



9642 AVALIAÇÃO DE SOFTWARES PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Sabrina da Silva Corrêa⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia Civil, UFPE, Campus Agreste.

Thaise Suanne Guimarães Ferreira

Graduanda em Engenharia Civil, UFPE, Campus Agreste.

Lucas Caitano da Silva

Graduando em Engenharia Civil, UFPE, Campus Agreste.

Elyfas Allyjackson Moraes Rodrigues

Graduando em Engenharia Civil, UFPE, Campus Agreste.

Saulo de Tarso Marques Bezerra

Professor Associado, UFPE, Campus Agreste.

Endereço⁽¹⁾: Rua Siqueira Campos, 282 – Cachoeirinha – Pernambuco – CEP: 55380-000 – Brasil –
Cel: +55 (81) 99740-3800 - e-mail: sabrinna_s.c@hotmail.com

RESUMO

O dimensionamento otimizado das redes de distribuição de água tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores e projetistas, devido aos altos custos de operação e manutenção destas. O problema é complexo e existem múltiplas metodologias para encontrar a solução ideal, que basicamente consiste em minimizar os custos da rede de distribuição de água cumprindo as restrições hidráulicas. Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo analisar o desempenho de quatro *softwares* utilizados para o dimensionamento de redes, são eles: REDES, UFC4, Lenhsnet e Excel (Solver). Estes foram aplicados em três estudos de caso da literatura (*benchmark examples*): *Hanoi*, *New York Tunnel* e *Two-loop*. A abordagem permitiu hierarquizar a eficiência dos programas com base na solução de custo mínimo, no tempo de processamento e na facilidade de aplicação. Os resultados obtidos foram condizentes com as expectativas iniciais e possibilitam o direcionamento dos usuários para a escolha do *software* mais apropriado para os projetos.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de Distribuição de Água, Otimização, *Software* Redes, UFC, Lenhsnet.

INTRODUÇÃO

De acordo com a Lei 9.433/1997, conhecida como Lei das Águas, o acesso aos recursos hídricos é um direito de todos. Os sistemas de distribuição de água (SDA) são uma das ferramentas utilizadas para garantir o cumprimento dessa lei. Devido a sua importância, a otimização desses sistemas tem ganhado atenção especial de engenheiros e pesquisadores de recursos hídricos (Gomes, 2009).

O projeto de uma rede de distribuição de água consiste em determinar o diâmetro de cada uma das tubulações que compõem a rede, atendendo todas as demandas impostas, e satisfazendo as diferentes restrições de projeto (as restrições geralmente mudam, dependendo dos regulamentos de cada país) (Saldarriaga, 2017). Sendo o dimensionamento de redes malhas indeterminado matematicamente, ao longo dos anos, inúmeros métodos foram propostos para o problema. Os primeiros métodos de dimensionamento, conhecidos como modelos clássicos, restringiam-se apenas ao equilíbrio hidráulico do sistema.

Mais tarde, com a consolidação da microcomputação, surgiram as primeiras técnicas de otimização direcionadas ao dimensionamento de redes baseadas em métodos matemáticos de programação linear, não linear e dinâmica. Das metodologias atuais, podemos citar: Algoritmos Genéticos, Pesquisa Harmônica, *Particle Swarm Optimisation* e *Ant Colony Optimisation*.

Dentre os *softwares* disponíveis para o dimensionamento de redes de hidráulica, destacamos o REDES, UFC4 (Costa e Castro, 2006), Lenhsnet (Gomes *et al.*, 2009) e Excel (Solver). Em sua última versão, o programa REDES reúne as metodologias mais importantes presentes na literatura especializada, permitindo o dimensionamento de redes de distribuição por meio de várias técnicas (Saldaniage, 2017). O *software* foi desenvolvido pelo *Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados* – CIACUA (<https://ciacua.uniandes.edu.co/>), da Universidade dos Andes, Bogotá, Colômbia.



O Lenhsnet é executado no EPANET, que é um *software* livre e aberto. O método do Lenhsnet é um algoritmo iterativo de dimensionamento otimizado voltado para sistemas pressurizado de distribuição de água. O sistema UFC é um conjunto de *softwares*, desenvolvido em diversas linguagens de programação, direcionado a avaliação e procedimentos referentes ao traçado e dimensionamento hidráulico/operação de redes de abastecimentos de água, adutoras e redes de esgotamento sanitário. A aplicação do Excel no dimensionamento dá-se através das planilhas de cálculo, onde a partir delas é definida a função a ser otimizada. A otimização no programa é realizada através do complemento Solver (GRG2).

OBJETIVOS

O trabalho objetivou analisar o dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água por meio de quatro *softwares*, hierarquizando-os com base na solução de custo mínimo, no tempo de processamento e na facilidade de aplicação.

METODOLOGIA

A metodologia empregada baseia-se na comparação dos resultados obtidos pela otimização do dimensionamento de redes de distribuição de água por meio de quatro diferentes *softwares*. Os programas foram aplicados para a otimização do dimensionamento das redes Hanoi, New York Tunnel e Two-loop, redes referencias (*benchmark examples*) na literatura para esse tipo de análise.

SOFTWARES UTILIZADOS

Os seguintes programas foram empregados para o dimensionamento otimizado das redes em questão: UFC4, REDES, Lenhsnet e Excel (Solver). A perda de carga foi calculada com base na fórmula de Hazen-Williams (Equação 1).

$$h = \frac{\omega \cdot L \cdot Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,871}} \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

h: Perda de carga em m; ω : fator de conversão das unidades (10,67 – valor adotado no EPANET);
L: Comprimento dos trechos em m; C: coeficiente de rugosidade; D: Diâmetro dos tubos em metros.

Para o dimensionamento pelo programa UFC4, foi necessário transferir a rede para o EPANET e executar a simulação, em seguida o arquivo .inp foi aberto no programa; para tanto foi necessário informar o material, os diâmetros disponíveis para dimensionamento e o custo unitário (\$/m) de cada diâmetro disponível. Essas informações foram inseridas no arquivo texto CustoDW.txt. Desse modo obteve-se o dimensionamento da rede.

O *software* REDES possui módulos que incluem edição, projeto, cálculo hidráulico e de qualidade da água de redes de distribuição de água. O *software* permite quatro diferentes tipos de cálculo: o cálculo hidráulico da rede, tanto em período prolongado, quanto estático, o cálculo da qualidade da água, calibração e, finalmente, o dimensionamento ótimo da rede. O programa tem a capacidade de usar as equações baseadas em Darcy-Weisbach e Colebrook-White, bem como a equação empírica de Hazen-Williams (Equação 1).

Para a realização do dimensionamento, as redes foram importadas no EPANET, e foi utilizada a opção de otimizar através do Algoritmo Genético (AG) com configuração padrão. O AG foi desenvolvido em 2003, sendo um método de pesquisa ordenado no espaço da solução, portanto, não garante o encontro de mínimos globais. Como uma metaheurística, os AG geram aleatoriamente uma série de soluções por iteração a serem avaliadas, buscando minimizar uma função objetivo. Cada solução é chamada de “indivíduo” e a série de soluções é uma “geração”, onde os diâmetros representam o “genótipo” do indivíduo. O algoritmo seleciona os indivíduos com melhor fenótipo (menor custo) para seguir uma segunda geração, onde os melhores indivíduos adaptados se reproduzem de forma aleatória, melhorando a solução. O algoritmo também leva em conta fenômenos, como mutação e recombinação (em baixa porcentagem) para dar uma melhor distribuição às soluções.



O dimensionamento pelo Lenhsnet foi por meio da interface do EPANET. Todos os dados relativos às redes exemplos foram inseridos, tais como cotas topográficas, comprimentos das redes, vazões nodais e custos. O EPANET é um programa que permite simular o comportamento hidráulico e de qualidade da água de um sistema de distribuição sujeito a diversas condições operacionais, durante um determinado período de funcionamento.

O processo de dimensionamento realizado no Excel baseou-se na obtenção dos valores ótimos dos diâmetros da rede através do Solver. Porém, a ferramenta necessita de uma estimativa inicial que se enquadra no campo das soluções existentes para resultar numa solução otimizada dentro das restrições estabelecidas pela hidráulica. Os valores iniciais dos diâmetros foram estimados partindo dos pontos de alimentação, atribuindo vazões aos trechos que respeitem as leis de conservação de massa nos nós e de energia nos anéis. O Solver adota os algoritmos gradiente reduzido generalizado (GRG2), proposto por Lasdon et al. (1997), e um método evolucionário. A partir dos diâmetros estimados, o Solver foi acionado, objetivando a minimização dos custos obedecendo as restrições de pressão mínima e velocidades máximas admitidas. O resultado proporciona uma solução otimizada, porém não real, pois os diâmetros propostos não são os comerciais disponíveis. Para encontrar o custo otimizado real, foi considerado o maior diâmetro comercial mais próximo dos que foram obtidos com o Solver, afim de conservar a conformidade da rede as restrições exigidas.

RESULTADOS

HANOÍ NETWORK

O sistema de distribuição de água de Hanói, no Vietnã, possui 3 anéis, 34 seções, 31 nós e 1 reservatório de nível fixo (Figura 1). Foi objeto de estudo originalmente de Fujiwara e Khang (1990), sendo adotado como estudo de caso por diversos pesquisadores ao longo dos anos (Cunha e Sousa, 1999; Eusuff e Lansey, 2003; Liong e Atiquzzaman, 2004; Suribabu e Neelakantan, 2006; Zecchin et al., 2006; Van Dijk, 2008). A Tabela 1 dispõe dos custos da tubulação de acordo com os respectivos diâmetros. Os dados do sistema encontram-se na Tabela 2. O nível de água no reservatório é de 100 m e a pressão mínima nos nós é de 30 mca. As cotas dos nós são iguais a zero. Considerou-se a velocidade máxima igual a 3,5 m/s e o coeficiente de Hazen-Williams (C) igual a 130.

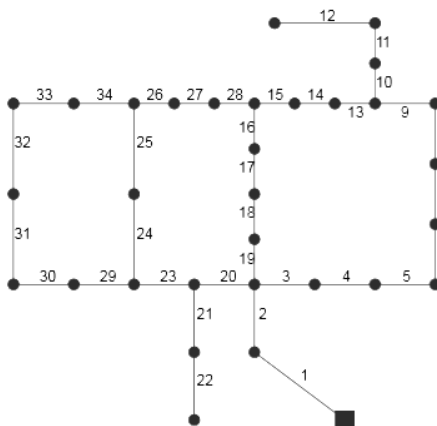


Figura 1: Esquema da Rede Hanói.

Tabela 2: Custos das tubulações – Rede Hanoi.

DIÂMETRO (mm)	CUSTO (\$/m)
304,8	45,73
406,4	70,40
508,0	98,38
609,6	129,30
762,0	180,80
1016,0	278,30
1231,2*	375,27
1435,4*	477,76

*Diâmetros para tubulações de ferro dúctil.



Tabela 1: Dados da Rede Hanói.

DADOS DOS TRECHOS		DADOS DOS NÓS	
ID NÓ	DEMANDA (m³/h)	ID TRECHO	COMPRIMENTO (m)
1	-	[1]	100
2	890	[2]	1350
3	850	[3]	900
4	130	[4]	1150
5	725	[5]	1450
6	1005	[6]	450
7	1350	[7]	850
8	550	[8]	850
9	525	[9]	800
10	525	[10]	950
11	500	[11]	1200
12	560	[12]	3500
13	940	[13]	800
14	615	[14]	500
15	280	[15]	550
16	310	[16]	2730
17	865	[17]	1750
18	1345	[18]	800
19	60	[19]	400
20	1275	[20]	2200
21	930	[21]	1500
22	485	[22]	500
23	1045	[23]	2650
24	820	[24]	1230
25	170	[25]	1300
26	900	[26]	850
27	370	[27]	300
28	290	[28]	750
29	360	[29]	1500
30	360	[30]	2000
31	105	[31]	1600
32	805	[32]	150
		[33]	860
		[34]	950

Os resultados obtidos com a aplicação dos métodos são mostrados na Tabela 3. A Figura apresenta o mapa de isolinhas de pressão da rede (Figura 2), visando à facilidade de interpretação do comportamento da pressão.

Tabela 3: Resultados do dimensionamento - Rede Hanói.

SOFTWARE	CUSTO (\$)	TEMPO DE PROCESSAMENTO (segundos)	PRESSÃO MÍNIMA (mca)
UFC4	\$ 5.456.996,10	31	30,97
REDES	\$ 5.495.512,60	2	31,55
Lenhsnet	\$ 5.454.954,20	22	30,44
Excel (Solver)	\$ 6.076.095,80	8	30,00

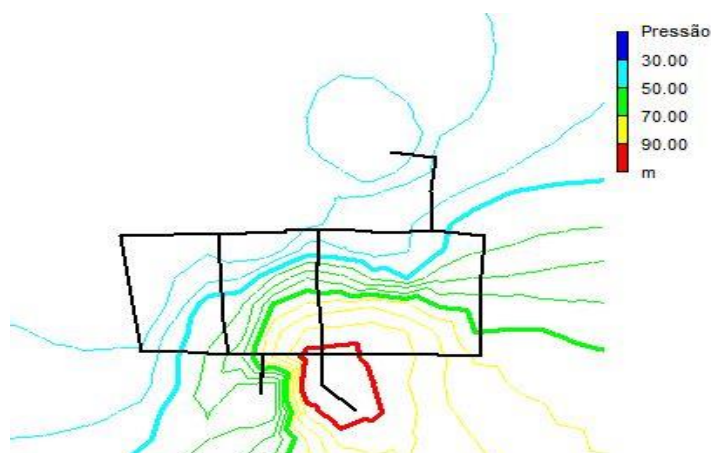


Figura 2: Mapa de isolinhas de pressão - Rede Hanói.

NEW YORK TUNNEL NETWORK

O rede *New York Tunnel* (Figura 3) é abastecida por um reservatório, sendo composta por 20 nós e 21 trechos. O reservatório localiza-se na cota 91,44 m enquanto os nós possuem elevação variada. A rede é usada como referência desde 1996 (Schaake e Lai, 1996) como referência pela literatura. A Tabela 4 dispõe dos dados do sistema.

Tabela 4: Dados da Rede *New York Tunnel*

DADOS DOS TRECHOS			DADOS DOS NÓS	
ID NÓ	COTAS (m)	DEMANDA (L/s)	ID TRECHO	COMPRIMENTO (m)
1	91,437	-	[1]	3535,564
2	47,724	2616,476	[2]	6031,842
3	47,724	2616,476	[3]	2224,967
4	47,724	2497,546	[4]	2529,757
5	47,724	2497,546	[5]	2621,194
6	47,724	2497,546	[6]	5821,489
7	47,724	2497,546	[7]	2925,984
8	47,724	2497,546	[8]	3809,875
9	47,724	4813,863	[9]	2925,984
10	47,724	2831,684	[10]	3413,648
11	47,724	4813,863	[11]	3413,648
12	47,724	3315,903	[12]	3718,438
13	47,724	3315,903	[13]	7345,439
14	47,724	2616,476	[14]	6431,069
15	47,724	2616,476	[15]	4724,245
16	47,724	4813,863	[16]	8046,456
17	53,149	1628,190	[17]	9509,447
18	47,724	3315,903	[18]	7314,960
19	47,724	3315,903	[19]	4388,976
20	47,724	4813,863	[20]	11703,940
			[21]	8046,4560

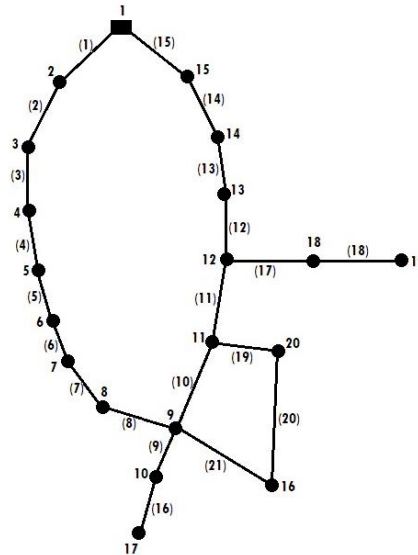


Figura 3: Esquema da Rede New York Tunnel.

A pressão mínima nos nós da rede é de 30 mca. A velocidade máxima de 3,5 m/s e o coeficiente de Hazen-Williams (C) igual a 130. Os diâmetros considerados na otimização da rede, junto com seus respectivos custos, encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5: Custos das tubulações – Rede New York Tunnel

DIÂMETRO (mm)	CUSTO (\$/m)
914,4	306,76
1219,2	439,63
1524,0	577,43
1828,8	725,07
2133,6	875,58
2418,4	1036,75
2743,2	1197,52
3048,0	1368,11
3352,8	1518,71
3657,6	1712,60
3962,4	1895,04
4267,2	2073,49
4572,0	2360,50
4836,8	2447,51
5181,6	2637,80

Os resultados obtidos no dimensionamento otimizado para a rede *New York Tunnel* encontram-se na Tabela 6 e na Figura 4.

Tabela 6: Resultados do dimensionamento – Rede New York Tunnel.

SOFTWARE	CUSTO (\$)	TEMPO DE PROCESSAMENTO (segundos)	PRESSÃO MÍNIMA (mca)
UFC4	\$ 167.541.589,09	21	30,40
REDES	\$ 185.951.487,61	1	30,17
Lenhsnet	\$ 167.541.307,39	27	30,07
Excel (Solver)	\$ 156.089.160,59	2	30,00

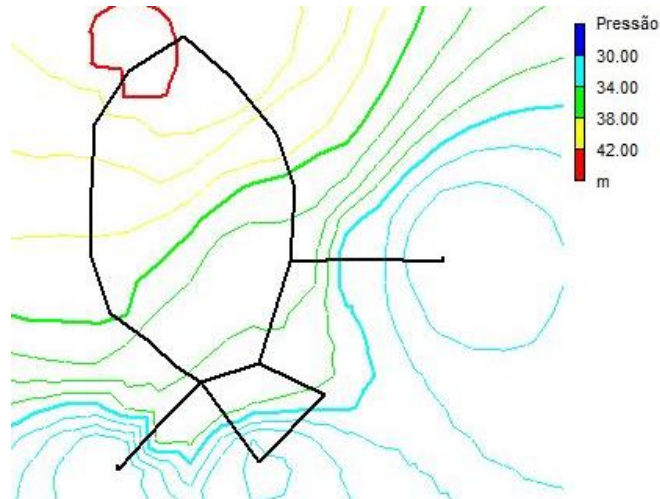


Figura 4: Mapa de isolinhas de pressão da Rede New York Tunnel.

TWO-LOOP NETWORK

A rede *Two-loop* (Figura 5) foi proposta por Alperovits e Shamir (1977), e é formada por oito trechos distribuídos em dois anéis. A rede é abastecida por gravidade a partir de um reservatório que possui carga constante, a uma cota de 210 m. Cada nó deve ter uma pressão mínima requerida igual a 30 m, sendo que todos os trechos possuem um comprimento igual a 1.000 m. A Tabela 7 informa os dados de cotas e demandas dos nós e o comprimento de cada trecho.

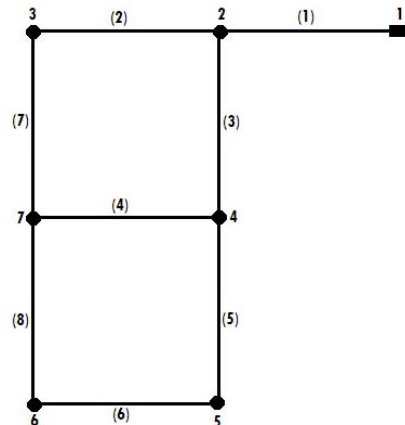


Figura 5: Esquema da Rede *Two-loop*.

Tabela 7: Dados da Rede *Two-loop*.

DADOS DOS TRECHOS			DADOS DOS NÓS	
ID NÓ	COTAS (m)	DEMANDA (m³/h)	TRECHO	COMPRIMENTO (m)
1	210	-	[1]	1000
2	150	100	[2]	1000
3	160	100	[3]	1000
4	155	120	[4]	1000
5	165	270	[5]	1000
6	160	330	[6]	1000
7	150	200	[7]	1000
			[8]	1000



Os preços dos tubos por unidade de comprimento, para diâmetros comerciais, são apresentados na Tabela 8. O coeficiente de Hazen-Williams (C) utilizado é igual a 130. Os resultados obtidos são mostrados da Tabela 9 e na Figura 6.

Tabela 8: Custos das tubulações – Rede Two-loop.

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	550

Tabela 9: Resultados do dimensionamento - Rede Two-loop.

SOFTWARE	CUSTO (\$)	TEMPO DE PROCESSAMENTO (segundos)	PRESSÃO MÍNIMA (mca)
UFC4	\$ 500.000,00	34	32,78
REDES	\$ 822.000,00	66	36,61
Lenhsnet	\$ 500.000,00	4	31,43
Excel (Solver)	\$ 1.145.000,00	1	30,00

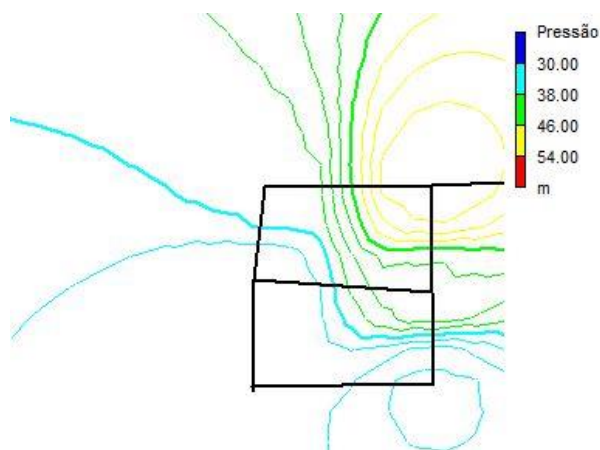


Figura 6: Mapa de isolinhas de pressão da Rede Two-loop.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos em cada *software* demonstraram o surgimento de padrões que possibilitem uma hierarquização considerando os critérios admitidos (custo da rede e tempo de processamento). O UFC apresentou, para todas as redes, o menor custo. Sua desvantagem reside no tempo de processamento



relativamente alto em comparação com os demais. O Lenhsnet e o UFC4 apresentaram os melhores custos para as redes *Hanoi*, *New York Tunnel* e *Two-loop*. Para uma melhor avaliação, é necessário a avaliação destes modelos em redes de médio e grande porte.

O programa REDES, apesar de expor custos um pouco elevado possui um tempo de processamento muito baixo. O resultado do dimensionamento, no que diz respeito aos custos, pode ser melhorado através da alteração dos parâmetros do método de otimização. De forma geral, quanto menor o custo, maior o tempo de processamento. O Lenhsnet mostrou valores mínimos próximos ao ótimo da literatura, com tempo de processamento condizente com a complexidade da rede.

Os resultados propostos através do GRG2, apesar de possuírem pequenos tempos de processamento, possuem a desvantagem de ainda se fazer necessário a compatibilização dos diâmetros para encontrar os valores reais dos custos da rede, o que demanda um trabalho manual que seria dispensado nos demais *softwares*. Além de, proporcionar, em alguns casos, custos totais maiores que o dobro do mínimo encontrado, como foi o caso da rede *Two-loop*. A grande desvantagem do EXCEL é o tempo necessário para elaboração da planilha e a falta de flexibilidade de alterações no sistema avaliado.

CONCLUSÃO

O estudo apresentou as principais vantagens e desvantagens de quatro modelos computacionais no dimensionamento de redes de referência da literatura. Com exceção do Excel, todos os programas apresentaram soluções satisfatórias para o dimensionamento otimizado dos sistemas de distribuição de água avaliados.

Notou-se, no entanto, que os resultados obtidos pelo Lenhsnet apresentam a melhor relação de custo mínimo e tempo de processamento para os exemplos avaliados. Porém, o UFC também se mostra eficiente no dimensionamento desses sistemas e tem como uma de suas vantagens a possibilidade de realização do desenho da rede com a utilização de dados topográficos (curvas de nível), o que o torna mais atrativo para dimensionamento de sistemas de distribuição onde o traçado ainda não foi definido. Ambos apresentaram os melhores custos para as redes *Hanoi*, *New York Tunnel* e *Two-loop*. Para uma melhor avaliação, é necessário a avaliação destes modelos em redes de médio e grande porte.

Considerando os resultados obtidos das análises das aplicações dos *softwares* as redes apresentadas, os critérios pontuados para avaliação de cada um, pode-se concluir que o presente estudo pode proporcionar aos usuários uma avaliação objetiva para escolher qual destes é o mais adequado para os seus projetos, baseados em suas metas, restrições e dados disponíveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FACEPE - Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de PE pelo apoio à realização da pesquisa.

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. ANUNCIAÇÃO, T. S. *Proposição de critérios para a hierarquização de softwares utilizados na avaliação de perdas e indicadores de desempenho em sistemas de abastecimento de água*. Revista DAE, v. 65, n. 208, p. 83-85, 2017.
3. BRASIL. Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Política Nacional dos Recursos Hídricos. Brasília, DF, jan. 1997.
4. COSTA, L. H. M., CASTRO, M. A. H. *UFC4 - Software de dimensionamento econômico de redes de distribuição de água*. In: VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2006, Gravatá. Anais do VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2006. v. 1. p. 1-11.
5. CUNHA, M. D. C., SOUSA, J. *Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach.. J. Water Resour*, v. 4, n. 125, p. 215-221, 1999.



6. EUSUFF, M. M., LANSEY, K. E. *Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm*. *J. Water Resour*, v.3, n.129, p. 210-225, 2003.
7. 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.
8. GOMES, H. P., BEZERRA, S. T. M., CARVALHO, P. S. O., SALVINO, M. M. *Optimal dimensioning model of water distribution systems*. *Water SA*, v. 35, n. 4, 2009.
9. LASDON, L. S., WARREN, A. D. *GRG2 User's Guide*. *Department of Management Science and Information Systems, University of Texas at Austin, Texas*, p. 54, 1997.
10. LIONG, S.-Y., ATIQUZZAMAN, M. D. *Optimal design of water distribution network using shuffled complex*. *Evolution. Journal of The Institution of Engineers*, v.44, n.1, p. 97-107, 2004.
11. MELIA, D. M. *Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia*. Valencia, 2012. Tese de doutorado- Departamento de engenharia hidráulica e ambiental – Universidade Politécnica de Valencia, 2012.
12. QUINDRY, G. E., BRILL, E. D., LIEBMAN, JR., J., ROBINSON, C. A. R. *Comment, on 'Design of Optimal Water Distribution Systems' by E. Alperovits and U. Shamir*. *WATHR RESOURCES RESEARCH*, v.15, n.6, p. 1651-1654, 1979.
13. SALDARRIGAL, J., LOPEZ, L., PAEZ, D., LUNA, D., GONZÁLEZ, S. *Optimized Design of Water Distribution Networks (Software REDES)*. *XV Seminario Iberoamericano de Redes de Agua e Drenagem, SEREA2017*, 2017.
14. SAVIC, D. A., WALTERS, G. A. *Genetic Algorithms for the Least-cost Design of Water Distribution Networks*, *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n. 2, p. 67-77, 1997.
15. SCHAAKE, J., LAI, D. (1969). *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, 1969.
16. SURIBABU, C. R., NEELAKANTAN, T. R. (2006). *Design of water distribution networks using particle swarm optimization*. *Urban Water*, v.2, n.3, p. 111-120, 2006.
17. VAN DIJK, M., VAN VUUREN, S. J., VAN ZYL, J. E. (2008). *Optimising water distribution systems using a weighted penalty in a genetic algorithm*. *Water SA*, v.5, n.34, p. 537-548, 2008.
18. WU, Z.Y., SIMPSON, A.R. *Competent genetic–evolutionary optimization of water distribution systems*. *Journal of Computing in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers*, v.15, n.2, p. 89–101, jan. 1994.