

Dimensionamento de redes de distribuição de água utilizando Teoria dos Grafos

Dimensioning of water distribution networks using Graph Theory

DOI:10.34117/bjdv7n5-589

Recebimento dos originais: 07/04/2021

Aceitação para publicação: 26/05/2021

Nathalia Francisca de Sousa Farias

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Piauí - UFPI

Instituição: Universidade Federal do Piauí – UFPI

Endereço: Centro de Tecnologia, Campus Universitário Ministro Petrônio Portela - Ininga, Teresina - PI, Brasil.

E-mail: natfarias16@hotmail.com

Jordana Madeira Alaggio Ribeiro

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Piauí - UFPI

Instituição: Universidade Federal do Piauí – UFPI

Endereço: Centro de Tecnologia, Campus Universitário Ministro Petrônio Portela - Ininga, Teresina - PI, Brasil.

E-mail: jordanaalaggio@gmail.com

Alessandro de Araújo Bezerra

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará - UFC

Instituição: Universidade Federal do Piauí – UFPI

Endereço: Centro de Tecnologia, Campus Universitário Ministro Petrônio Portela - Ininga, Teresina - PI, Brasil.

E-mail: alessandrobezerra@ufpi.edu.br

Renata Shirley de Andrade Araújo

Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará - UFC

Instituição: Universidade Federal do Piauí – UFPI

Endereço: Centro de Tecnologia, Campus Universitário Ministro Petrônio Portela - Ininga, Teresina - PI, Brasil.

E-mail: renatashirley@ufpi.edu.br

RESUMO

Em um sistema de abastecimento de água, a rede de distribuição permite a chegada de água em condições adequadas aos consumidores e, para isso, é necessário um criterioso dimensionamento. Neste trabalho, foi elaborado um método para dimensionar redes de distribuição de água por meio de uma rotina computacional que combina gradientes hidráulicos obtidos por Hazen-Williams com simulações realizadas através do EPANET com a Teoria dos Grafos. Quatro redes foram dimensionadas e realizou-se uma comparação técnica e econômica entre a metodologia desenvolvida e um método convencional. Ambos buscaram respeitar os parâmetros hidráulicos determinados, encontrando pressões similares, no entanto, o método proposto alcançou resultados mais econômicos, sendo o recomendado.

Palavras-chaves: redes de distribuição de água, dimensionamento, Teoria dos Grafos, EPANET, Hazen-Williams.

ABSTRACT

In a water supply system, distribution network allows that consumers receive water in proper condition, in function of it, engineers need to size networks' elements judiciously. In this work, a method to design water distribution networks has been elaborated, it combines hydraulics gradients acquired by means of Hazen-Williams' equation with EPANET's simulations and Graph Theory's concepts. Elements of four networks were sized by the proposed methodology. Also, a technical and economic analyze between networks designed by the new method and by a conventional one will be presented. Both sought to respect the hydraulic parameters determined, finding similar pressures, but the proposed method has reached better outcomes economically.

Keywords: water distribution networks, design, sizing, Graph Theory, EPANET, methodology, Hazen-Williams.

1 INTRODUÇÃO

Na Gestão de Projetos, Jugend, Barbalho e Silva (2014) explicam que é necessidade das empresas conduzir simultaneamente diferentes projetos dentro de prazos determinados, com qualidade e orçamento restrito. Um sistema de abastecimento de água é dividido em várias partes, entre elas, a rede de distribuição, definida como um conjunto de tubulações e acessórios que tem como função levar a água com qualidade aos consumidores de forma contínua em quantidade e pressão recomendada (TSUTIYA, 2006). A rede de distribuição é o componente final do sistema de abastecimento, sendo o mais próximo ao cliente, além disso, é responsável pelo custo majoritário da obra, exigindo um dimensionamento que vise à redução dessa parcela onerosa (PINNTO et al., 2017).

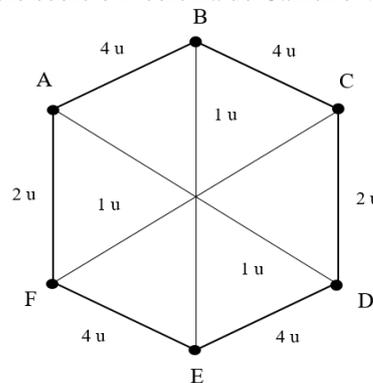
Um dos softwares mais conhecidos e utilizados na simulação hidráulica de redes de distribuição é o EPANET (ROSSMAN, 2000) que, apesar de oferecer simulações com resultados confiáveis, não contém funções para dimensionamento na sua rotina computacional. Assim, o estudo de metodologias de dimensionamento tem atraído a atenção do público acadêmico/científico na área da engenharia, gerando o desenvolvimento de métodos como aplicação de Algoritmos Genéticos (ALENCAR-NETO e CASTRO, 2004) ou o LENHSNET apresentado em Gomes (2004) e Gomes e Salvino (2007).

A Teoria dos grafos é um campo da Matemática que estuda o conjunto de objetos interligados entre si utilizando elementos, chamados grafos, que podem ser definidos

como redes, fechadas ou não, que são formadas por vértices (elementos de um conjunto aleatório) e arestas que são pares não ordenados dos seus respectivos vértices (COSTA, 2011). Quando atributos numéricos não negativos são vinculados às arestas, o grafo é classificado como ponderado e tais atributos são chamados de pesos.

Um exemplo prático envolvendo grafos ponderados é o Problema do Caixeiro Viajante em que a solução consiste em encontrar o percurso de menor distância que passa por um conjunto de cidades, sendo que cada cidade é visitada exatamente uma vez e ao fim da jornada, o caixeiro deve se encontrar no ponto de partida (BARAGLIA, HIDALGO e PEREGO, 2001). No exemplo da Figura 1, o nó A seria o ponto de partida do caixeiro e os nós B, C, D, E e F as demais cidades que ele deve visitar. O caminho mais curto tem 13 unidades de comprimento e, neste caso, tem mais de uma configuração sendo uma delas: A-D-C-F-E-B-A. Devido a soluções para problemas como esses, grafos são aplicados em problemas referentes a otimização nas mais diversas áreas da engenharia: Yang, Zhang e Zhuang (2008) abordam estes elementos em trabalhos relacionados a engenharia de tráfego, já Price e Ostfeld (2016) utilizam os grafos na própria engenharia hidráulica.

Figura 1: Exemplo sobre o Problema do Caixeiro Viajante



Fonte: Autores

Nesse trabalho foi elaborado um método de dimensionamento de diâmetros de redes de abastecimento de água por meio de uma rotina computacional combinando gradientes hidráulicos e Teoria dos Grafos, em que quatro redes foram dimensionadas pelo método proposto e por um método convencional e tiveram seus resultados comparados entre si. As redes para esse trabalho foram dimensionadas utilizando a equação de Hazen-Williams, porém também é oferecido uma opção de dimensionamento utilizando a equação de Darcy-Weisbach. Dentre as diversas formas de calcular o fator

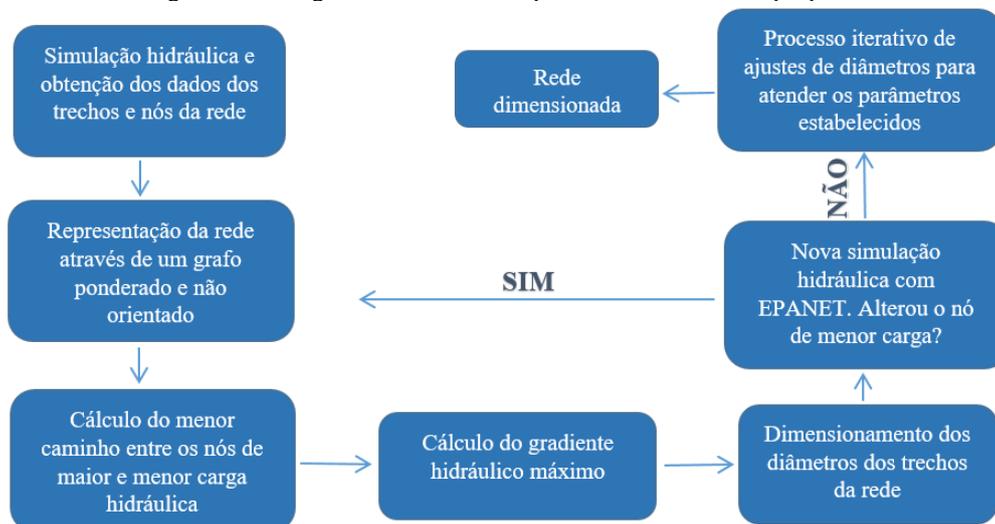
de atrito (ARAÚJO et al, 2021), foi escolhida a equação de Swamee-Jain, assim como é feito no EPANET.

2 METODOLOGIA

2.1 MÉTODO PROPOSTO

O método de dimensionamento desenvolvido foi codificado na linguagem computacional Python e utiliza o arquivo “.inp” de rede do EPANET, como dados de entrada, para a realização das simulações hidráulicas através da biblioteca epanet2.dll. A rotina computacional segue o fluxograma mostrado na Figura 2:

Figura 2: Fluxograma da rotina computacional do método proposto



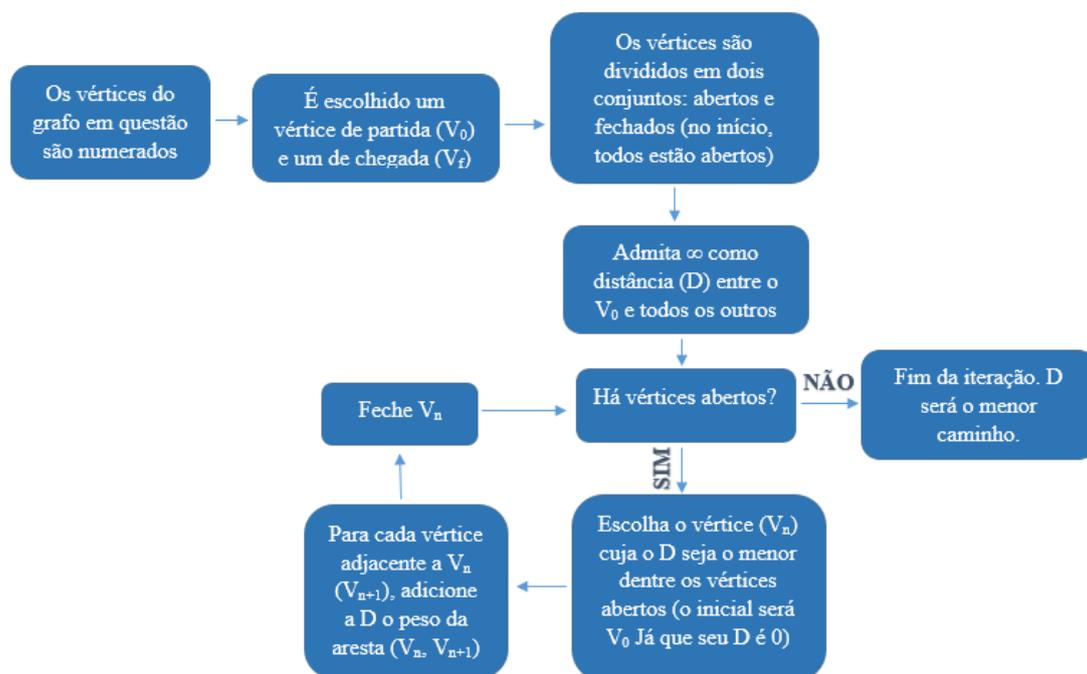
Fonte: Autores

A primeira fase do processo armazena dados importantes como o número de nós da rede, números de tubulações, acessórios presentes. Uma primeira simulação é realizada e os resultados hidráulicos atuais da rede, tais como carga hidráulica, vazão, velocidade, perda de carga unitária e pressão dinâmica, também são armazenados. Em seguida, a rede de distribuição de água é transformada em um grafo ponderado e não-direcionado, ou seja, o sentido do escoamento independe do sentido de fluxo da simulação inicial, onde cada junção ou nó corresponde a um vértice e cada tubulação corresponde a uma aresta, cada aresta recebe seu comprimento, em metros, como peso.

Com o grafo já criado, são selecionados os pontos de maior e menor carga hidráulica, determinando o ponto inicial e final do fluxo da rede, em seguida é calculado o caminho de menor peso entre eles (mais curto). Para calcular o caminho mais curto foi

utilizado o Algoritmo de Dijkstra que foi desenvolvido em 1959. O Algoritmo permite encontrar o caminho de menor custo (peso) entre um ponto e os demais do grafo e é baseado no seguinte princípio: Considerando três vértices ligados linearmente (v,w,u), se o caminho mais curto entre os vértices u e v passa ao longo do vértice w, a parte do caminho que passar de w para v deve ser o caminho mais curto entre todos os caminhos de w a v (TORRUBIA e TERRAZAS, 2001). De acordo com Barros et al. (2007), esse raciocínio deve ser expandido para cada vértice do grafo, o algoritmo segue o fluxograma mostrado na Figura 3:

Figura 3: Fluxograma do Algoritmo de Dijkstra



Fonte: Autores

O método proposto se baseia em calcular os diâmetros dos trechos da rede de distribuição em função do gradiente hidráulico máximo para a rede, em que o comprimento do caminho mais curto entre os pontos de maior e menor carga hidráulica é aplicado para encontrá-lo, como apresentado na Equação 1:

$$\nabla H_{max} = \frac{\Delta H}{L_{min}} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_{min}} \quad (1)$$

Em que:

∇H_{max} = Gradiente hidráulico máximo dos trechos (m/m)

ΔH = Perda de carga entre o ponto de maior carga hidráulica e menor carga hidráulica (m).

H_{max} = Carga hidráulica máxima ou fonte de energia da rede (m).

H_{min} = Cota do terreno do nó de menor carga hidráulica, com base na simulação hidráulica anterior, somada à pressão mínima permitida na rede, com valor padrão de 10 m.c.a conforme a NBR 12218 (ABNT, 2017).

L_{min} = Comprimento do menor caminho encontrado através do Algoritmo de Dijkstra (m).

A substituição da carga hidráulica mínima por uma parcela fixa consiste em forçar o ponto de menor carga hidráulica a obedecer à norma convencionada para a pressão dinâmica mínima.

Para o dimensionamento, isola-se o diâmetro na Fórmula de Hazen-Williams e aplica-se a Equação 2 nos trechos da rede de distribuição, considerando o máximo gradiente hidráulico encontrado:

$$D = \sqrt[4,87]{10,65 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} \sqrt{H_{max}}}} \quad (2)$$

Em que:

D = Diâmetro mínimo calculado (m)

Q = Vazão do trecho (m^3/s)

C = Coeficiente de rugosidade ($m^{0,367}/s$)

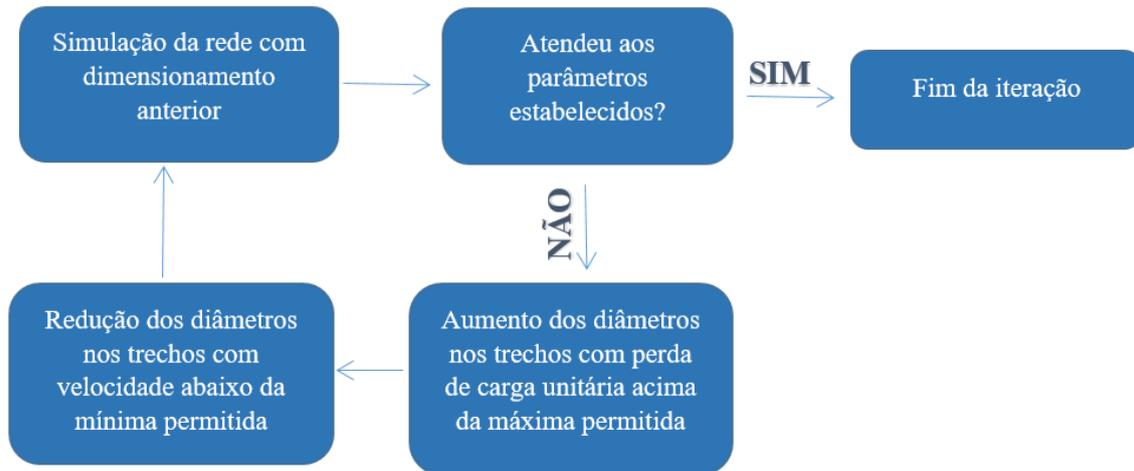
Após o cálculo, o arquivo de entrada é modificado, substituindo o antigo diâmetro pelo Diâmetro comercial imediatamente superior ao diâmetro calculado para cada trecho da rede.

O processo descrito até aqui é repetido diversas vezes e, a cada ciclo, uma simulação do EPANET é realizada e novos dados são utilizados no processo, iterando os resultados até que eles se tornem estáveis.

A próxima etapa é uma nova iteração, aumentando ou diminuindo os diâmetros de todos os trechos até que sejam obedecidas as normas técnicas aplicadas na rede ou que se chegue a um número máximo de iterações. A cada ciclo, uma simulação é realizada,

novos dados são analisados e os diâmetros são corrigidos, o ciclo é representado na Figura 4. Ao fim desta iteração, uma última simulação é realizada e o resultado final é obtido.

Figura 4: Fluxograma da rotina de atendimento às normas técnicas



Fonte: Autores

2.2 COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO PROPOSTO E O DIMENSIONAMENTO CONVENCIONAL EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Foram realizadas comparações técnicas e econômicas entre o dimensionamento obtido através do método proposto com o dimensionamento por um método convencional, este método baseia-se em alterar os diâmetros dos trechos da rede de distribuição de acordo com a vazão encontrada através de simulação prévia através do uso do EPANET. A substituição dos diâmetros é realizada até que não seja mais necessário, ou seja, até que os diâmetros de todos os trechos estejam estabelecidos de acordo com a vazão máxima limitada pelos valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Tabela utilizada para dimensionamento de redes de distribuição abordada no Porto (2006)

D (mm)	Q _{máx} (L/s)	D (mm)	Q _{máx} (L/s)
50	1,34	200	28,27
60	1,95	250	47,86
75	3,14	300	74,22
100	5,89	350	108,72
125	9,69	400	150,8
150	14,67	500	265,1

Fonte: Porto (2006)

Para a análise econômica, as estimativas de preços das tubulações e dos serviços utilizadas são dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Preços e Índices para Construção Civil – SINAPI (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2020) referentes à Brasília-DF,

exceto no caso de tubos de 60mm, devido a inexistência de dados de custos referentes a esse diâmetro, cujos valores foram estimados através de uma média entre os custos de cada item dos diâmetros de 50mm e 75mm. Na Tabela 2 são mostrados os custos estimados para cada metro construído para diâmetros diferentes, com bases nos principais, e mais comuns, serviços e insumos necessários na construção de redes de distribuição para os diâmetros necessários nas redes de distribuição analisadas neste trabalho. Foram definidos, para o orçamento, a utilização de valas de 0,6 metros, recobrimento de 0,9 metros e a escavação dividida em 80 % de forma mecanizada e 20% manual.

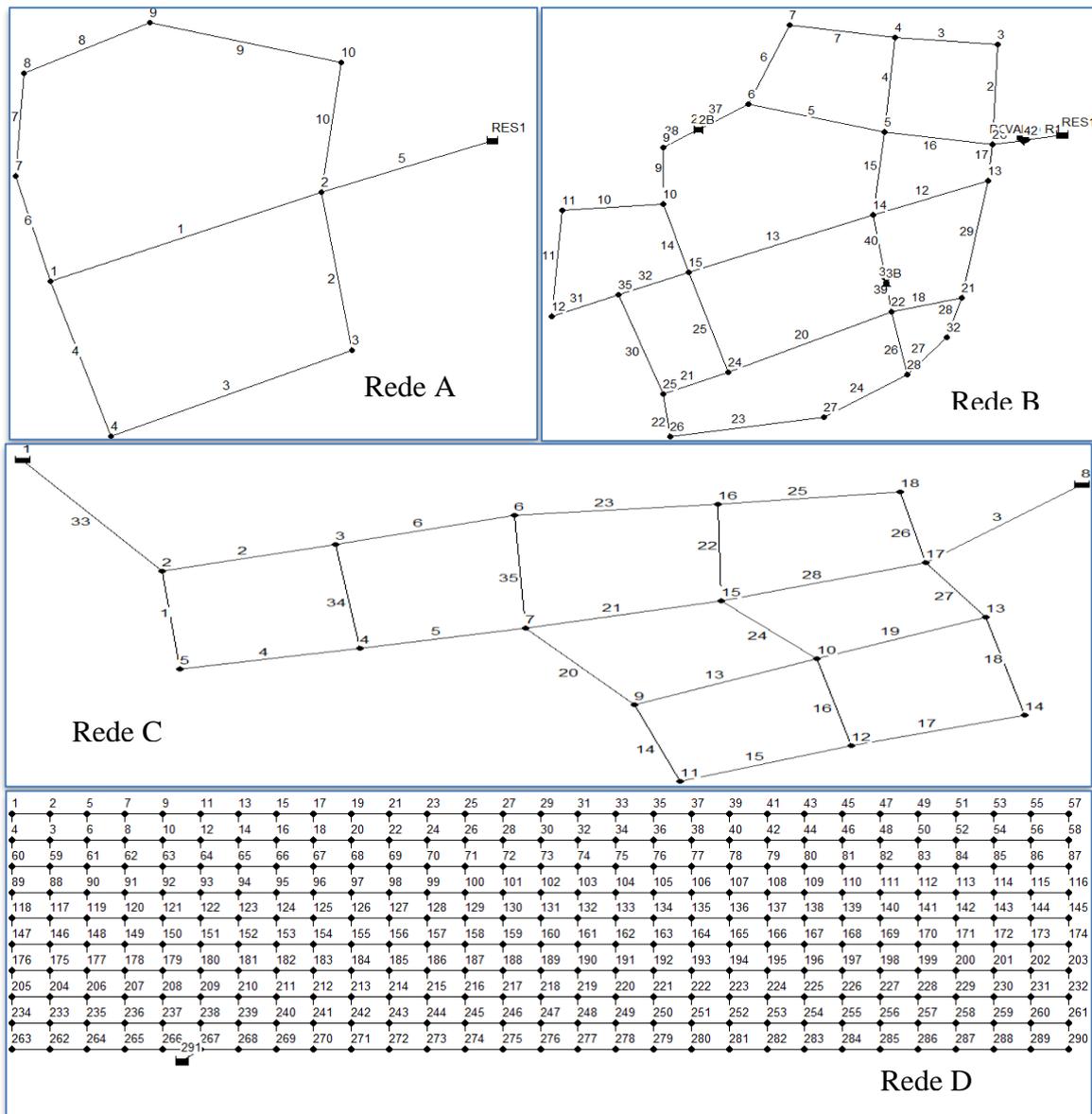
Tabela 2: Custo unitário das tubulações e do assentamento segundo a SINAPI

SERVIÇO	CUSTO DE 1 METRO DE TUBULAÇÃO POR DIÂMETRO (mm)							
	50	60	75	100	150	200	250	300
Tubo PVC PBA JEI, Classe 12 / Tubo PVC DEFOFO, JEI, 1 MPA	12,83	19,74	26,64	43,31	97,24	164,80	250,88	356,26
Locação de rede de água ou esgoto	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33
Assentamento de tubo de PVC para rede de água	1,39	1,67	1,94	2,46	3,55	6,77	8,33	9,89
Escavação mecanizada de vala	3,26	3,29	3,34	3,43	3,60	3,77	3,94	4,11
Escavação manual de vala	6,80	6,87	6,98	7,16	7,52	7,87	8,23	8,59
Carga, manobras e descarga de areia, brita, pedra de mão e solos	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,04	0,06
Transporte de entulho com caminhão basculante 6 m ³	0,01	0,01	0,02	0,03	0,07	0,12	0,18	0,26
Reaterro mecanizado de vala com escavadeira hidráulica	7,52	7,59	7,69	7,84	8,11	8,32	8,49	8,60
TOTAL	35,14	42,49	49,94	67,56	123,42	195,01	283,42	391,10

Fonte: Autores

Os dimensionamentos realizados visaram respeitar os critérios definidos através da NBR 12218 (ABNT, 2017), que determina 10 m/km para perda de carga unitária máxima, 0,4 m/s para velocidade mínima e 10 m.c.a para pressão mínima. Neste trabalho, os dimensionamentos foram realizados em quatro redes de distribuição, denominadas Redes A, B, C e D, que são apresentadas a seguir na Figura 5.

Figura 5: Redes dimensionadas



Fonte: Autores

A Rede A é uma rede malhada formada por 2 anéis e contém um reservatório, que fornece energia ao sistema, 8 nós e 10 trechos que somam extensão total de 924,3 metros. Já a Rede B, mais complexa, é formada por 10 anéis, um reservatório, com energia fornecida ao sistema através de uma bomba hidráulica, 29 nós, 3 válvulas (duas válvulas redutoras de pressão e uma válvula de controle de perda de carga fixa) e 35 trechos que somam extensão total de 2.459,052 metros.

A Rede C utilizada apresenta 8 anéis, mas tem sua fonte hídrica e de energia dividida em 2 reservatórios, além de conter 16 nós e 25 trechos que somam extensão total de 1.831,35 metros. Já a Rede D é uma rede de porte maior que as outras, é formada por

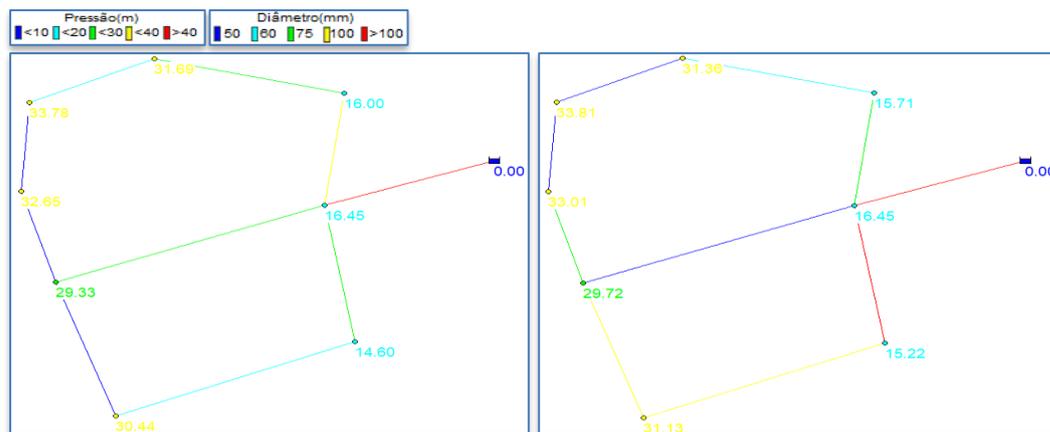
252 anéis e contém um reservatório, 290 nós e 542 trechos que somam extensão total de 28.581,896 metros.

3 RESULTADOS

3.1 ANÁLISE TÉCNICA

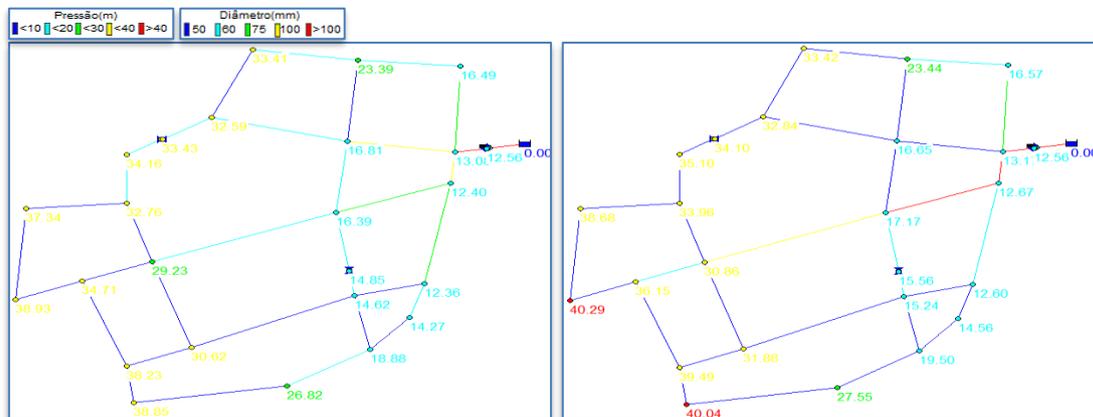
A seguir, para cada uma das redes de distribuição analisadas neste trabalho, serão realizadas comparações entre as pressões nos nós, avaliando se houve diferença significativa entre as duas metodologias de dimensionamento realizadas, e a distribuição da variação entre os diâmetros nas redes, verificando a homogeneidade de mesmo valor de diâmetros em uma mesma região, o que diminui erros de construção, além de facilitar manutenção e ampliação futura da rede, principalmente quando maiores diâmetros se encontram próximos aos reservatórios. Nas Figuras 6, 7, 8 e 9 são apresentadas as comparações dos dimensionamentos das Redes A, B, C e D, respectivamente.

Figura 6: Comparação dos resultados na Rede A entre Método proposto (à esquerda) e Método convencional (à direita)



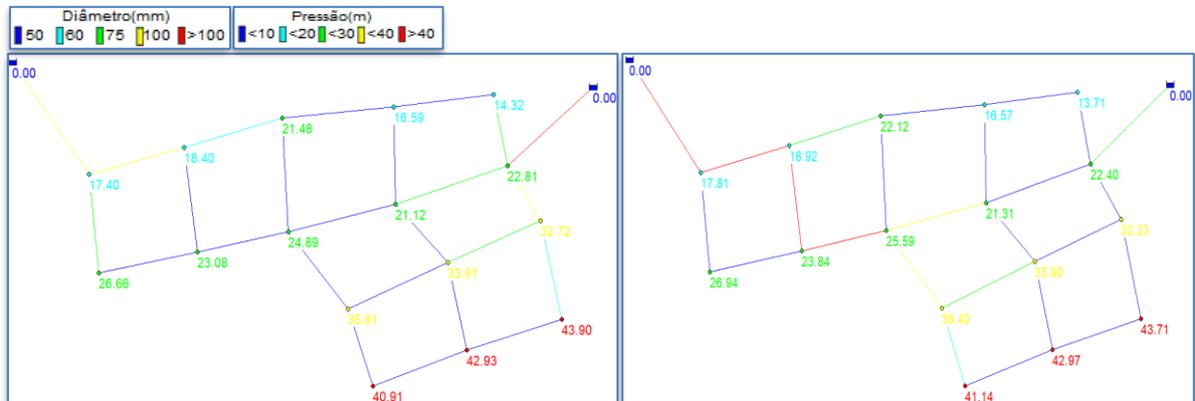
Fonte: Autores

Figura 7: Comparação dos resultados na Rede B entre Método proposto (à esquerda) e Método convencional (à direita)



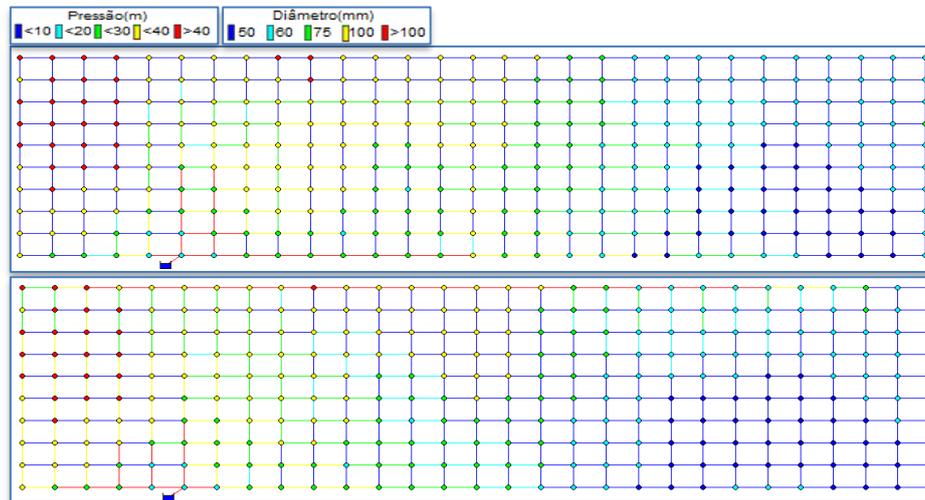
Fonte: Autores

Figura 8: Comparação dos resultados na Rede C entre Método proposto (à esquerda) e Método convencional (à direita)



Fonte: Autores

Figura 9: Comparação dos resultados na Rede D entre Método proposto (superior) e Método convencional (inferior)

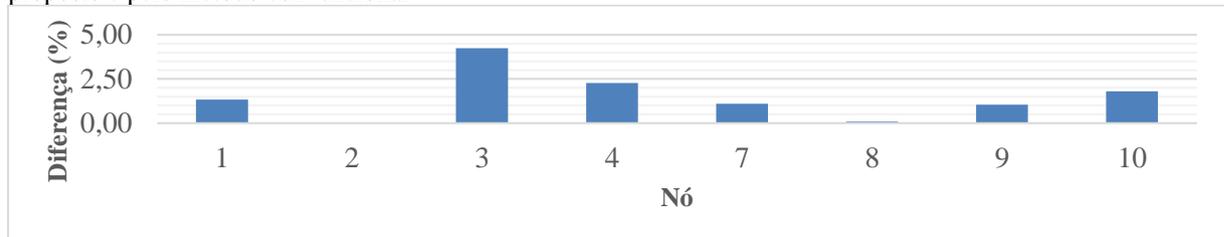


Fonte: Autores

Para a Rede A, através do método proposto, obteve-se pressões máxima e mínima iguais a 33,78m e 14,6m, respectivamente, enquanto para o método convencional os valores foram 33,81m e 15,22m. Como ambos os métodos foram aplicados para atender as recomendações da NBR 12218 (ABNT, 2017), como pressão mínima e máxima perda de carga unitária, máximas pressões similares e um diferença relevante na menor pressão indica que o método proposto força mais o uso da perda de carga para diminuir pressões, consequentemente, diâmetros. As diferenças percentuais entre as pressões, em todos os nós, não passaram de 4,25%, como pode ser visto na Figura 10. Em relação à distribuição dos diâmetros da Rede A, com uso do método proposto, percebe-se que os maiores diâmetros se localizam próximos ao reservatório, sendo possível,

inclusive, de reconhecer o percurso do fluxo hídrico ao longo da diminuição de diâmetros dos trechos. Já para o método convencional, percebe-se diâmetros de 100mm mais distantes do reservatório que diâmetros de 50mm.

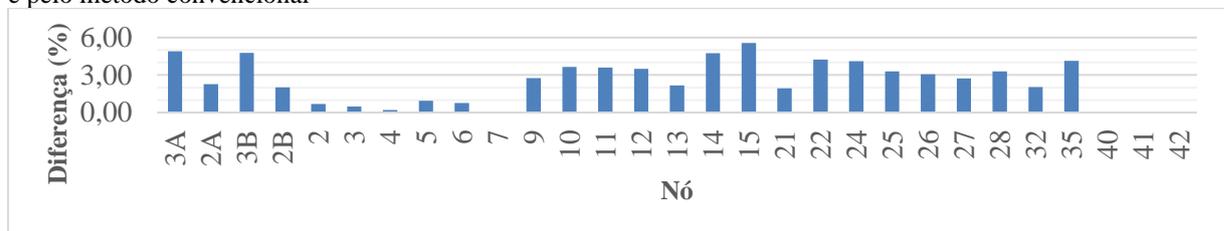
Figura 10: Diferença percentual entre as pressões nos nós da Rede A dimensionada pelo método proposto e pelo método convencional



Fonte: Autores

Quanto à Rede B, com dimensionamento através do método proposto, as pressões variaram de 38,93m até 10,69m, já com uso do método convencional, variaram de 40,29m à 10,69m. Nesse caso, apesar de o uso do método proposto ter encontrado, como regra geral, menores pressões, as diferenças não foram significativas, atingindo, no máximo, 5,58%, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11: Diferença percentual entre as pressões nos nós da Rede B dimensionada pelo método proposto e pelo método convencional



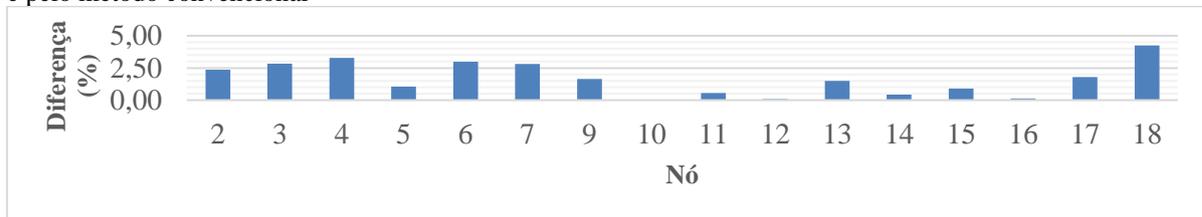
Fonte: Autores

A distribuição de diâmetros ao longo da Rede B, com o dimensionamento realizado através do método proposto, tendeu a gerar anéis principais, ou seja, anéis com maiores diâmetros alimentando o restante da rede. Já quando a rede foi dimensionada pelo método tradicional, a distribuição dos diâmetros apresentou uma configuração de ramais principais, ou seja, ramais com maiores diâmetros responsáveis por distribuir as vazões para os anéis da rede.

No caso da Rede C, as pressões máximas e mínimas, com dimensionamento realizado pelo método proposto e pelo método convencional são, respectivamente, 43,90m e 43,71m; e 14,32m e 13,71m. Nesse caso, a existência de 2 reservatórios é responsável por a menor pressão ser encontrada através do método convencional, mas

também, as diferenças não foram significativas, atingindo, no máximo, 4,26%, como pode ser visto na Figura 12.

Figura 12: Diferença percentual entre as pressões nos nós da Rede C dimensionada pelo método proposto e pelo método convencional

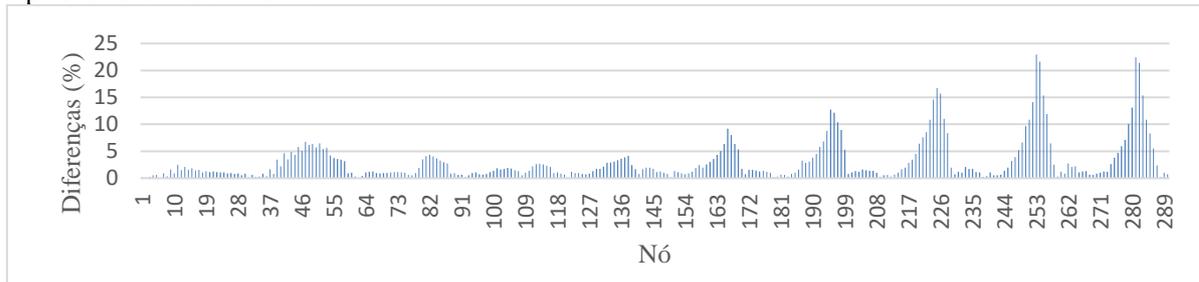


Fonte: Autores

Quanto à distribuição de diâmetros, percebe-se que estes foram dispostos, em cada metodologia de dimensionamento, de acordo com o uso dos reservatórios como fonte hídrica. No método proposto tem-se maiores diâmetros próximos aos dois reservatórios, o que mostra o uso de ambos adequadamente como fonte hídrica, apresentando menores diâmetros em trechos mais distantes dos dois reservatórios. Já com o método convencional, tem-se maiores diâmetros próximos a apenas um dos reservatórios, fazendo uso ineficiente de um deles.

Por fim, no caso da Rede D, a maior e menor pressão com o método proposto foram 51,83m e 5,95m. Já com o método convencional foram 51,75m e 5,50m. Apesar de garantir atendimento à máxima perda de carga unitária, devido a topografia desta rede, não foi possível garantir a pressão mínima em todos os nós, no entanto, com uso da metodologia proposta, 11,4% dos nós apresentaram pressões menores que 10m. Já com uso da metodologia convencional, 12,8% dos nós têm pressão abaixo de 10m. Por ser uma rede de maior porte, a diferença percentual entre as duas metodologias variou até 22,92%, no entanto, as maiores variações se deram nas menores pressões, mostrando que o método proposto não apresenta pressões tão baixas quanto o método convencional. A diferença percentual entre os dois métodos na Rede D apresentou, dos 290 nós da rede, 20 com diferenças maiores que 10%, em que somente 4 tem diferenças maiores que 20%, podendo ser vista na Figura 13.

Figura 13: Diferença percentual entre as pressões nos nós da Rede D dimensionada pelo método proposto e pelo método convencional



Fonte: Autores

Quanto a distribuição de diâmetros, no método proposto percebe-se maiores diâmetros próximos ao reservatório e a diminuição destes a medida em que o trecho se distancia dele. Já com o dimensionamento através do método convencional, percebe-se grandes diâmetros distantes do reservatório, o que pode gerar erros de execução e maior dificuldade num futuro processo de ampliação.

3.2 ANÁLISE ECONÔMICA

Nas Tabelas 3, 4, 5 e 6 são mostradas as comparações dos custos, total e por diâmetro, entre os dois métodos nas Redes A, B, C e D, respectivamente:

Tabela 3: Comparação econômica entre o método proposto e o convencional na Rede A

Diâmetro (mm)	Método Proposto		Método Convencional	
	Comprimento (m)	Custo (R\$)	Comprimento (m)	Custo (R\$)
50	211,40	7.428,60	277,90	9.765,41
60	205,20	8.718,95	102,00	4.333,98
75	341,20	17.039,53	135,00	6.741,90
100	73,50	4.965,66	226,30	15.288,83
150	93,00	11.478,06	183,10	22.598,20
TOTAL:		R\$49.630,80	TOTAL:	R\$58.728,32

Fonte: Autores

Tabela 4: Comparação econômica entre o método proposto e o convencional na Rede B

Diâmetro (mm)	Método Proposto		Método Convencional	
	Comprimento (m)	Custo (R\$)	Comprimento (m)	Custo (R\$)
50	1.188,90	41.777,95	1.719,48	60.422,39
60	817,75	34.746,28	324,28	13.778,49
75	282,70	14.118,04	86,50	4.319,81
100	115,80	7.823,45	150,10	10.140,76
150	25,99	3.207,69	124,80	15.402,82
200	27,91	5.442,73	53,90	10.511,04
TOTAL:		R\$107.116,13	TOTAL:	R\$114.575,29

Fonte: Autores

Tabela 5: Comparação econômica entre o método proposto e o convencional na Rede C

Diâmetro (mm)	Método Proposto		Método Convencional	
	Comprimento (m)	Custo (R\$)	Comprimento (m)	Custo (R\$)
50	1.092,60	38.393,96	1.095,00	38.478,30
60	156,90	6.666,68	76,10	3.233,49
75	297,70	14.867,14	239,55	11.963,13
100	181,40	12.255,38	111,80	7.553,21
150	102,75	12.681,40	171,40	21.154,19
200	0,00	0,00	137,50	26.813,88
	TOTAL:	R\$84.864,57	TOTAL:	R\$109.196,19

Fonte: Autores

Tabela 6: Comparação econômica entre o método proposto e o convencional na Rede D

Diâmetro (mm)	Método Proposto		Método Convencional	
	Comprimento (m)	Custo (R\$)	Comprimento (m)	Custo (R\$)
50	18060,00	634628,40	18000,00	632520,00
60	1770,00	75207,30	2310,00	98151,90
75	4005,00	200009,70	3360,00	167798,40
100	3630,00	245242,80	3000,00	202680,00
150	975,00	120334,50	795,00	98118,90
200	105,00	20476,05	960,00	187209,60
250	36,90	10457,06	120,00	34010,40
300	0,00	0,00	36,90	14430,03
	TOTAL:	R\$1.306.355,81	TOTAL:	R\$1.434.919,23

Fonte: Autores

Ao analisar os custos das quatro redes dimensionadas, é possível notar que, em todos os casos, através do método proposto, tem-se maior economia. Percebe-se também que, essa economia ocorre, com o uso deste método, devido ao fato de que o uso de maiores diâmetros é reduzido. No entanto, isso não significa que o uso do diâmetro mínimo (50mm) tenha sido maior, mas, nestes casos, o que ocorreu foi que o uso de diâmetros intermediários foi mais significativo com dimensionamentos através do método proposto do que com o realizado com o método convencional. De forma geral, o uso do método proposto gerou uma economia de aproximadamente 15,5% na Rede A; 6,5% na Rede B; 22,3% na Rede C e 8,9% na Rede D.

4 CONCLUSÕES

O método proposto, através da junção de gradientes hidráulicos e Teoria dos Grafos, para dimensionamento de redes de abastecimento de água, apresentou melhor distribuição dos diâmetros ao longo das redes de distribuição, quando comparado ao método convencional utilizado, usou melhor as fontes hídricas disponíveis, além de que encontrou pressões similares ao longo da rede e, quando não foi possível atender aos

quesitos de pressão mínima, em nenhum dos métodos, o método proposto garantiu maiores pressões ao longo da rede de distribuição, fornecendo maior eficiência ao sistema, o que gera menos problemas aos consumidores.

Quanto à economia, com este método se encontrou menores custos em todos os casos dimensionados, gerando uma economia de R\$ 128.563,41 na rede de maior porte analisada.

Por fim, o dimensionamento realizado através do método proposto reduziu bastante o uso de maiores diâmetros, mais caros, além de apresentar menor extensão de diâmetros mínimos, mais propensos à ruptura e necessidade de manutenção, assim, por apresentar vantagens técnicas e econômicas, recomenda-se a utilização deste método no dimensionamento de redes de distribuição.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FAPEPI (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ALENCAR-NETO, M.F.; CASTRO, M.A.H. **Projeto de redes de distribuição de água por algoritmo genético**. In: IV Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa, Brasil, 2004. Disponível em < http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/4serea/artigos/projeto_de_redes_co.pdf >. Acessado em 02 de outubro de 2020.

ARAÚJO, R. S. A.; BEZERRA, A. A.; MOURA, B. D.; SOUSA, M. C. B. **Comparação para o fator de atrito no dimensionamento de redes de distribuição utilizando equações explícitas**. Brazilian Journal of Development, v. 7, p. 24689-24704, 2021. Disponível em < <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/26140/20735> >. Acessado em 11 de maio de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimentos públicos - Procedimento**. Rio de Janeiro, p. 13 e 14. 2017.

BARAGLIA, R.; HIDALGO, J. I.; PEREGO, R. **A Hybrid Heuristic for the Traveling Salesman Problem**. IEEE Transactions on evolutionary computation, vol. 5, Nº. 6, p. 613-622, 2001. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/974843> >. Acessado em 01 de outubro de 2020.

BARROS E. A. R.; PAMBOUKIAN S. V. D.; ZAMBONI L. C.; **Algoritmo de Dijkstra: Apoio didático e multidisciplinar na implementação, simulação e utilização computacional**. In: International Conference on Engineering and Computer Education – ICECE, São Paulo – SP, 2007. Disponível em: < http://meusite.mackenzie.br/edsonbarros/publicacoes/ICECE2007_212.pdf >. Acessado em 17 de maio de 2020.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Sistema Nacional de Pesquisa de Custo da Construção Civil – SINAPI. **Catálogo de Insumos**. Brasília-DF, 16 de setembro de 2020. Disponível em < https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_644 >. Acessado em 02 de outubro de 2020.

COSTA, Polyanna Possani da. **Teoria dos grafos e suas aplicações**. 2011. 77 p. Dissertação - (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2011. Disponível em: < <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/94358> >. Acessado em 01 de outubro de 2020.

GOMES, H. P.; SALVINO, M. M. **Epanet 2.0 Brasil: Manual do usuário**. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento. Universidade Federal da Paraíba - UFPB. João Pessoa - PB, 2007.

GOMES, H. P. **Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórios**. 2ª Edição revisada e ampliada. Editora Universitária da UFPB. João Pessoa-PB, 2004.

JUGEND D.; BARBALHO M. C. S.; SILVA S. L. **Gestão de Projetos Teoria, prática e tendências**. 1ª ed. Rio de Janeiro – RJ. Elsevier, 2014.

PINNTO, M. R.; CASTRO, M. A. H.; BARBOSA, J. M. C.; JÚNIOR J.V.F.M. **Dimensionamento econômico otimizado de redes de distribuição de água considerando custos de manutenção.** Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 145-153, 2017. Disponível em < <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016140349> >. Acessado em 2 de outubro de 2020.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica.** 4ª ed. São Carlos: EESC/USP, 2006.

PRICE, E.; OSTFELD, A. **Graph Theory modelling approach for optimal operation of water distribution systems.** Journal of hydraulic engineering, Vol 142, Issue 3, 2016. Disponível em < [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001099](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001099) >. Acessado em 2 de outubro de 2020.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2: User's Manual.** National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development of U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, OH, 2000.

TORRUBIA S. G.; TERRANZAS L. M. V. **Algoritmo de Dijkstra - Un Tutorial Interactivo.** In: VII Jornadas de Enseñanza Universitaria de la Informática – JENUI. Palma de Mallorca, Espanha, 2001. Disponível em < <http://bioinfo.uib.es/~joemiro/aenui/procJenui/ProcWeb/actas2001/saalg223.pdf> >. Acessado em 15 de maio 2020.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água.** 3ª ed., São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

YANG, X.; ZHANG, C.; ZHUANG, B. **Evaluation model for the urban public transit network connectivity based on Graph Theory.** In: Seventh International Conference of Chinese Transportation Professionals Congress – ICCTP. Xangai, China, 2008. Disponível em < <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40952%28317%2935> >. Acessado em 03 de outubro de 2020.