



I CONGRESSO PERNAMBUCANO DE RECURSOS HÍDRICOS

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

ANÁLISE COMPARATIVA DE ALGORITMOS BIO-INSPIRADOS APLICADOS NA OTIMIZAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

*Gabriel Xavier de Holanda Cavalcanti*¹; *Gladistony Silva Lins*²; *Ivan da Silva Nunes*³; *Sabrina da Silva Corrêa Raimundo*⁴; *José Eloim Silva de Macêdo*⁵ & *Saulo de Tarso Marques Bezerra*⁶

Palavras-chave: Algoritmo Genético, *Particle Swarm Optimization*, Inteligência Artificial, WNTR.

INTRODUÇÃO

O design ótimo de Redes de Distribuição de Água (RDA) constitui um dos desafios mais complexos e fundamentais da engenharia hidráulica contemporânea (MACÊDO; BEZERRA, 2017). Em um cenário global pressionado pela escassez de recursos hídricos, urbanização acelerada e restrições orçamentárias severas, a eficiência das infraestruturas de saneamento tornou-se imperativa (BEZERRA; CHEUNG, 2013). O problema central de projeto transcende o simples dimensionamento hidráulico; trata-se de determinar a combinação ideal de diâmetros comerciais para cada tubulação da malha que minimize o custo total de investimento, assegurando simultaneamente o atendimento às demandas dos usuários e o cumprimento estrito de restrições operacionais, como pressões nodais mínimas e velocidades máximas de escoamento.

Matematicamente, este problema é classificado como de Otimização Combinatória Não-Linear Inteira Mista (MINLP) e pertence à classe de problemas NP-hard (Non-deterministic Polynomial-time hard) (Mala-Jetmarova, H., Sultanova, N., & Savic, D, 2018). A complexidade advém da natureza discreta das variáveis de decisão (diâmetros comerciais disponíveis), combinada com a não-linearidade das equações de perda de carga (como Hazen-Williams ou Darcy-Weisbach) e a não-convexidade da região viável (TODINI; PILATI, 1988). Tais características tornam os métodos de otimização determinísticos clássicos — como a Programação Linear ou o Método do Gradiente — frequentemente ineficazes, propensos a estagnar em ótimos locais ou inviável computacionalmente devido ao grande espaço de busca.

Historicamente, os Algoritmos Genéticos (GA) consolidaram-se como a abordagem estocástica padrão para contornar essas limitações, oferecendo robustez na exploração de espaços de busca discretos (MAIER et al., 2019). No entanto, a demanda por soluções de maior qualidade

¹ Graduando em Engenharia Hídrica na Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. gabriel.xaviercavalcanti@ufrpe.br.

² Graduando em Engenharia da Computação na Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. gladistony.silva@ufrpe.br.

³ Graduando em Engenharia Civil na Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. ivan.nunes@ufpe.br.

⁴ Professor Adjunto da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. saulo.tarso@ufpe.br.

⁵ Professor Assistente da Universidade Federal do Sul da Bahia – UFSB. eloim_sm@hotmail.com.

⁶ Professor Adjunto da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. saulo.tarso@ufpe.br.

em tempos computacionais reduzidos motivou a transição para algoritmos baseados em Inteligência de Enxame (Swarm Intelligence) (MENEZES *et al.*, 2022).

Neste contexto, este trabalho propõe uma análise comparativa entre o GA clássico e quatro algoritmos emergentes de inteligência de enxame: *Particle Swarm Optimization* (PSO) (KENNEDY; EBERHART, 1995), *Artificial Bee Colony* (ABC) (KARABOGA, 2005), *Grey Wolf Optimizer* (GWO) (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014) e *Whale Optimization Algorithm* (WOA) (MIRJALILI; LEWIS, 2016). O estudo investiga a eficácia destes métodos sob uma perspectiva multidimensional, avaliando não apenas o custo final obtido, mas também a estabilidade estatística (robustez), a velocidade de convergência e o comportamento dinâmico frente a benchmarks de diferentes escalas, abrangendo desde redes de pequeno porte (Two-Loop) até sistemas complexos de grande escala (Balerma).

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho fundamenta-se na modelagem matemática rigorosa do problema de dimensionamento de RDAs e na aplicação sistemática de cinco algoritmos metaheurísticos (GA, PSO, ABC, GWO, WOA). O estudo foi conduzido em um ambiente computacional desenvolvido em Python, utilizando a biblioteca WNTR para interfacear com o motor de simulação hidráulica do EPANET, garantindo a fidelidade física das avaliações.

A Função Objetivo foi formulada para minimizar o custo de investimento calculado em função do comprimento das tubulações e do custo unitário dos diâmetros comerciais selecionados ao mesmo tempo em que verifica as restrições da rede. A função objetivo C_{total} é expressa como através da Equação 1:

$$C_{total} = \sum_{i=1}^{N_p} C(D_i) \cdot L_i + P_{penalty} \quad (1)$$

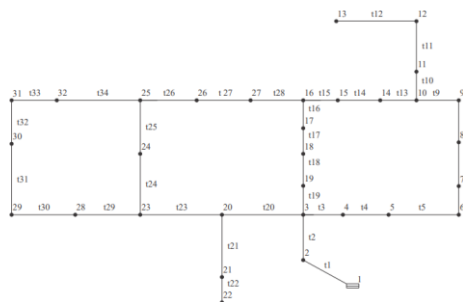
Onde N_p é o número de tubulações; L_i é o comprimento da tubulação i ; D_i é o diâmetro selecionado do conjunto discreto $\{d_1, d_2, \dots, d_K\}$ na tubulação i ; e $C(D_i)$ é o custo unitário.

O termo $P_{penalty}$ representa um custo fictício aplicado apenas quando há violação das restrições, essencial para guiar metaheurísticas (que são métodos de otimização irrestrita) de volta à região viável do espaço de busca. Neste trabalho, as restrições estão relacionadas com as pressões mínimas admissíveis.

RESULTADOS

Os algoritmos bio-inspirados foram aplicados na rede clássica na literatura Hanoi network problem (FUJIWARA; KHANG, 1990). A rede é composta por 3 anéis, 34 trechos, 32 nós e 1 reservatório de nível fixo com cota piezométrica de 100 mca detalhada na Figura 1. A pressão mínima exigida é de 30 mca em todos os nós. A fórmula de Hazen-Williams, com o valor da constante numérica de conversão ω de 10,6792 adotado pelo EPANET 2.00.12, e o coeficiente de rugosidade de 130 foram adotados para o cálculo de perda de carga em todos os trechos.

Figura 1: Layout do Hanoi Network problem



Fonte: MACÊDO (2018).

Para resolver o problema, existem 6 possíveis diâmetros disponíveis, descritos na Tabela 1. Embora aparentemente seja uma rede simples, existe $6^{34} \approx 2,8 \times 10^{26}$ soluções potenciais. O que justifica a utilização dos algoritmos metaheurísticos para a solução deste problema.

Tabela 1: Custo das tubulações do Hanoi Network problem

Diâmetro (pol)	Custo (\$/m)
12	45,73
16	70,40
20	98,38
24	129,30
30	180,80
40	278,30

Fonte: FUJIWARA; KHANG (1990)

Os resultados da aplicação dos algoritmos bio-inspirados em Hanoi Network problem estão descritos na Tabela 2. O algoritmo genético obteve o menor custo absoluto (melhor precisão), enquanto os modelos baseados em enxame (GWO, WOA, ABC, PSO) foram significativamente mais rápidos.

Tabela 2: Comparação do Desempenho dos Algoritmos de Otimização (Melhores Resultados)

Algoritmo	Melhor Custo (\$)	Tempo (s)	Parâmetros de Destaque
GA (Genetic)	6.157.178,40	92,31	Pop: 70, Ep: 100, Mut: 0,15
GWO (Wolf)	6.160.245,60	12,85	Pop: 20, Ep: 50
WOA (Whale)	6.160.245,60	13,01	Pop: 20, Ep: 50
ABC (Bee)	6.302.545,30	13,42	Pop: 20, Ep: 50
PSO (Swarm)	6.927.546,40	13,09	Pop: 20, Ep: 50, w=0,4

Nota: Todos os modelos utilizaram Heurística (Warm Start).

Entre os algoritmos analisados, o GA (Algoritmo Genético) obteve a maior precisão, atingindo o custo mínimo de \$6.157.178,40. Este desempenho deve-se à sua capacidade de refinamento através de taxas de mutação controladas, embora tenha exigido um tempo computacional significativamente superior aos demais (92,31 s).

Em contrapartida, os modelos GWO e WOA apresentaram a melhor eficiência operacional. Ambos alcançaram custos praticamente idênticos ao GA, mas com uma redução drástica de 86% no tempo de processamento (aproximadamente 13 s). O ABC e o PSO, apesar de rápidos, demonstraram maior suscetibilidade a ótimos locais, com custos ligeiramente superiores.

CONCLUSÕES

Conclui-se que a utilização de algoritmos bio-inspirados para o dimensionamento ótimo de redes de distribuição de água pode ser uma ferramenta apropriada e utilizada em projetos hidráulicos.

REFERÊNCIAS

BEZERRA, S. T. M.; CHEUNG, P. B. *Perdas de Água - Tecnologias de Controle*. 1. ed. João Pessoa: Editora UFPB, 2013.

de Melo Menezes, B. A., Kuchen, H., & Buarque de Lima Neto, F. (2022). *Parallelization of Swarm Intelligence Algorithms: Literature Review*. *International Journal of Parallel Programming*, 50, 486–514. <https://doi.org/10.1007/s10766-022-00736-3>

FUJIWARA, O.; KHANG, B. A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks. *Water resources research*, v. 26, n. 4, p. 539-549, 1990

KARABOGA, D. *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*. [S.l.], 2005.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: IEEE. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. [S.l.], 1995. v. 4, p. 1942–1948.

MACÊDO, José Eloim Silva de; BEZERRA, Saulo de Tarso Marques. Dimensionamento ótimo de sistemas de distribuição de água via Particle Swarm Optimization. In: XV Seminário Iberoamericano de Redes de Água e Drenagem (SEREA 2017), 2017. Anais [...]. Caruaru: Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

MACÊDO, J. E. S. *Dimensionamento Ótimo de Sistemas de Distribuição de água via Particle Swarm Optimization*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

Maier, H. R., et al. (2019). *Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: Past, present, and future*. *Water Resources Research*, 55(4), 2537-2599.

Mala-Jetmarova, H., Sultanova, N., & Savic, D. (2018). *Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system design*. *Water*, 10(3), 307.

MIRJALILI, S.; LEWIS, A. The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*, Elsevier, v. 95, p. 51–67, 2016.

MIRJALILI, S.; MIRJALILI, S. M.; LEWIS, A. Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, Elsevier, v. 69, p. 46–61, 2014.

TODINI, E.; PILATI, S. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. In: COULBECK, B.; ORR, C. H. (Ed.). *Computer Applications in Water Supply*. London, UK: Research Studies Press, 1988. p. 1–2