melhorias na eficiência.

Os sistemas adutores de água têm componentes que precisam ser frequentemente ajustados para atender às variações de demanda, seguindo restrições que garantem a confiabilidade do abastecimento, como manter níveis mínimos nos reservatórios e assegurar pressões adequadas nos pontos de consumo. A otimização desses sistemas é complexa, pois envolve um equilíbrio entre a minimização de custos operacionais e a

¹) Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. p_henriqueleitelima@hotmail.com

²) Professor Adjunto do Campus do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. s.bezerra@yahoo.com.br

³) Professora Assistente da Unidade Acadêmica de Belo Jardim da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE. sabrina.correa@ufrpe

⁴) Professor Assistente da Universidade Federal do Oeste da Bahia - UFOB. armando.dias@ufpe.br

manutenção da qualidade do serviço, já que a redução de custos pode tornar o sistema mais vulnerável. Para enfrentar esses desafios, é essencial desenvolver pesquisas que empreguem algoritmos de otimização, levando em conta as diversas restrições e variáveis que impactam a operação do sistema. A abordagem integrada e multidisciplinar é vital para otimizar processos, garantir a qualidade do serviço e a sustentabilidade do abastecimento de água.

Diante do exposto, esta pesquisa objetiva o desenvolvimento de um modelo computacional para a otimização de sistemas adutores de água complexos com múltiplas fontes de água e reservatórios de acumulação e distribuição.

METODOLOGIA

A pesquisa empregou algoritmos evolutivos para determinar a melhor regra operacional em sistemas adutores complexos, com o objetivo de minimizar os custos com energia elétrica, respeitando todas as restrições impostas, como as limitações de atendimento às vazões e as restrições físicas e operacionais dos sistemas.

O método de otimização utilizado é o Algoritmo Genético, por sua adequada aplicação ao tipo de problema estudado. Para o desenvolvimento da metodologia, foi elaborado um algoritmo em Python, integrando duas bibliotecas: JMetalPY e Epanettools. A biblioteca JMetal é um conjunto de classes voltadas à resolução de problemas de otimização multiobjetivo, baseando-se em algoritmos evolutivos. O Epanettools é uma biblioteca de código aberto que fornece funções e classes para acessar e manipular dados de simulações hidráulicas de redes de distribuição de água, sendo baseada no software EPANET.

No problema proposto, a função objetivo visa à minimização dos custos de energia elétrica associados às estações elevatórias do sistema adutor. O custo de energia elétrica relativo à operação de um conjunto motobomba, durante determinado intervalo de tempo, é calculado com base na potência consumida e na tarifa cobrada (Equação 1).

$$C_b = PM \cdot T_e \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$PM = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{\eta} \quad (2)$$

$$H_m = a_1 Q^2 + b_1 Q + c_1 \quad (3)$$

$$\eta = a_2 Q^2 + b_2 Q + c_2 \quad (4)$$

Onde C_b é o custo energético (R\$), PM a potência motriz (kW), T_e o custo unitário da tarifa de consumo (R\$/kWh), Δt o intervalo de tempo de operação da bomba (h), γ o peso específico do líquido (N/m³), Q a vazão recalçada (m³/s), H_m a altura manométrica total (m), η o rendimento global do conjunto motobomba, a_1 , b_1 , c_1 , a_2 , b_2 e c_2 são coeficientes de ajustes das curvas, que dependem das curvas características do sistema adutor e da bomba.

Os custos de operação das bombas consideraram duas categorias: consumo e demanda de energia elétrica dentro do horário de ponta, e consumo e demanda fora do horário de ponta. Dessa forma, temos que a função objetivo, que corresponde ao custo de bombeamento (R\$), foi representado pela Equação 5.

$$C_b = \sum_{i=1}^B \sum_{t=1}^T \frac{g \cdot Q_{it} \cdot Hm_{it} \cdot Tc_{it} \cdot \Delta t}{\eta_{it}} + \sum_{i=1}^E \sum_{d=1}^D Td_{id} \cdot Md_{id} \quad (5)$$

Onde i e t representam, respectivamente, uma bomba qualquer em um tempo qualquer, g é aceleração da gravidade (m/s²), Q_{it} é a vazão da bombeada (m³/s), Hm_{it} é a altura manométrica inserida pela bomba (m), Tc_{it} é a tarifa de consumo (R\$/kWh), η_{it} é o rendimento do conjunto motor bomba, Δt é o intervalo de tempo analisado (h), Td_{id} é a tarifa de demanda (R\$/kW), e Md_{id} é a máxima demanda calculado durante o ciclo operacional (kW).

RESULTADOS

O modelo de otimização foi aplicado ao Sistema Adutor de Botafogo, localizado em Recife – PE, Nordeste do Brasil. A análise permitiu identificar combinações específicas de operação dos conjuntos motobomba que não apenas garantem o atendimento contínuo à demanda hídrica, como também contribuem para a redução dos custos operacionais.

O consumo de energia elétrica e os custos de cada alternativa estão descritos nas Tabelas 1. De acordo com os resultados, observa-se uma redução significativa nos custos operacionais das alternativas otimizadas em comparação com a operação padrão.

Tabela 1 – Energia consumida e custos mensais de cada cenário.

Cenário	Energia total consumida mensal (MWh)	Custo mensal (R\$)			Economia
		Consumo	Demanda	Total	
Operação padrão	2280	3.045.687,11	316.173,20	3.361.860,31	-
Otimizado	1621	2.179.105,21	306.300,42	2.485.405,63	35,26%

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo não apenas validam a abordagem proposta, como também abrem caminho para futuras investigações que possam integrar variáveis hidrológicas ao modelo de otimização. Essa evolução é fundamental para avançar na gestão eficiente de sistemas de abastecimento de água, assegurando a sustentabilidade dos recursos hídricos e a eficácia no fornecimento de água à população.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio concedido ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

CHEN, Y.; ZHAO, X.; ZHANG, L. Optimization of the operation of water distribution systems with emphasis on the joint optimization of pumps and reservoirs. *Water Supply*, v. 21, n. 2, p. 765-777, 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Ministério das Cidades. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis>. Acesso em: 20 out. 2023.

SOUZA, D.; GUARDA, E.; SAUER, I.; TATIZAWA, H. Energy efficiency indicators for water pumping systems in multifamily buildings. *Energies*, v. 14, n. 21, p. 7152, 2021