

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

OBTENÇÃO DE NOVA ESTRATEGIA OPERACIONAL OTIMIZADA EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO UMA PROPOSTA DE BENCHMARK PARA REDE RAMIFICADA

Alex Takeo Yasumura Lima Silva¹ ; Fernando das Graças Braga da Silva², Lorena Lemos Dias Lara³, Sara Maria Marques⁴ & Cláudio Abiar Lourenço⁵

Abstract: Water distribution is important to society in order to meet its basic and economic needs. Therefore, its optimal operation is essential to avoid losses caused by leaks, avoiding increasing pressure on water sources. However, many studies seek bold operational strategies, which can be difficult to implement in sanitation companies in small cities, compromising the budget. Therefore, a simpler operational strategy was sought, capable of complying with the NBR 12218 standard and avoiding the use of a pump and a valve, reducing its implementation costs.

Keywords – Genetic Algorithms, Optimization, Water Distribution Systems

Resumo: A distribuição de água é importante para a sociedade de modo a atender suas necessidades básicas e econômicas. Portanto, sua operação ótima é essencial para evitar perdas causadas por vazamentos, evitando aumentar a pressão nos mananciais. Assim, a simulação computacional mostra-se uma possibilidade para a obtenção de estratégias ótimas, no entanto, para permitir a comparação entre algoritmos de otimização, os benchmarks mostram-se indispensáveis para tais simulações. Este trabalho, portanto, apresenta uma proposta de benchmark para rede ramificada e realizou otimização utilizando algoritmos genéticos, obtendo nova estratégia operacional visando economia de implantação face ao cenário anterior.

Palavras-Chave – Algoritmos genéticos, Otimização, Redes de Distribuição de Água

INTRODUÇÃO

A água é um recurso importante para o ser humano, seja pela sua saúde ou pelo seu uso econômico (Rossato et al., 2024). Assim, a infraestrutura responsável pela sua distribuição a população são as redes de distribuição de água, sendo um componente fundamental em um sistema urbano. Dado a velocidade atual da urbanização, tais sistemas vem enfrentando desafios para atender a população sem exercer maior pressão nas nascentes (Chini; Stillwell, 2018; Silqueira et al., 2021).

Como em todo sistema real, existem perdas, que podem ser classificadas em aparentes ou comerciais, fruto de ligações clandestinas, erros em leituras de hidrômetros e reais, ocasionadas por vazamentos (Mutikanga; Sharma; Vairavamoorthy, 2009, 2013). Assim uma maneira de se manter o atendimento adequado a população ao mesmo tempo que se reduz a pressão nas nascentes é a gestão

1) Universidade Federal de Itajubá. Rua Irmã Ivone Drummond, 200, Itabira, Minas Gerais. Email: alex.takeo@unifei.edu.br

2) Universidade Federal de Itajubá: Av. BPS, 1303, Itajubá, Minas Gerais. Email: fernandobraga@unifei.edu.br

2) Universidade Federal de Itajubá: Av. BPS, 1303, Itajubá, Minas Gerais. Email: lorenaldlara@unifei.edu.br

4) Universidade Federal de Itajubá: Av. BPS, 1303, Itajubá, Minas Gerais. Email: saramarques.eng.civil@gmail.com

5) Universidade Federal de Itajubá: Av. BPS, 1303, Itajubá, Minas Gerais. Email: claudioabiar@unifei.edu.br

das pressões no sistema, em especial sua manutenção nos valores preconizados pela NBR 12218, que são 10 m.c.a e 40 m.c.a., sendo tolerado até 50 m.c.a. na rede em casos específicos (ABNT, 2017).

Uma boa estratégia para a gestão das pressões é o emprego de técnicas de otimização para estabelecimento de estratégias operacionais que permitam obter pressões dentro das faixas preconizadas (Creaco; Franchini, 2013; Creaco; Pezzinga, 2015). Nesse sentido, diversos trabalhos foram feitos com o objetivo de se estabelecer estratégias operacionais, desde trabalhos como os de Van Zyl, Savic e Walters (2004), (Gino Sophia et al., 2020; Gupta; Gupta; Khanna, 1999; Lara et al., 2024; Savic; Walters, 1997; Silva et al., 2020) todos tendo em comum o emprego de algoritmos genéticos para a operação otimizada de redes de distribuição de água.

Contudo, diferentes tipos de algoritmos podem levar a resultados diferentes, podendo ser mais ou menos eficientes conforme o tipo de rede de distribuição a ser otimizado. Assim, torna-se necessário estabelecer padrões de redes de distribuição de água para que se comparem diferentes algoritmos de otimização, bem como seus diferentes ajustes e variáveis. Portanto, os benchmarks são redes padronizadas, teóricas, que simulam situações e problemas reais, conforme (Mendonça e Medina (2025).

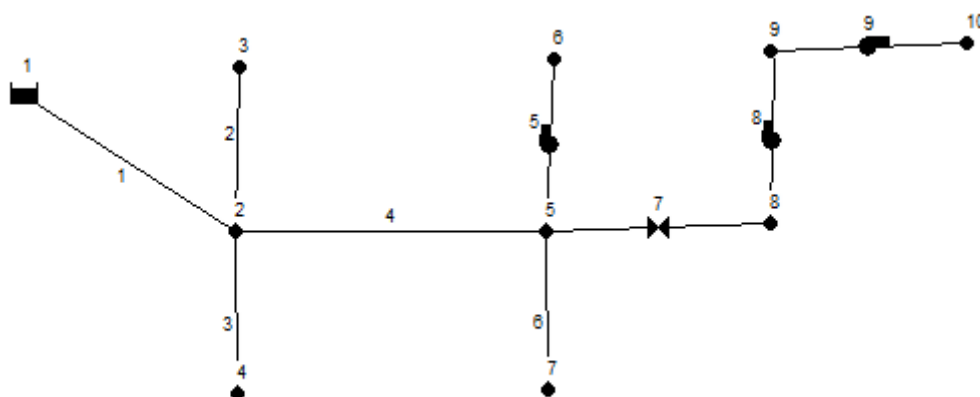
As redes *benchmark* podem ser utilizadas para testar e comparar algoritmos de otimização, uma vez que, por estarem prontas, dispensam o tempo de modelagem da rede, permitindo canalizar tempo e esforços em seus ajustes, bem como verificações de eficiência nas obtenções de soluções ótimas, havendo até mesmo eventos como o “Battle of Water Networks” destinados a esse tipo de análise (Rahmani et al., 2018)

No entanto, até o presente momento não se conhecem benchmarks de redes de pequeno porte ramificadas, portanto, este trabalho, visa propot uma rede benchmark ramificada baseada em Silva et al. (2020) e realizar uma otimização de modo ase obter uma operação eficiente ao mesmo tempo que se reduzem os custos de implantação e operação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho, foi utilizada uma variação da rede de distribuição de água de Silva et al. (2020), na configuração com 3 bombas e uma válvula conforme Figura 1. Para desenvolver a rede, foi utilizado o software EPANET.

Figura 1 - Rede adaptada de Silva et al. (2020).



As elevações dos nós são dadas pela Tabela 1, baseada em Silva et al. (2020).

Tabela 1 - Elevações e consumo dos nós.

Nós	Elevação (m)	Demanda (l/s)
1 (RNF)	825	N/A
2	800	8,5
3	795	9,0
4	792	9,5
5	780	14,0
6	810,5	15,0
7	778,5	15,0
8	750	7,0
9	765,5	8,0
10	812,5	9,0

Os dados das tubulações aqui apresentados são baseados também de Silva et al. (2020), conforme Tabela 2:

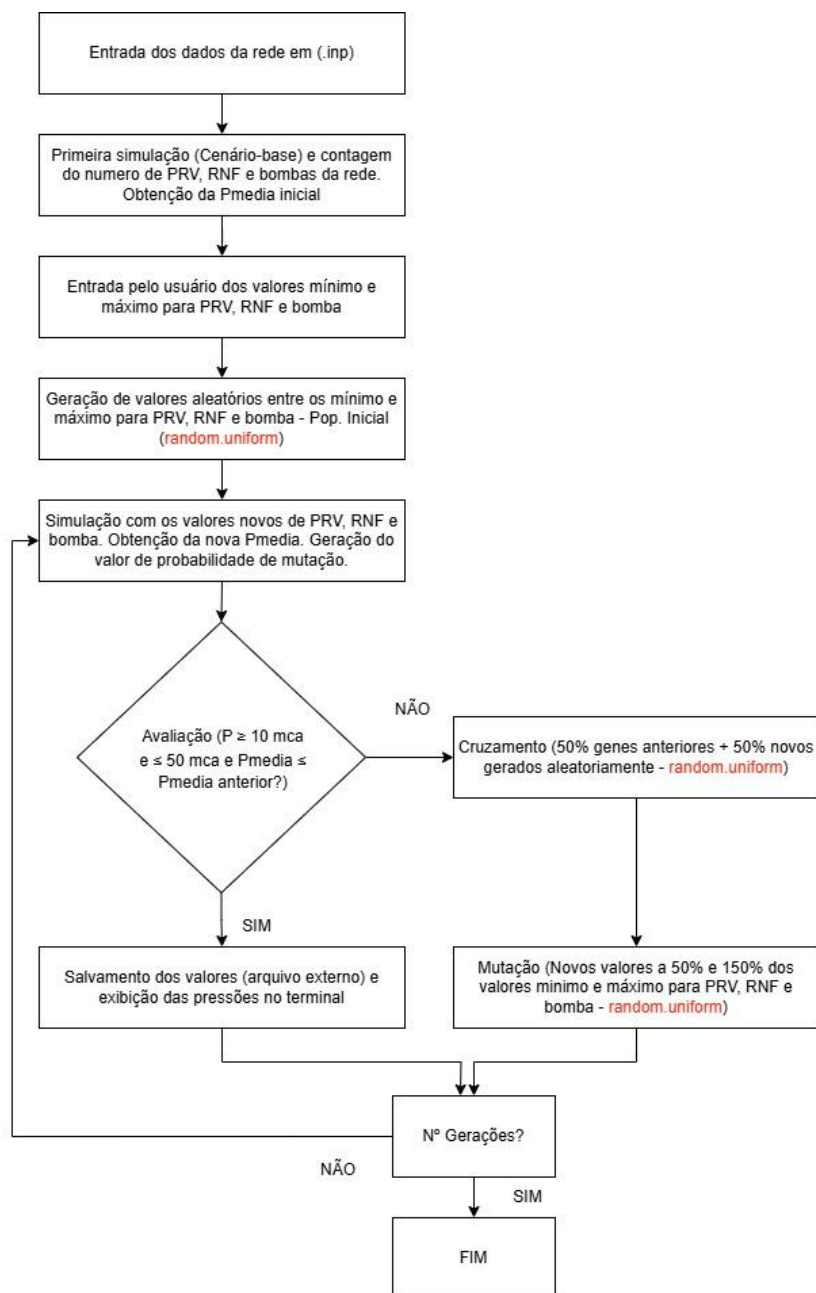
Tabela 2 - Dados das tubulações

Tubulação	Nós ligados	Rugosidade (mm)	Diâmetro (m)	Comprimento (m).
1	1-2	0.25	0.400	1500
2	2-3	0.25	0.300	950
3	2-4	0.25	0.300	900
4	2-5	0.25	0.400	1750
5	5-6	0.25	N/A	1100
6	5-7	0.25	0.300	800
7	5-8	0.25	0.350	1000
8	8-9	0.25	N/A	750
9	9-10	0.25	N/A	500

Deve-se lembrar que o EPANET não atribui diâmetros a tubulações com bombas, enquanto o trecho 7, o qual possui uma válvula redutora de pressão, cujo diâmetro é de 350 mm.

O algoritmo de otimização utilizado foi baseado no de Silva et al. (2020) e Lara et al. (2024) desenvolvido em linguagem Python, visando a otimização da rede conforme a norma brasileira NBR 12218 (ABNT, 2017), explicado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma do algoritmo de otimização



Os valores utilizados para ambas as otimizações foram:

- Gerações: 100.000;
- Cruzamento: 50%;
- Mutação: 5%;
- Nível do Reservatório de Nível Fíxo: 810 a 820;
- Diâmetro das tubulações: Comerciais, de 20 a 500 mm;
- Ajuste de válvulas: de 0 a 100 m.c.a.;
- Rotação das bombas: de 0 a 1 (0 a 100% da rotação nominal).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando-se a rede da Figura 1 e o algoritmo de otimização da figura 2, obteve-se os diâmetros apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados das tubulações otimizadas.

Tubulação	Nós ligados	Rugosidade (mm)	Diâmetro (m)	Comprimento (m).
1	1-2	0.25	0.400	1500
2	2-3	0.25	0.350	950
3	2-4	0.25	0.250	900
4	2-5	0.25	0.400	1750
5	5-6	0.25	N/A	1100
6	5-7	0.25	0.200	800
7	5-8	0.25	0.350	1000
8	8-9	0.25	N/A	750
9	9-10	0.25	N/A	500

Por característica do EPANET, não se atribui diâmetro as tubulações com bombas. Assim, o resultado das pressões obtidas é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultado das pressões após otimização.

Nós	Pressão (m.c.a.)
1 (RNF)	813,81
2	11,74
3	16,71
4	19,57
5	17,61
6	11,24
7	18,03
8	41,94
9	25,16
10	19,26
Média	20,140

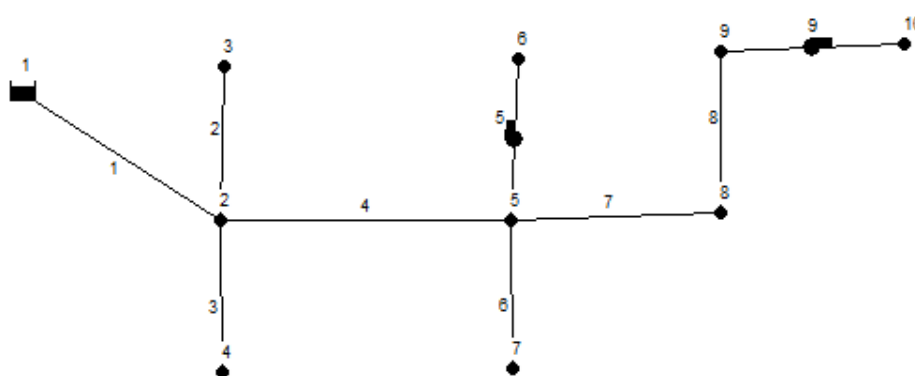
Deve-se observar que nesse novo cenário gerado pelo algoritmo de otimização, a rede possui pressões significativamente mais altas que no resultado de Silva et al. (2020), em especial nos nós 8 e 9, implicando maiores perdas, contudo, como a pressão no nó 7 foi de 41,94 m.c.a., e o ajuste da

válvula redutora de pressão também foi de 41,94 m.c.a., entende-se que o algoritmo de otimização sugere a sua remoção, bem como a da bomba do trecho 8, que opera apenas a 9% da sua rotação.

Assim, os dois componentes foram removidos e substituídos por tubulações de 350 mm de diâmetro, não sendo tal variável decisiva pois durante a otimização, o algoritmo substituiu os valores dos diâmetros em busca de um ponto ótimo. Foram mantidas as bombas dos trechos 7 e 9, que operavam a 83,5% e 95,3% da rotação total, respectivamente.

O trecho 7 então voltou a ter uma tubulação de 1000 metros de comprimento, enquanto o trecho 8 passou a ter 750 m de comprimento, sendo ambas com rugosidade de 0,25 mm e 350 mm de diâmetro, passando a ficar conforme Figura 3.

Figura 3 - Rede após rearranjo eliminando válvula e bomba.



Assim, a nova rede foi submetida a uma nova rodada de otimização, obtendo os seguintes resultados para os diâmetros das tubulações conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados dos diâmetros após otimização da nova rede.

Tubulação	Nós ligados	Rugosidade (mm)	Diâmetro (m)	Comprimento (m).
1	1-2	0.25	0.450	1500
2	2-3	0.25	0.300	950
3	2-4	0.25	0.200	900
4	2-5	0.25	0.400	1750
5	5-6	0.25	N/A	1100
6	5-7	0.25	0.300	800
7	5-8	0.25	0.150	1000
8	8-9	0.25	200	750
9	9-10	0.25	N/A	500

Observa-se que a tubulação 7 teve diâmetro de 150 mm, abaixo dos outros diâmetros, indicando que o algoritmo sugeriu seu uso para conter as pressões no nó 8. A Tabela 6 indica as pressões resultantes do novo arranjo.

Tabela 6 - Resultados das pressões após nova otimização.

Nós	Pressão (m.c.a.)
1 (RNF)	812,05
2	10,91
3	15,85
4	18,40
5	30,21
6	34,86
7	31,57
8	45,49
9	28,70
10	21,54
Média	26,39

Os resultados da nova otimização mostram uma pressão média maior na rede, bem como pressões mais elevadas nos nós 7 em diante, contudo, o nível do reservatório de nível fixo, bem como a pressão no nó 2 tornaram-se menores que do cenário anterior. Observa-se que diante do novo cenário, o algoritmo obteve uma condição operacional potencialmente viável em condições de restrições orçamentárias para a implantação da estratégia operacional ótima prevista por Silva et al. (2020).

Deve-se observar a problemática da redução das perdas não apenas na questão da redução da pressão média, o que naturalmente é desejável, mas também na questão técnica e financeira, uma vez que evitar o uso de bombas e válvulas reduz o custo da intervenção na rede de distribuição, viabilizando seu emprego em regiões menos favorecidas financeiramente ou com recursos técnicos comprometidos.

É possível também simular cenários com maior número de gerações (iterações), buscando varrer um espectro maior de soluções, com possível eliminação de mais uma bomba. Contudo, durante testes do algoritmo até o presente momento, notou-se que não foi capaz de gerar nenhuma solução dentro da NBR 12218 sem o uso de bombas ou válvulas. Recomenda-se, portanto, em trabalhos futuros, o emprego da rede benchmark com outros algoritmos de otimização visando a busca de novas soluções para seus problemas de operação.

CONCLUSÃO

Este trabalho, através do emprego de uma rede ramificada de distribuição de água, traz a possibilidade de um novo benchmark com a problemática de operação em condições de topografia desfavoráveis, para avaliação de algoritmos de otimização em redes de distribuição de água visando a redução das perdas através da redução das pressões médias.

A possibilidade aqui apresentada é diferente da obtida em Silva et al. (2020), dispensando a instalação da válvula e de uma das bombas, o que pode resultar em uma economia significativa de recursos na instalação, manutenção e operação da rede. Contudo, cabe lembrar que tal solução, ainda que mais econômica do ponto de vista de implantação, é menos econômica a longo prazo uma vez que as perdas maiores podem compensar a economia inicial da implantação menos custosa.

Contudo, há de se lembrar que há empresas de saneamento, muitas vezes autarquias municipais, que não dispõem de caixa e/ou capacidade técnica suficiente para implementar projetos arrojados, portanto, uma abordagem mais simples, capaz de gerar alguma economia resultante da redução das perdas é melhor que nada, sendo desejável face a não intervenção. Ademais, a melhoria técnica inicial e a economia subsequente podem gerar recursos para melhorias posteriores, com maiores reduções de perda ao longo do tempo.

O fato da rede ser relativamente pequena permite uma rápida execução computacional, permitindo testes mais rápidos face a redes mais complexas e maiores, além de ser ramificada, permitindo até mesmo testes em redes neurais para aprendizado de operação em tais condições. Assim, a rede aqui apresentada mostra-se uma nova proposta de *benchmark* para testes de algoritmos de otimização visando a solução de problemas em redes ramificadas de forma rápida.

AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho agradecem ao Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos – NUMMARH, pelo apoio oferecido para a execução do trabalho

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12218**: Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- CHINI, Christopher M.; STILLWELL, Ashlynn S. The State of U.S. Urban Water: Data and the Energy-Water Nexus. **Water Resources Research**, v. 54, n. 3, p. 1796–1811, 2018.
- CREACO, E.; FRANCHINI, M. A new algorithm for real-time pressure control in water distribution networks. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 13, n. 4, p. 875–882, 2013.
- CREACO, E.; PEZZINGA, G. Embedding linear programming in multi objective genetic algorithms for reducing the size of the search space with application to leakage minimization in water distribution networks. **Environmental Modelling and Software**, v. 69, p. 308–318, 1 jul. 2015.
- GINO SOPHIA, S. G. *et al.* Water management using genetic algorithm-based machine learning. **Soft Computing**, v. 24, n. 22, p. 17153–17165, 1 nov. 2020.
- GUPTA, Indrani; GUPTA, A.; KHANNA, P. **Genetic algorithm for optimization of water distribution systems** *Environmental Modelling & Software*. [S.l.: S.n.].
- LARA, Lorena Lemos Dias *et al.* Proposal of a methodology for adjusting hydraulic parameters and pressures using variations of genetic algorithm operators for optimization and reduction of losses in water distribution networks. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 29, 2024.
- MENDONÇA, João Vitor de; MEDINA, Maria Mercedes Gamboa. Benchmark problem library for water distribution system modeling. **RBRH**, v. 30, 2025.
- MUTIKANGA, Harrison E.; SHARMA, S.; VAIRAVAMOORTHY, K. Water loss management in developing countries: Challenges and prospects. **Journal / American Water Works Association**, v. 101, n. 12, p. 57–68, dez. 2009.
- MUTIKANGA, HE; SHARMA, Saroj K.; VAIRAVAMOORTHY, Kalanithy. Methods and tools for managing losses in water distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and management**, v. 139, n. April, p. 166–174, 2013.
- RAHMANI, Farshid *et al.* Optimal Operation of Water Distribution Systems Using a Graph Theory–Based Configuration of District Metered Areas. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 8, p. 04018042, 2018.
- ROSSATO, Marcela Das Chagas *et al.* Avaliação de custos financeiros, energéticos e emissões resultantes do desperdício de energia devido às perdas de água tratada no Brasil. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 20, n. 60, p. 271, 24 ago. 2024.

SAVIC, Dragan A.; WALTERS, Godfrey A. Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 123, n. 2, p. 67–77, 1997.

SILQUEIRA, Matheus Gonçalves *et al.* Methodological analysis for assessing the relation of the energy cost with losses of water – a case study. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e199101220265, 18 set. 2021.

SILVA, Alex Takeo Yasumura Lima *et al.* Proposal of optimal operation strategy applied to water distribution network with statistical approach. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 15, n. 2, p. 1, 26 mar. 2020.

VAN ZYL, Jakobus E.; SAVIC, Dragan A.; WALTERS, Godfrey A. Operational Optimization of Water Distribution Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n. 2, p. 160–170, 2004.