

I-817 - APLICAÇÃO DE METODOLOGIA DE PENALIZAÇÃO ADAPTATIVA COM ALGORITMO GENÉTICO PARA A OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Carlos Vinícius de Carvalho Silva⁽¹⁾

Engenheiro Civil. Assistente Técnico de Cadastro e Georreferenciamento do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Sobral.

Gustavo Paiva Weyne Rodrigues⁽²⁾

Engenheiro Civil. Diretor-Presidente do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Sobral. Professor Adjunto da Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA).

Endereço⁽¹⁾: Rua Coronel Antônio Mendes Carneiro, 740, apto 301 – Centro – Sobral - CE - CEP: 62010 – 160 - Brasil - Tel: +55 (88) 9.9975-8889 - e-mail: engenheiro.carloscarvalho@gmail.com

RESUMO

O desenvolvimento de projetos de redes de distribuição de água é uma tarefa complexa que requer a consideração de diversos requisitos técnicos e de qualidade para garantir o funcionamento do sistema e a redução dos custos de execução. Geralmente, essa atividade depende da experiência do projetista e envolve um longo processo de tentativas e erros para a tomada de decisão das opções mais econômicas.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe um modelo computacional baseado no uso do *software* de simulação hidráulica *Epanet* e do conceito de algoritmo genético, com o objetivo de minimizar os custos em projetos de redes de distribuição de água, transformando soluções inviáveis em viáveis – do referido algoritmo – com penalizações adaptativas.

Para o controle da diversidade populacional no algoritmo genético, foi utilizada a metodologia *Adaptive Penalty Method*, que converte os indivíduos inviáveis em viáveis e amplia o espaço de busca das soluções. Durante o processo evolutivo, a metodologia adapta os valores das penalizações de acordo com o grau de violação das restrições impostas, punindo de forma mais severa os indivíduos que apresentam maior dificuldade em atender às restrições e de forma mais suave os indivíduos com características contrárias, mas que ainda quebram as restrições.

Três estudos de caso em redes de distribuição de água foram realizados para avaliar a efetividade da metodologia proposta. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, destacando-se os estudos de caso da *Hanoi Network* e *Two-Loop Network*, nos quais o algoritmo proposto minimizou o valor do custo quando comparado a outros algoritmos.

Conclui-se que a metodologia proposta é eficaz para redes, permitindo a exploração do espaço de busca do algoritmo e contribuindo para o desenvolvimento de projetos mais eficientes e com menor custo para a distribuição de água.

PALAVRAS-CHAVE: Distribuição de Água, Dimensionamento, Otimização, Algoritmo Genético, Penalidade Adaptativa.

INTRODUÇÃO

Em um sistema de abastecimento de água, a rede de distribuição de água (RDA) é um dos componentes mais onerosos de execução, na qual deve-se potencializar ao máximo o capital aplicado de forma a beneficiar o maior número de pessoa, conforme Van Dijk et al. (2008).

Saldarrigal et al. (2017) enfatizam que uma RDA deve atender as conformidades de projeto, como os parâmetros técnicos e as demandas estabelecidas, com a escolha adequada dos diâmetros nos trechos. Portanto, faz-se necessário que o projetista empregue métodos de tentativas e erros, aliados à experiência, para o dimensionamento de uma RDA, como indicado por Formiga e Gomes (2001). Entretanto, com o avanço computacional houve o desenvolvimento de diversos algoritmos de otimização que buscam as melhores configurações de RDA considerando os custos e os parâmetros técnicos.

Os algoritmos de otimização são ferramentas matemáticas que buscam a melhor solução, denominada de solução ótima, ou a mais satisfatória determinada pelas técnicas iterativas, como indicado por Ceccon (2020). Segundo Formiga (2005), as principais vertentes de otimização são os algoritmos lineares, não lineares, dinâmicos, genéticos etc.

O algoritmo genético (AG) é uma metodologia de otimização heurística, desenvolvido por Holland (1975), fundamentada na evolução e adaptação das espécies. Pacheco (1999) afirma que o AG é um algoritmo matemático probabilístico que realiza buscas paralelas e adaptativas, baseando-se nas evoluções e recombinações genéticas das soluções desenvolvidas, denominadas de indivíduos.

Jazynski (2022) cita que, inicialmente, o AG realiza a criação das primeiras soluções de forma aleatória, formando a primeira população, na geração inicial, para submeter aos processos de seleção natural, *crossover* e mutação, constituindo as gerações posteriores e garantindo a convergência dos indivíduos para as soluções ótimas.

No entanto, durante a execução do algoritmo são comuns as formações de soluções que ultrapassem as restrições impostas, tornando-se inviáveis para a resolução do problema, mas que permitem a diversificação do espaço de busca quando aplicado a metodologias de penalização, transformando as otimizações restritas em irrestritas, conforme relatado em Garcia (2014).

MATERIAIS E MÉTODOS

No modelo proposto, foi empregado o *toolkit* do software *Epanet 2.2* (Rossman, 2020), um arquivo .DLL (*Dynamic Link Library*) que realiza simulações hidráulicas com bastante precisão e confiabilidade em redes pressurizadas, para a determinação das pressões dos nós, das perdas de cargas, das vazões e das velocidades dos tubos de uma RDA.

Inicialmente, a RDA é executada no *Epanet* e o algoritmo acessa as informações essenciais do modelo, os tubos e nós, por meio do conjunto de ferramentas incorporado no código. O AG é iniciado com a criação da população inicial de indivíduos, em que cada um representa uma solução potencial para a RDA.

Cada indivíduo é composto por uma estrutura denominada cromossomo, que consiste em uma sequência de genes representando as tubulações da RDA. Os genes armazenam os diâmetros correspondentes dos tubos na rede. As evoluções genéticas modificam esses valores com o objetivo de encontrar os diâmetros que melhor se adaptam à rede.

Após a criação dos indivíduos, o AG transmite as informações de cada solução ao *Epanet*, em que ocorrem as simulações hidráulicas. Os resultados obtidos são encaminhados ao algoritmo, e a adequação do indivíduo ao problema é avaliada por meio da função objetivo, conforme expresso na equação 01. Os indivíduos mais aptos são aqueles com menores valores, sugerindo custos de implantação mais baixos, enquanto os menos aptos apresentam valores mais elevados.

$$f(x) = \begin{cases} f(x) & \text{Caso o indivíduo seja factível} \\ PEN(X) & \text{Caso contrário} \end{cases} \quad \text{equação (1)}$$

Quando o indivíduo apresenta um conjunto de diâmetros que satisfazem as restrições estabelecidas para o funcionamento da RDA, a função $f(x)$ é aplicada com o valor obtido de acordo com a equação 02.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{TT} CI(D_i) L_i \quad \text{equação (2)}$$

Em que $CI(D_i)$ é o custo unitário do diâmetro por metro, L_i a extensão da tubulação e TT o total de tubos constituintes da rede.

Quando ocorre a violação das restrições, é aplicada a função de penalidade $PEN(X)$ que converte os indivíduos inviáveis em viáveis para a expansão do espaço de busca das soluções. Neste trabalho foi empregada a

metodologia *Adaptive Penalty Method* (APM), desenvolvida por Barbosa e Lemonge (2003), que adapta os valores das penalizações durante o processo evolutivo, punindo severa ou levemente os indivíduos que apresentam dificuldades em atender às restrições impostas. A função penalidade é apresentada na equação 3.

$$PEN(X) = \bar{f}(x) + \sum_{i=1}^m k_j v_j(x) \quad \text{equação (3)}$$

Sendo:

- $\bar{f}(x)$ o custo mínimo para a solução, calculado na equação 4;
- v_j é a violação da restrição j sobre a população atual, calculado na equação 5;
- k_j é o fator de penalização, calculado na equação 6.

$$\bar{f}(x) = \begin{cases} f(x) & \text{Se } f(x) < \langle f(x) \rangle \\ \langle f(x) \rangle & \text{Caso contrário} \end{cases} \quad \text{equação (4)}$$

O valor de $\bar{f}(x)$ corresponderá ao custo da solução inviável se for maior que a média das funções objetivo da população atual, representada por $\langle f(x) \rangle$. Caso contrário, o valor médio será atribuído a $\bar{f}(x)$. A Figura 1 ilustra a metodologia de atribuição de valores para $\bar{f}(x)$. As soluções inviáveis 1, 6 e 7 possuem valores de $f(x)$ superiores a $\langle f(x) \rangle$, portanto, não são alteradas. As soluções 2, 3, 4 e 5 apresentam situação oposta, recebendo o valor médio para $\bar{f}(x)$.

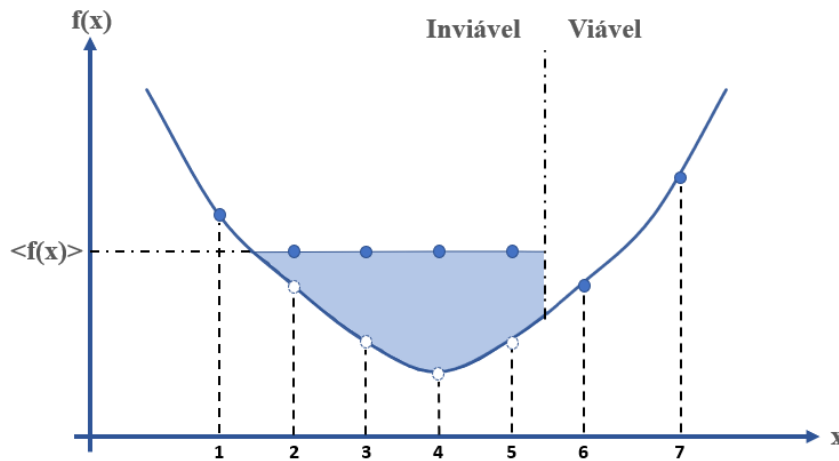


Figura 1: Aplicação na escolha do $\bar{f}(x)$ do APM.

Fonte: Adaptado de Barbosa e Lemonge (2003).

$$v(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{TN} |P_i - P_{min}| \\ \sum_{i=1}^{TT} V_{max} - V_i \end{cases} \quad \text{equação (5)}$$

Para os valores das restrições $v(x)$ foram empregados os limites de velocidade – quando a velocidade do tubo (V_i) é inferior a velocidade máxima (V_{max}) – e de pressão, quando a pressão do nó (P_i) é inferior à pressão mínima (P_{min}). Os termos TN e TT indicam o total de nós e total de tubos, respectivamente.

$$k_j = |\langle f(x) \rangle| \frac{|\langle v_j(x) \rangle|}{\sum_{i=1}^m [\langle v_i(x) \rangle]^2} \quad \text{equação (6)}$$

O fator de penalização da geração atual, k_j , é calculado pela média da violação das restrições j , indicado por $\langle v_j(x) \rangle$, e pelo número total de restrições m .

Logo após, inicia-se o processo de seleção natural para escolher os reprodutores, empregando o método de sorteio. Nesta técnica, o indivíduo mais apto, aquele com o menor valor na função objetivo, é identificado entre um conjunto de três indivíduos selecionados aleatoriamente na população. Conforme Montini (2022), o propósito dessa estratégia é avaliar os indivíduos adequados para a reprodução e possibilitar o aprimoramento das soluções mais eficazes.

Depois da seleção natural dos reprodutores, ocorre a etapa de *crossover*, ou cruzamento, nos indivíduos escolhidos, por meio do método uniforme, apresentado na figura 2. Nesse processo, os genes são transferidos conforme os critérios de uma máscara formada por números binários. Segundo Soares (1997), o propósito do método de cruzamento é produzir novos pontos no espaço de otimização e incentivar a troca de informações genéticas entre os indivíduos.

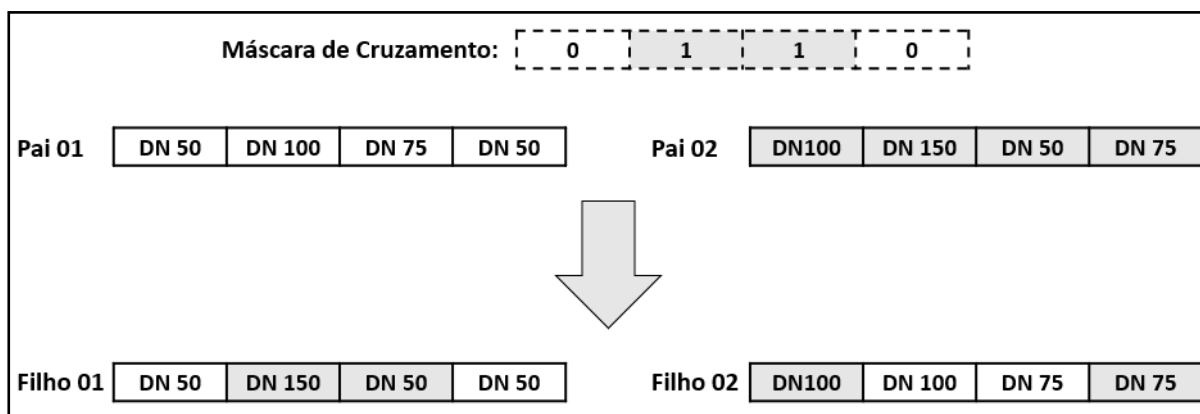


Figura 2: Representação do cruzamento uniforme.

Fonte: Adaptado de Melo e Balieiro (2017).

Conforme Melo e Balieiro (2017), se os elementos da máscara apresentam o valor 0, o gene na posição correspondente do elemento no pai 1 é passado ao filho 1; do contrário, o gene é transmitido ao filho 2, e o gene do filho 1 origina-se do pai 2. Caso o valor exibido no elemento seja 1, o procedimento inverso acontece.

Após o processo de *crossover*, ocorre a mutação dos descendentes. Lopes (2006) afirma que os genes dos novos indivíduos podem ser alterados mesmo após o cruzamento, expandindo a exploração global do espaço de busca das soluções durante a execução do AG. Esse método é conduzido atribuindo-se um valor entre 0 e 1 para cada gene no cromossomo. Se algum gene apresentar um valor inferior à taxa de mutação pré-estabelecida no AG, a alteração do diâmetro indicado no gene é realizada.

Por último, ocorre o processo de elitismo, em que os melhores indivíduos são transferidos de geração em geração sem a necessidade de processos evolutivos. De acordo com Veloso et al. (2022), isso permite que os indivíduos com maior grau de aptidão sejam preservados.

O fluxograma do AG proposto está ilustrado na figura 3.

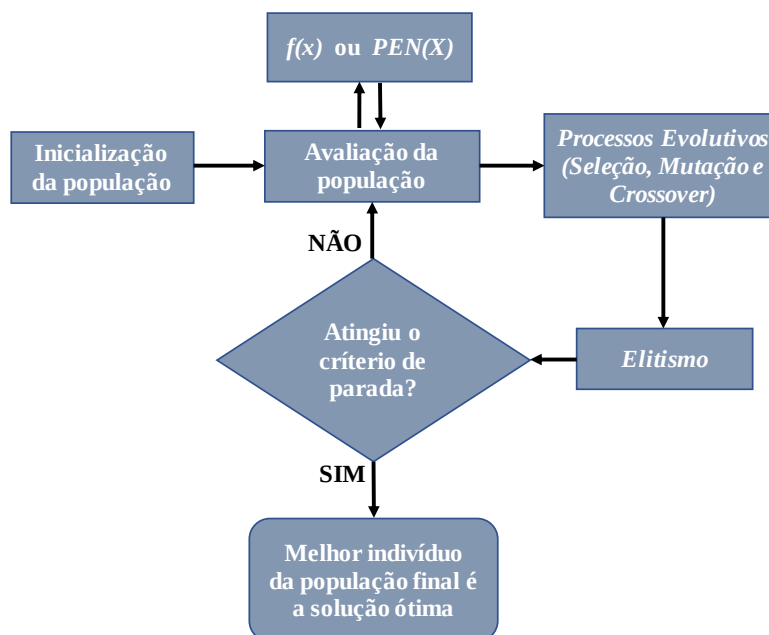


Figura 3: Fluxograma do AG proposto.

RESULTADOS

Os métodos heurísticos apresentam soluções ótimas diferentes para cada execução, desta forma foram realizadas 30 (trinta) repetições para cada simulação com uma população inicial de 50 (cinquenta) indivíduos, 100 (cem) gerações, 95% para a taxa de *crossover* e 3% de taxa de mutação.

Para a análise e validação dos resultados, foi comparado o modelo proposto com o valor obtido em três estudos de casos disponíveis na literatura de Corrêa et al. (2018), em que foram empregados o uso de aplicativos computacionais para dimensionamentos de redes de distribuição de água.

O primeiro estudo de caso é a Hanoi Network, apresentada na figura 4, proposta por Fujiwara e Khang (1990) e faz citação ao sistema de distribuição de água de cidade homônima no Vietnã. A rede é composta por 31 nós, 1 reservatório de nível fixo de 100 m e 3 anéis com 34 tubos com coeficiente de *Hazen-Williams* igual a 130. Os requisitos técnicos aplicados são P_{min} de 30 mca e V_{max} de 3,5 m/s. Os custos unitários de diâmetros por metro estão indicados na tabela 1.

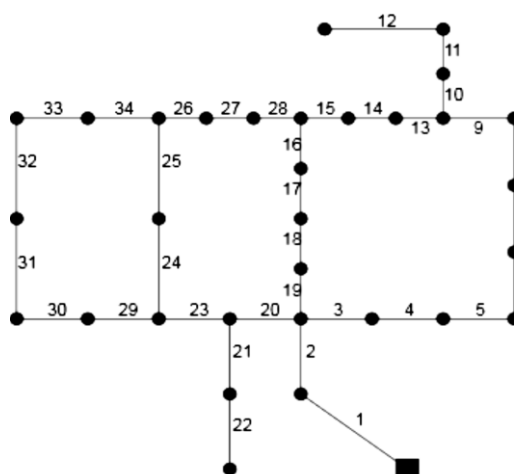


Figura 4: Hanói Network – Estudo de Caso 1.

Fonte: Corrêa et al. (2018)

Tabela 1: Diâmetros e custos para Hanói Network – Estudo de caso 1.

DIÂMETRO (mm)	CUSTO (\$/m)
304,80	45,73
406,40	70,40
508,00	98,38
609,60	129,30
762,00	180,80
1016,00	278,30
1231,20*	375,27
1435,40*	477,76

*Tubos de ferro fundido

Fonte: Corrêa et al. (2018)

O segundo estudo de caso é a *New York Tunnel Network*, indicada na figura 5, proposta por Schaake e Lai (1996). A rede é composta por 20 nós, 1 reservatório de nível fixo de 91,44 m e 21 tubos com coeficiente de *Hazen-Williams* de 130. Os requisitos técnicos aplicados são $P_{\min}$ de 30 mca e $V_{\max}$ de 3,5 m/s. Os custos unitários de diâmetros por metro estão indicados na tabela 2.

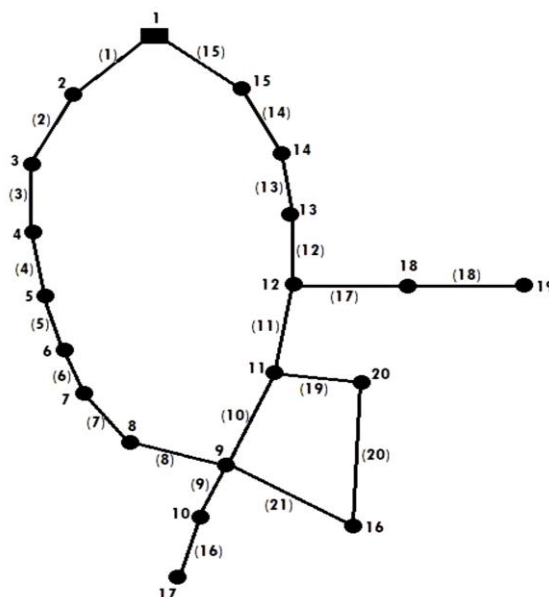


Figura 5: New York Tunnel Network – Estudo de caso 2.

Fonte: Corrêa et al. (2018)

Tabela 2: Diâmetros e custos para New York Tunnel Network – Estudo de caso 2.

DIÂMETRO (mm)	CUSTO (\$/m)
914,40	306,76
1219,20	439,63
1524,00	577,43
1828,80	725,07
2133,60	875,58
2418,40	1036,75
2743,20	1197,52
3048,00	1368,11
3352,80	1518,71
3657,60	1712,60
3962,40	1895,04
4267,20	2073,49

4572,00	2360,50
4836,80	2447,51
5181,60	2637,80

Fonte: Corrêa et al. (2018).

Proposta por Alperovits e Shamir (1977), o terceiro estudo de caso refere-se à *Two-Loop Network*, esboçada na figura 6. A rede é composta por 6 nós, 1 reservatório de nível fixo de 210 m e 8 tubos com coeficiente de *Hazen-Williams* de 130. O requisito técnico imposto é P_{min} de 30 mca. Os custos unitários de diâmetros por metro estão indicados na tabela 3.

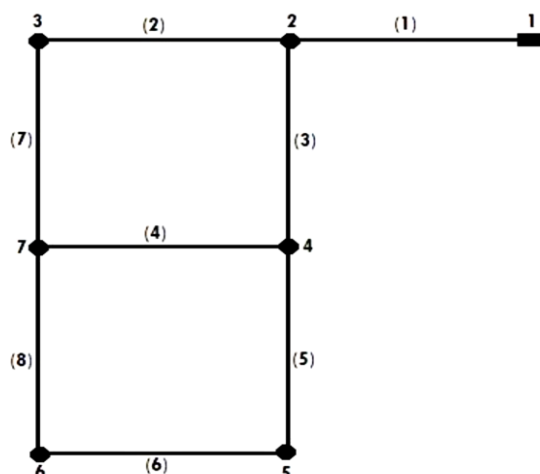


Figura 6: *Two-Loop Network* – Estudo de caso 3.

Fonte: Corrêa et al. (2018)

Tabela 3: Diâmetros e custos para *Two-Loop Network* – Estudo de caso 3.

DIÂMETRO (pol.)	CUSTO (\$/m)
1	2
2	5
3	8
4	11
6	16
8	23
10	32
12	50
14	60
16	90
18	130
20	170
22	300
24	500

Fonte: Corrêa et al. (2018).

RESULTADOS OBTIDOS

No estudo de caso 1, o AG proposto apresentou o menor custo de implantação, como pode ser constatado na figura 7, quando comparado aos resultados de Corrêa et al. (2018). Os resultados obtidos para a configuração de diâmetros e de velocidades estão listados na tabela 4 e as pressões estão apresentadas na tabela 5. Para os valores de $P_{\min}$ e $V_{\max}$ foram obtidos os valores de 30,42 mca e 3,42 m/s, respectivamente.

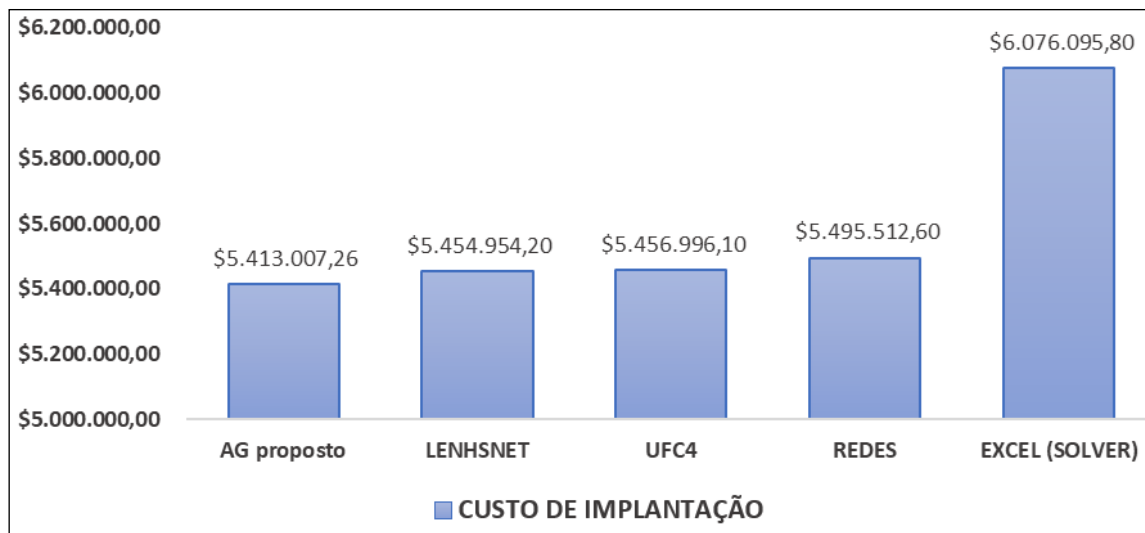


Figura 7: Resultados dos custos apresentados para Hanói Network – Estudo de caso 1.

Fonte: Adaptado de Corrêa et al. (2018)

Tabela 4: Resultados dos diâmetros e das velocidades para Hanói Network – Estudo de caso 01

ID	DIÂMETRO (mm)	VELOCIDADE (m/s)	ID	DIÂMETRO (mm)	VELOCIDADE (m/s)
T1	1435,40	3,42	T18	609,60	2,99
T2	1435,40	3,27	T19	609,60	3,04
T3	1016,00	2,57	T20	1016,00	2,57
T4	1016,00	2,52	T21	406,40	3,03
T5	1016,00	2,27	T22	304,80	1,85
T6	762,00	3,43	T23	762,00	2,94
T7	762,00	2,61	T24	609,60	2,87
T8	762,00	2,27	T25	609,60	2,09
T9	609,60	3,05	T26	406,40	1,86
T10	609,60	1,90	T27	304,80	0,13
T11	508,00	2,06	T28	304,80	1,54
T12	508,00	1,29	T29	406,40	1,63
T13	304,80	2,59	T30	304,80	1,80
T14	304,80	0,25	T31	304,80	0,43
T15	304,80	0,82	T32	304,80	0,94
T16	406,40	1,99	T33	304,80	1,34
T17	508,00	2,46	T34	508,00	1,59

Tabela 5: Resultados das pressões para *Hanoi Network* – Estudo de caso 1.

ID	PRESSÃO (m)	ID	PRESSÃO (m)
N1	99,47	N17	79,27
N2	92,88	N18	88,24
N3	88,68	N19	82,57
N4	83,49	N20	54,84
N5	78,09	N21	49,68
N6	73,06	N22	60,37
N7	67,35	N23	47,58
N8	62,93	N24	40,07
N9	53,60	N25	33,73
N10	48,98	N26	33,76
N11	40,64	N27	51,53
N12	30,42	N28	31,78
N13	38,13	N29	30,66
N14	38,01	N30	31,10
N15	39,26	N31	36,00
N16	62,36		

No estudo de caso 2, o AG proposto apresentou o segundo menor custo de implantação da rede, sendo superior ao valor do *software Excel*, em 5,67%, como pode ser verificado na figura 8. Os resultados obtidos para a configuração de diâmetros e de velocidades estão indicados na tabela 6 e as pressões estão apresentadas na tabela 7. Para os valores de P_{min} e V_{max} foram obtidos os valores de 30,07 mca e 1,92 m/s, respectivamente.

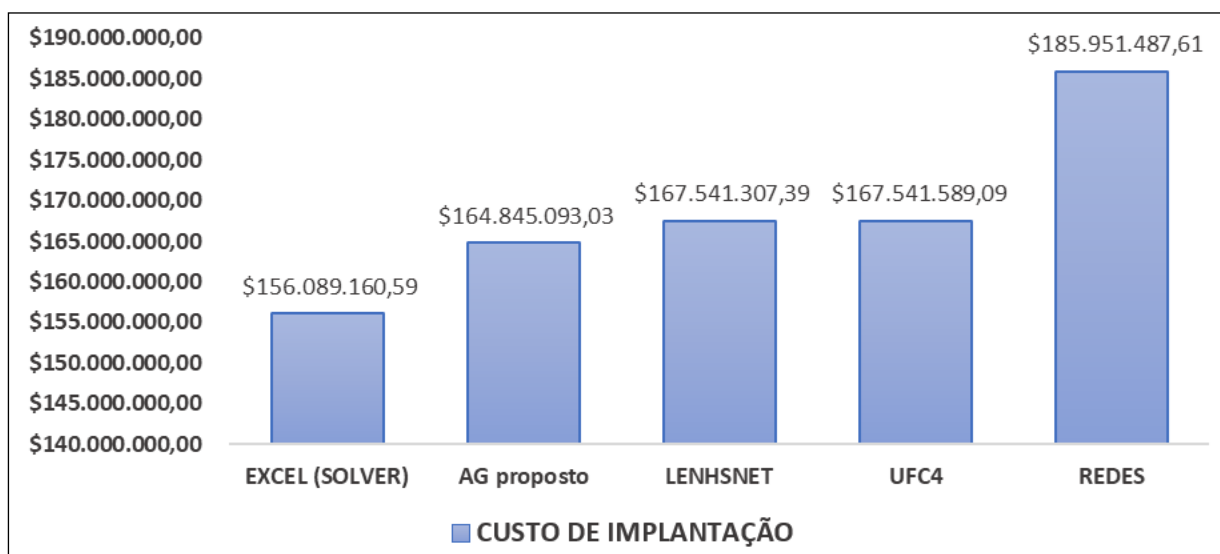


Figura 8: Resultados dos custos apresentados para *New York Tunnel Network* – Estudo de caso 2.

Fonte: Adaptado de Corrêa et al. (2018)

Tabela 6: Resultados dos diâmetros e das velocidades para a New York Tunnel Network – Estudo de caso 2.

ID	DIÂMETRO (mm)	VELOCIDADE (m/s)	ID	DIÂMETRO (mm)	VELOCIDADE (m/s)
T1	5181,6001	1,54	T12	3962,3999	1,53
T2	4836,7998	1,63	T13	4267,2002	1,55
T3	4836,7998	1,48	T14	4572,0000	1,51
T4	4836,7998	1,35	T15	4267,2002	1,92
T5	4267,2002	1,56	T16	2133,6001	0,46
T6	4836,7998	1,08	T17	2743,2000	1,12
T7	4267,2002	1,21	T18	2133,6001	0,93
T8	3962,3999	1,20	T19	2133,6001	1,32
T9	3352,8000	0,51	T20	914,4000	0,14
T10	914,4000	0,92	T21	2133,6001	1,37
T11	2743,2000	1,51			

Tabela 7: Resultados das pressões para a New York Tunnel Network – Estudo de caso 2.

ID	PRESSÃO (m)	ID	PRESSÃO (m)
N1	42,76	N11	35,47
N2	40,80	N12	36,84
N3	40,19	N13	39,36
N4	39,61	N14	41,31
N5	38,70	N15	31,36
N6	37,82	N16	30,07
N7	37,19	N17	32,47
N8	36,30	N18	30,29
N9	36,14	N19	31,08
N10	33,60		

O AG proposto apresentou o menor custo de implantação da rede no terceiro estudo de caso, com um valor de de \$419.000,00. Savic e Walters (1997) relataram ser o menor valor existente para a RDA. Na figura 9 é realizada uma análise do custo determinado com os valores indicados na literatura supracitada e os resultados obtidos para a configuração de diâmetros e de velocidades estão listados na tabela 8 e as pressões estão apresentadas na tabela 9. Para o valor da P_{min} foi obtido o valor de 30,44 mca.

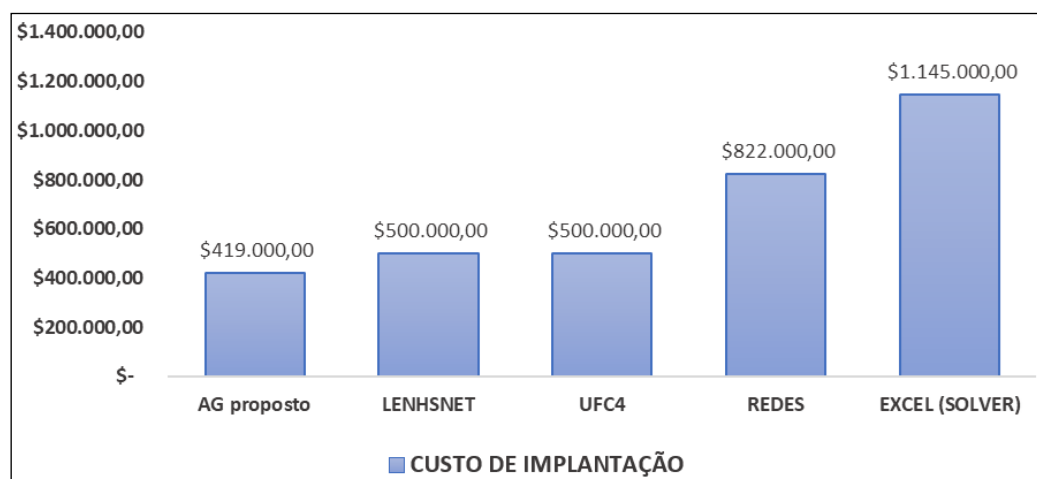


Figura 9: Resultados dos custos apresentados para a Two-Loop Network – Estudo de caso 3.
Fonte: Adaptado de Corrêa et al. (2018)

Tabela 8: Resultados das pressões para *Two-Loop Network* – Estudo de caso 3.

ID	DIÂMETRO (pol)	VELOCIDADE (m/s)
T1	18	1,90
T2	16	1,46
T3	16	1,14
T4	10	1,10
T5	1	0,31
T6	4	1,12
T7	10	1,85
T8	10	1,30

Tabela 9: Resultados das pressões para *Two-Loop Network* – Estudo de caso 3.

ID	PRESSÃO (m)
N1	53,25
N2	30,46
N3	33,80
N4	43,45
N5	30,44
N6	30,55

Como meio de comprovação se o resultado atingido pelo AG proposto seria o menor valor possível, realizou-se uma busca exaustiva de todas as combinações de diâmetros para o estudo de caso 3, devido ao fato de esta rede ser a que possui menos trechos dos três estudos de caso do presente trabalho. Verificaram-se todas as soluções, na qual a melhor combinação foi a mesma indicada pelo método da pesquisa.

Um fator importante a ser pontuado foi o tempo computacional de 28 (vinte e oito) horas, 45 (quarenta e cinco) minutos e 6 (seis) segundos necessários para a determinação da solução pelo método exaustivo para o estudo de caso 3. Ao se utilizar o AG proposto, foram apenas 13 (treze) segundos para obter o mesmo resultado, ocasionando uma drástica redução no tempo necessário para a busca do ótimo global.

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo realizar a busca do menor custo de dimensionamento de uma RDA, por intermédio de uma função penalidade que adapta o peso da punição durante a execução do AG, considerando-se o grau de violações das populações para as restrições impostas. Os resultados são considerados bastante satisfatórios para todos os estudos de casos.

No que concerne ao estudo de caso 1, o algoritmo determinou o menor custo para a RDA, minimizando em 10,91% o valor máximo indicando na literatura correlata, obedecendo rigorosamente aos parâmetros impostos. No estudo de caso 2, o modelo minimizou o valor de custo quando analisado aos resultados dos programas UFC4, LENHSNET e REDES, na qual foi obtida uma redução de 1,61%, 1,61% e 11,35%, respectivamente. Para o estudo de caso 3, o algoritmo apresentou o menor custo possível e gerou uma redução de 63,40%.

O método APM demonstrou ser eficiente no dimensionamento dos três estudos de casos, cujos valores de pressões e de velocidades foram dimensionados para estarem próximas aos limites estabelecidos nas literaturas e, assim, minimizou os custos das RDAs.

Diante dos resultados, o AG com penalização APM demonstrou a empregabilidade em redes reais para a busca dos melhores conjuntos de diâmetros, visando garantir a segurança, a exequibilidade e os critérios impostos para minimizar os custos para a execução da obra de uma RDA.

Como sugestão para trabalhos futuros, é indicada a adição da restrição de perda de carga unitária para atender aos critérios de ABNT (2017).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALPEROVITS, E.; SHAMIR, U. *Design of Optimal Water Distribution Systems*. *Water Resources Research*, v. 13, n. 6, p. 885-900, 1977.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12218:2017 - Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público - Procedimento. Rio de Janeiro, 2017. 49 p.
3. BARBOSA, H. J. C.; LEMONGE, A. C. C. *A new adaptive penalty scheme for genetic algorithms*. In *Information Sciences*, 2003.
4. CECCON, D. Algoritmo de Otimização. *Expert Academy*, 2020. Disponível em: <https://iaexpert.academy/2020/07/13/algoritmos-de-otimizacao/>. Acesso em: 25 out. 2022.
5. CORREA, S. S.; FERREIRA, T. S. G.; SILVA, L. C.; RODRIGUES, E. A. M.; BEZERRA, S. T. M. Avaliação de softwares para o dimensionamento de sistemas de distribuição de água. In: 29º CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 2018, São Paulo. Anais... São Paulo, 2018.
6. FORMIGA, K. T. M. Otimização Multiobjetivos de Projetos de Redes de Distribuição de Água. 2005. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
7. FORMIGA, K. T. M.; GOMES, H. P. Método Prático de Dimensionamento Econômico de Redes Malhadas de Abastecimento de Água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n. 4, p. -, out./dez. 2001. ISSN 2318-0331.
8. FUJIWARA, O.; KHANG, D. B. *A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks*. *Water Resour*, v.4, n.26, p. 539-549, 1990.
9. GARCIA, R.P. Estratégias de penalização adaptativa para a solução de problemas de otimização com restrições via algoritmo genético. 2014. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG.
10. HOLLAND, J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. 1. ed. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
11. JAZYNSKI, T. Seleção e otimização de carteiras de ações do mercado brasileiro: Momentum, Markowitz e algoritmo genético. 2022. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR.
12. LOPES, H. S. Fundamentos de computação evolucionária e aplicações. In: ESCOLA REGIONAL DE INFORMÁTICA DA SBC – PARANÁ, 8., 2006, Bandeirantes. Anais... Bandeirantes: SBC, 2006.
13. MELO, J. I. A.; BALIEIRO, A. M. Uma abordagem baseada em algoritmo genético para formação de grupos de estudos em ambientes virtuais de aprendizagem. 2017. Monografia (Licenciatura em Computação) - Universidade de Pernambuco, Campus Garanhuns, Garanhuns, PE.
14. MONTINI, B. B. Algoritmo genético para o problema generalizado de atribuição. 2022. Monografia (Bacharelado em Estatística) - Universidade Estadual Paulista, Campus de Presidente Prudente, Presidente Prudente, SP.
15. PACHECO, M. A. C. Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações. Apostila de Aula. Versão 1. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada - Julho, 1999.
16. ROSSMAN, L. A.; WOO, H.; TRYBY, M.; SHANG, F.; JANKE, R.; HAXTON, T. *EPANET 2.2 User Manual*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2020. Disponível em: https://epanet22.readthedocs.io/_/downloads/en/latest/pdf/. Acesso em: 1 dez. 2022.
17. SALDARRIAGA, J.; et al. *Optimized Design of Water Distribution Networks* (Software REDES). In: XV SEMINARIO IBEROAMERICANO DE REDES DE AGUA Y DRENAJE, 2017, Bogotá. Anais... Bogotá, Colômbia, 2017.
18. SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. *Genetic algorithms for least-cost of water distribution networks*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n.2, p.67-77, 1997.
19. SCHAAKE, J.; LAI, D. *Linear programming and dynamic programming applications to water distribution network design*. Relatório de pesquisa, n. 116 - Departamento de Engenharia Civil- Instituto de Tecnologia de Massachusetts, USA, 1996.
20. SOARES, G. L. Algoritmo Genético: Estudo, Novas Técnicas e Aplicações. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1997.
21. VAN DIJK, M. VAN; VUUREN, S. J. VAN; ZYL, J. E. VAN. *Optimizing water distribution systems using a weighted penalty in a genetic algorithm*. *Water SA*, v. 34, n. 5, p. 537-548, out. 2008.
22. VELOSO, G. P.; OLIVEIRA, D. M.; RIBEIRO, C.; RIBEIRO, S. Design generativo aplicado às estruturas: Otimização do plano de corte dos painéis de tela soldada em paredes de concreto. In: 4º Congresso Português de Building Information Modelling, 2022, Braga, Portugal. Anais... Braga, 2022.