

COMPARAÇÃO ENTRE OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO E DO PROJETO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO CONTROLE DAS PERDAS REAIS

Alex Takeo Yasumura Lima Silva ¹ ; Fernando das Graças Braga da Silva ², Sara Maria Marques ³, Lorena Lemos Dias Lara ⁴, Claudio Abiar Lourenço ⁵, Thais Stefani Drumond Vieira ⁶.

RESUMO – Os recursos hídricos vem sendo cada vez mais pressionados pela urbanização e consequentemente pela elevação do padrão de vida das pessoas. As redes de distribuição de água representam uma infraestrutura fundamental para a qualidade de vida dos cidadãos, sendo que está sujeita a perdas por vazamentos, também chamadas de perdas reais. Assim, o controle de tais perdas mostra-se essencial não apenas para reduzir os impactos ambientais da superexploração dos recursos hídricos, mas também para garantir a segurança hídrica das populações urbanas. Como uma forma de reduzir as perdas reais, a gestão das pressões através da otimização da operação surge como uma solução para o problema, sendo utilizado a técnica de algoritmos genéticos para a obtenção de estratégia operacional otimizada (AG_01), bem como o projeto otimizado dos diâmetros das tubulações (AG_02), gerando dois cenários em relação ao cenário base. Assim, a redução das perdas foi de 13,90% para a AG_01 e 31,32% para AG_02, com valores coerentes comparados a trabalhos similares e mostrando o potencial de intervenções menos invasivas como a AG_01 ou mais invasivas, porém podendo ser aplicadas a prazos maiores, como a AG_02.

Palavras-Chave – Algoritmos genéticos, Distribuição de água, Redução de perdas.

ABSTRACT– Water resources are increasingly pressured by urbanization and, consequently, by the rise in people's living standards. Water distribution networks represent a fundamental infrastructure for the quality of life of citizens, and are subject to losses due to leaks, also called real losses. Thus, controlling such losses is essential not only to reduce the environmental impacts of overexploitation of water resources, but also to guarantee the water security of urban populations. As a way to reduce real losses, pressure management through operational optimization emerges as a solution to the problem, using genetic algorithm techniques to obtain an optimized operational strategy (AG_01), as well as the optimized design of pipe diameters (AG_02), generating two scenarios in relation to the base scenario. Thus, the reduction in losses was 13.90% for AG_01 and 31.32% for AG_02, with values consistent with similar studies and showing the potential of less invasive interventions such as AG_01 or more invasive interventions, but applicable over longer periods, such as AG_02.

Key-words – Genetic algorithms, Losses, Water distribution.

1) Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, Itabira-MG, Email: alex.takeo@unifei.edu.br

2) Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG. E-mail: fernandobraga@unifei.edu.br

3) Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG. E-mail: saramarques.eng.civil@gmail.com

4) Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG. E-mail: lorenaldlara@unifei.edu.br

5) Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG. E-mail: claudioabiar@unifei.edu.br

6) Prof. Água, Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, Itabira-MG, Email: thaisdrumondvieira@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

As perdas são inerentes em sistemas de distribuição de água. Estima-se que em países em desenvolvimento, cerca de 40 a 50% do volume total de água produzido seja perdido nas redes de distribuição de água (RDAs) (Kingdom *et al.*, 2006). Isso ocorre principalmente devido ao excesso de pressão e a falhas estruturais (Mosetlhe *et al.*, 2021; Serafeim *et al.*, 2024). No Brasil, a média de perdas anual, segundo o Ministério das Cidades – SINISA (2025) foi de 39,5% para o ano de 2024.

O controle e mitigação de perdas nas RDAs é essencial e envolve sustentabilidade hídrica, econômica, ambiental e segurança sanitária. Portanto, a operação, otimização e gestão de RDAs é primordial para o fornecimento de água aos consumidores. Por se tratar de sistemas complexos, pesquisas têm utilizado a modelagem e simulação hidráulica para mimetizar e entender o comportamento dinâmico de redes reais, detectar falhas, gerir pressões e propor soluções de intervenção e operação a fim de contribuir para que as RDAs sejam gerenciadas de maneira proativa e assertiva na tomada de decisões (Karadirek *et al.*, 2023; Lara *et al.*, 2024).

Marques *et al.* (2023) determinaram a configuração ótima de uma RDA teórica pelo gerenciamento de pressões, utilizando o EPANET acoplado à linguagem de programação R, com o objetivo de minimizar vazamentos. Os autores consideraram parâmetros como rugosidade e diâmetro das tubulações e níveis de reservatórios, conduzindo simulações pelo método de Monte Carlo. Os resultados indicaram redução de 11,6% nas perdas físicas quando comparada à condição original da rede.

Lara *et al.* (2024) propõem ajuste de parâmetros hidráulicos e pressões, comparando algoritmos aleatórios e genéticos na otimização de duas redes teóricas com pressões acima dos limites recomendados pela NBR 12218. Os resultados demonstraram que ambos os algoritmos conseguiram adequar as pressões aos limites normativos e reduzir significativamente as perdas, alcançando reduções superiores a 30% em alguns cenários.

Najarzadegan e Eskandaripour (2025) otimizam o desempenho hidráulico de duas redes de *benchmark* pelo gerenciamento de pressões por válvulas de controle de fluxo. O estudo utiliza algoritmos genéticos e o algoritmo *Slime Mould*, identificando configurações ótimas com redução de 15% nas flutuações médias de pressão e fornecendo insights práticos aos gestores para melhoria da eficiência de RDAs.

Este trabalho compara, portanto, o emprego de uma estratégia de operação otimizada com um projeto otimizado incluindo os diâmetros das tubulações para averiguar o desempenho na redução de perdas na distribuição de água em uma rede teórica e comparar com outros trabalhos que empregam técnicas semelhantes.

que permite utilizar pacotes e comandos da linguagem R no Python, conforme pode ser visto com maiores detalhes em Silva (2023).

No mesmo ambiente de programação, foi criado o algoritmo de otimização que consiste em Algoritmo Genético baseado no de Silva (2023), sendo capaz de gerar dois cenários: o AG_01, voltado para a obtenção de uma estratégia operacional ótima das bombas e válvulas e o AG_02, voltado para um projeto otimizado que inclui além da operação ótima, a obtenção de diâmetros otimizados para as tubulações, sendo os diâmetros sorteados entre os comerciais listados em Porto (2006), de 20 a 500 mm. O algoritmo genético é detalhado na Figura 2.

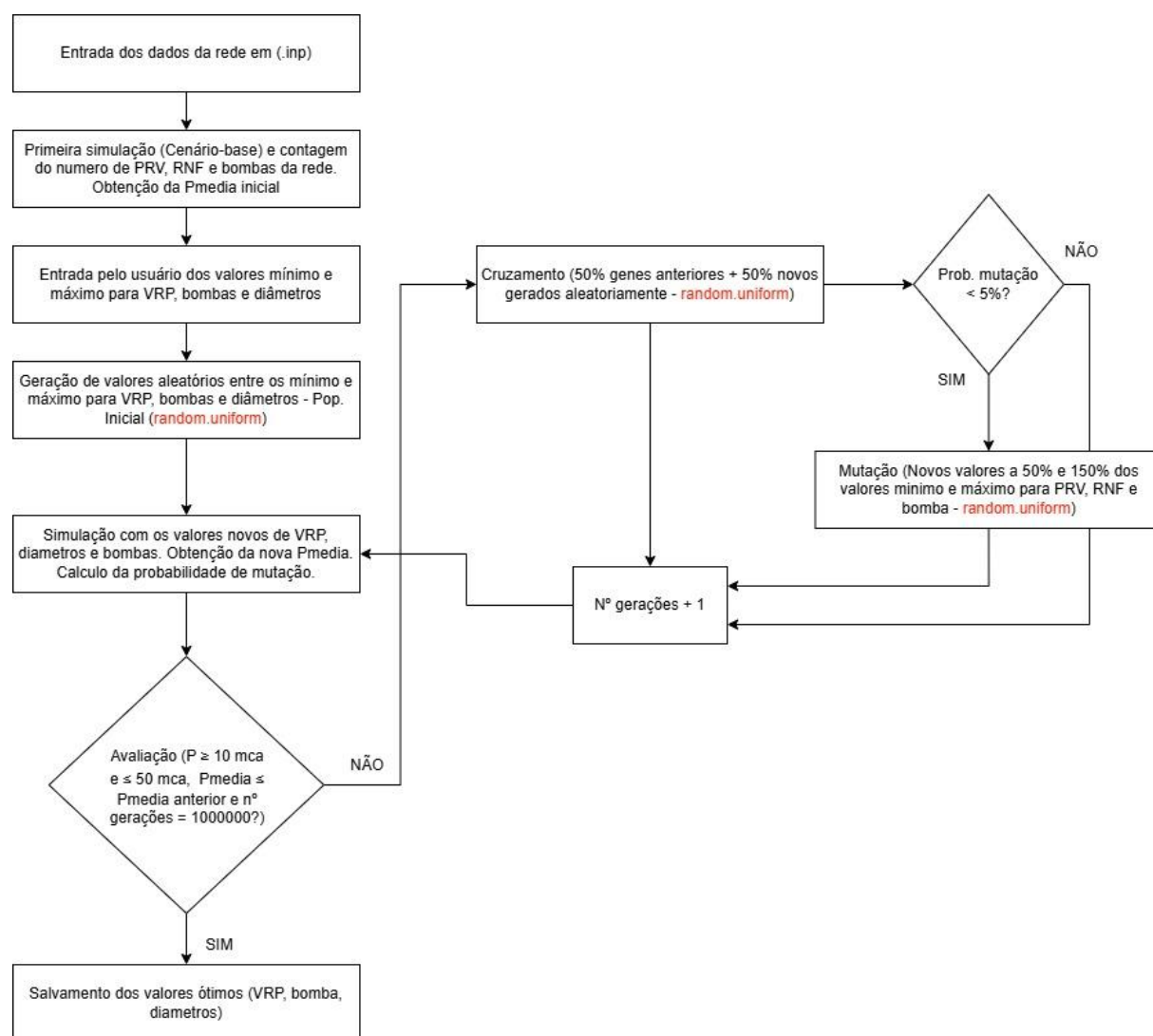


Figura 2 – Algoritmo Genético. Fonte: Autor.

Em ambos os cenários, os parâmetros para as Válvulas Redutoras de Pressão (VRP) foram pressões a jusante entre 0 (válvula totalmente fechada) e 80 m.c.a., considerando a válvula plenamente aberta, enquanto o parâmetro de bombas foi de 0 (bomba desligada) a 1 (bomba funcionando a 100% de sua rotação). No AG_02, por ser capaz de otimizar os diâmetros e

consequentemente gerar um projeto otimizado, foram adotados os parâmetros 0 (20 mm) até 15 (500 mm) para os diâmetros possíveis de serem sorteados.

2.3. Cálculo das perdas e comparação de resultados

Para o cálculo das perdas, utilizaram-se as metodologias de Lambert *et al.* (1999) e de Silva (2003). As metodologias diferem entre si na forma de apresentação dos resultados, com Lambert *et al.* (1999) apresentando as perdas em litros por dia e Silva (2003) apresentando em porcentagem.

A metodologia de cálculo proposta por Lambert *et al.* (1999) é dada pela equação 1:

$$U_{ARL} = (18 \times L_m + 0,8 \times N + 25 \times L_p) \times P \quad (1)$$

Onde: U_{ARL} (*Unavoidable Annual Real Losses*): perdas anuais reais inevitáveis expressas em L/dia; L_m : extensão da RDA (km); N : número de conexões de serviço (nº de nós); L_p : comprimento total das tubulações entre a rua e o medidor do cliente (km); P : pressão média de operação (m.c.a.).

Como não há dados sobre a variável L_p dos modelos de RDA utilizados neste trabalho, considerou-se zero por não haver extensão da rede privada conforme Liemberger (2002).

Já a metodologia de Silva (2003) resulta de uma adaptação de Germanopoulos e Jowitt (1989), dada pela Equação (2), com as perdas em porcentagem.

$$\sum_{i=1}^{nós} Perdas = P_{média}^{0,5} \times 7,27 \quad (2)$$

Onde: $P_{média}$: pressão média da RDA (m.c.a.).

O trabalho irá comparar as reduções de perdas entre o cenário-base, a estratégia operacional otimizada e o projeto otimizado, logo, serão comparadas também as metodologias de cálculo de perdas e estabelecidos paralelos com os trabalhos de Lara *et al.* (2024), Marques *et al.* (2023) e Freitas *et al.* (2022), que utilizam a metodologia de Silva (2003).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a simulação do cenário-base, a rede foi então submetida ao processo de otimização do AG_01, visando a obtenção de estratégia operacional ótima para a operação da rede, com os diâmetros das tubulações originais (cenário-base). Assim, obteve-se um ajuste para a VRP que permitia a passagem a jusante de 49,18 m.c.a., bomba 1 operando a 23,35% e a bomba 2 operando a 87,04% de sua rotação.

Para o cenário obtido pelo AG_02, de otimização do projeto, foi obtido um ajuste de VRP que permitia a passagem de 20,48 m.c.a., bombas 1 e 2 operando a 81,49% e 63,22% de sua rotação e os novos diâmetros, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados das tubulações no cenário-base e após otimização.

<i>ID da tubulação</i>	<i>Nó 1</i>	<i>Nó 2</i>	<i>Comprimento (m)</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>Diâmetro Otimizado (mm)</i>
1	1	37	4500	450	250
2	36	37	1000	250	300
3	36	39	1000	250	400
4	39	40	1000	250	450
5	40	41	1000	250	400
6	41	38	1000	250	250
7	38	37	1000	250	150
8	39	38	1000	250	450
9	39	25	3000	350	150
10	25	26	1000	250	300
11	26	23	1000	250	300
12	23	20	1000	250	250
13	20	19	1000	250	400
14	19	18	1000	250	200
15	18	21	1000	250	150
16	21	24	1000	250	400
17	24	25	1000	250	450
18	25	22	1000	250	450
19	22	23	1000	250	250
20	22	19	1000	250	200
21	22	21	1000	250	450
22	40	26	3000	350	400
23	24	36	3000	350	150
25	43	27	4000	350	350
28	29	28	1000	250	450
29	28	27	1000	250	350
30	27	30	1000	250	400
31	30	33	1000	250	200
32	33	34	1000	250	350
33	34	35	1000	250	200
34	35	32	1000	250	300
35	32	29	1000	250	350
36	31	32	1000	250	400
37	31	30	1000	250	350
38	31	34	1000	250	350
39	31	28	1000	250	400
43	44	42	2000	350	400

Fonte: Autor.

Assim, obtiveram-se os resultados das pressões nos nós, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados das simulações.

<i>ID</i>	<i>Cota (m)</i>	<i>Demanda (l/s)</i>	<i>Cenário Base (m.c.a.)</i>	<i>AG_01 (m.c.a.)</i>	<i>AG_02 (m.c.a.)</i>
18	869	0,5	30,49	30,50	23,10
19	871	0,5	28,49	28,50	21,10
20	868	0,5	31,49	31,50	24,10
21	871	0,5	28,50	28,50	21,11

22	875	0,5	24,49	24,50	17,11
23	877	0,5	22,49	22,50	15,10
24	865	0,5	34,51	34,51	27,11
25	866	0,5	33,50	33,51	26,11
26	871	0,5	28,50	28,50	21,13
27	945	0,5	71,24	39,75	21,45
28	954	0,5	62,24	30,76	12,45
29	955	0,5	61,24	29,76	11,45
30	944	0,5	72,24	40,75	22,45
31	949	0,5	67,24	35,75	17,45
32	949	0,5	67,24	35,75	17,45
33	946	0,5	70,24	38,75	20,45
34	947	0,5	69,24	37,75	19,45
35	950	0,5	66,24	34,75	16,45
36	855	0,01	44,53	44,53	37,20
37	860	0,05	39,59	39,59	32,27
38	865	0,1	34,53	34,53	27,19
39	852	0,01	47,52	47,52	40,19
40	857	0,1	42,50	42,50	35,18
41	863	0,02	36,52	36,52	29,18
42	805	15	49,84	39,03	10,40
43	940	2	76,25	44,74	26,49
44	795	5	60,00	49,19	20,48
Pmedia (m.c.a.)			48,18	35,72	22,73

Fonte: Autor.

O resultado das perdas, calculadas pelas metodologias de Lambert *et al.* (1999) e Silva (2003) é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Perdas reais calculadas.

	Cenário Base	AG_01	AG_02
Pmedia (m.c.a.)	48,18	35,72	22,73
Perdas Lambert (l/dia)	44837,69	33240,84	21149,14
Perdas Silva (%)	50,46%	43,45%	34,66%

Fonte: Autor.

Observa-se que o cenário de estratégia operacional ótima (AG_01) obteve uma redução de perdas de 25,86% pela metodologia de cálculo de Lambert *et al.* (1999) e 13,90% pela de Silva (2003). Ainda que as perdas continuem elevadas, a redução é significativa pois trata-se apenas de ajustes de bombas e válvulas, sem intervenções mais invasivas na rede, constituindo apenas de ajuste nas estratégias operacionais.

Já o cenário de otimização de projeto, com intervenções na rede com a troca das tubulações do cenário-base por outras de mesmo material, portanto mesma rugosidade, com os diâmetros

otimizados, resultou em reduções ainda mais significativas, sendo de 52,83% pela metodologia de Lambert *et al.* (1999) e 31,32% pela de Silva (2003).

Utilizando a metodologia de Silva (2003) como parâmetro, ainda que utilizando redes de distribuição de água e variações do algoritmo genético diferentes, observa-se que as reduções das perdas, mesmo para o cenário AG_01, foi superior ao obtido por Marques *et al.* (2023), cuja redução foi de 11,5% com intervenções nos RNF, diâmetros e material (rugosidade).

Comparado, porém ao obtido por Freitas *et al.* (2022), cuja redução foi de 18,82% com a implementação de novas VRP, o cenário AG_01 obteve resultado inferior, o que é esperado, uma vez que não foram previstas instalações de novas VRP durante o trabalho. Contudo, o cenário AG_02 obteve maior redução com a troca dos diâmetros, demonstrando que o ajuste dos diâmetros no projeto pode ser benéfico na gestão de pressões da rede.

Os resultados obtidos pelo AG_02 vão de encontro com o obtido por Lara *et al.* (2024), que obteve em seu melhor cenário uma redução de 30,50% das perdas em relação ao seu cenário original. Destaca-se as similaridades do desafio enfrentado em Lara *et al.* (2024), com perdas de 58,22%, valor próximo ao do trabalho.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram que uma simples intervenção na estratégia operacional de bombas e válvulas (AG_01) já pode ser o suficiente para obter uma redução das perdas em uma rede de distribuição de água, com resultados positivos ambiental e financeiramente, melhorando a sustentabilidade financeira e garantindo um melhor atendimento e disponibilidade do recurso hídrico para as populações urbanas sem os inconvenientes gerados por intervenções invasivas na infraestrutura urbana, com consequentes impactos inconvenientes na rotina da população, representando uma solução inicial para o problema das perdas reais.

Contudo, os melhores resultados advêm do projeto otimizado da rede (AG_02), sendo desejável que sua implementação já se dê na fase inicial do projeto, uma vez que o projeto, já sendo otimizado, tende a funcionar mais racionalmente, evitando os desperdícios gerados pelas perdas e consequentemente falhas no atendimento da população desde o início.

Porém, embora os inconvenientes de uma intervenção invasiva na infraestrutura urbana possam resultar em uma degradação temporária da rotina dos municípios, ainda assim é desejável implementar melhorias no projeto ao longo do tempo, resultando em uma operação mais eficiente, atendendo mais pessoas sem pressionar ainda mais os recursos hídricos utilizados para abastecimento das cidades.

Conclui-se que a otimização, quer da estratégia operacional, quer do projeto, sempre trará vantagens a população urbana, reduzindo os impactos ambientais da superexploração dos recursos hídricos e pelo atendimento de melhor qualidade. Este trabalho deixa como recomendação uma avaliação dos impactos, na rotina urbana, de medidas de melhorias de projeto em redes de distribuição de água e de medidas que possam mitigar tais impactos.

AGRADECIMENTOS - À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) pela bolsa de doutorado ID 14029; à CAPES pela bolsa de doutorado nº 88887.829273/2023-00; ao Núcleo de Pesquisa em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos (NUMMARH); e à Universidade Federal de Itajubá.

REFERÊNCIAS

- FREITAS, C. L. de; SILVA, F. das G. B. da; SILVA, A. T. Y. L.; BARBEDO, M. D. G. (2022). “Análise de sistema de distribuição de água real no sul de Minas Gerais com o uso de sistema de informação geográfica”. Engenharia Sanitaria e Ambiental, 27(1), pp. 31–39.
- GERMANOPOULOS, G.; JOWITT, P. W. (1989). “Leakage Reduction By Excess Pressure Minimization In a Water Supply Network”. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 87(2), p. 195 – 214.
- KARADIREK, I.; KAYA-BASAR, E.; AKDENIZ, T. (2023). “A study on pipe failure analysis in water distribution systems using logistic regression”. Water Supply, 24 (1), pp. 176-186.
- KINGDOM, B.; LIEMBERGER, R.; MARIN, P. (2006). “The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries. How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting”. Water Supply and Sanitation Sector Board Discussion Paper Series, 8, pp. 1 – 40.
- LAMBERT, A. O.; BROWN, T. G.; TAKIZAWA, M.; WEIMER, D. (1999). “A review of performance indicators for real losses from water supply systems”. Journal of Water Supply: Research and Technology—Aqua, 48 (6), pp. 227 – 237.
- LARA, L. L. D.; SILVA, F. das G. B. da; SILVA, A. T. Y. L.; MARQUES, S. M.; BARBEDO; M. D. G.; REIS, J. A. T. dos. (2024). “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, 29, pp. 1 – 9.
- LIEMBERGER, R. (2002). “Do You Know How Misleading the Use of Wrong Performance Indicators can be?”. Cyprus, Nov. 2002.
- MARQUES, S. M.; SILVA, F. das G. B. da; SILVA, A. T. Y. L.; BARBEDO; M. D. G.; MARCONDES, M. C.; ALVES, S. C. R.; REIS, J. A. T. dos. (2023). “Evaluation of hydraulic behavior of water distribution network varying reservoirs levels, roughness, and diameters with the

use of R and EPANET". *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 18 (3), pp. 1 – 9.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. (2025). “*Relatório dos Serviços de Abastecimento de Água – SINISA 2025: ano de referência 2024*”. Brasília, Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/resultados-sinisa/copy_of_RELATORIO_SINISA_ABASTECIMENTO_AGUA_2025.pdf>. Acesso em 14 mai. 2026.

MOSETLHE, T. C.; HAMAM, Y; DU, S; MONACELLI, E. (2021). “*Appraising the Impact of Pressure Control on Leakage Flow in Water Distribution Networks*”. *Water*, 13, 2617, pp. 1 – 13.

NAJARZADEGAN, M.; ESKANDARIPOUR, M. (2025). “*Maximizing efficiency and performance of water distribution systems through the implementation of optimization algorithms: A comprehensive analysis of valve and chlorine booster placement and management*”. *Heliyon*, 11 (3).

SERAFEIM, A. V.; FOURNIOTIS, N. T.; DEIDDA, R.; KOKOSALAKIS, G.; LANGOUSIS, A. (2024). “*Leakages in Water Distribution Networks: Estimation Methods, Influential Factors, and Mitigation Strategies — A Comprehensive Review*”. *Water*, 16(11), pp. 1 – 24.

SILVA, A. T. Y. L. S. (2023). “*Aplicação de Redes Neurais Multicamadas Associadas a Algoritmos Genéticos Aplicadas a Operação de Redes de Distribuição de Água com Vistas a Eficiência Hidroenergética em Cidades Inteligentes*”. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá.

SILVA, F. das G. B. da. (2003). “*Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos*”. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos: Universidade de São Paulo.