

DISSERTAÇÃO

14 de novembro de 2024

Avaliação de Redes de Distribuição de Água por meio de simulação e modelagem de rugosidade

Nariely de Jesus Santos

Alagoinhas/BA

narielly_26@outlook.com

orientado por:

Dr. Alexandre do Nascimento Silva

Universidade Estadual de Santa Cruz



Universidade do Estado da Bahia

Departamento de Ciências Exatas e da Terra II

Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biosistemas

Nariely de Jesus Santos

Avaliação de Redes de Distribuição de Água por meio de simulação e modelagem de rugosidade

Dissertação de Mestrado submetida a Universidade do Estado da Bahia, no Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biosistemas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem e Simulação de Biosistemas.

Área de conhecimento: Interdisciplinar

Área de Concentração: Modelagem Aplicada a Biosistemas

Linha de Pesquisa: Modelagem e Otimização de Biosistemas

Orientador: Dr. Alexandre do Nascimento Silva

coorientador:

URL do documento original: www.ppgmsb.uneb.br/dissertacao/cod

Alagoinhas/BA

25 out. 2024

Sistema de Bibliotecas da UNEB
Biblioteca Carlos Drummond de Andrade – *Campus II*
Manoela Ribeiro Vieira
Bibliotecária - CRB 5/1768

S237a Santos, Nariely de Jesus
Avaliação de redes de distribuição de água por meio de simulação e modelagem de rugosidade / Nariely de Jesus Santos – Alagoinhas, 2024.
81f.: il

Orientador: Prof. Dr. Alexandre do Nascimento Silva

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado da Bahia, Departamento de Ciências Exatas e da Terra DCET II. Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biosistemas. Mestrado em Modelagem e Simulação de Biosistemas – Alagoinhas, 2024.

1. Água – Sistema de abastecimento 2. Modelagem 3. Distribuição I. Silva, Alexandre do Nascimento. II. Universidade do Estado da Bahia – Departamento de Ciências Exatas e da Terra – Campus II. III. TÍTULO

CDD – 628.1

Universidade do Estado da Bahia

Departamento de Ciências Exatas e da Terra II

Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biosistemas

Nariely de Jesus Santos

Avaliação de Redes de Distribuição de Água por meio de simulação e modelagem de rugosidade

Dissertação de Mestrado submetida a Universidade do Estado da Bahia, no Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biosistemas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem e Simulação de Biosistemas.

Alagoinhas/BA- 25 out. 2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE DO NASCIMENTO SILVA**
Data: 27/10/2024 19:09:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Alexandre do Nascimento Silva
Universidade Estadual de Santa Cruz
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **THAIS DE SOUZA NERI**
Data: 27/10/2024 19:29:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Thays de Souza Néri
Professora da Universidade do Estado da Bahia
Avaliadora Interna

Documento assinado digitalmente
 **PRISCILA PEREIRA SUZART DE CARVALHO**
Data: 28/10/2024 12:09:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Priscila Pereira Suzart de Carvalho
Professora da Universidade Estadual de Santa Cruz
Avaliadora Externa

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, construtor da minha história.

À meus pais que me apoiaram em todos os momentos da minha vida.

A família, namorado e amigos pelo carinho, compreensão e suporte dados nessa jornada.

Ao meu orientador, Dr. Alexandre do Nascimento Silva, por toda ajuda e colaboração.

A toda equipe de professores e demais colaboradores do PPGMSB, por seu empenho e esforço.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro concedido.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a conquista dessa vitória, principalmente Nálisson e Carmen por seu apoio e incentivo, por não me deixarem desistir.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, como um testemunho de sua crença em mim e dos incontáveis sacrifícios que fizeram para que eu chegasse até aqui.

Resumo

O consumo de água reflete diretamente sobre aspectos sociais, econômicos e sanitários quando ofertada em qualidade e quantidade adequadas. Tornou-se extremamente importante projetar Redes de Distribuição de água *Redes de Distribuição de Água (RDA)* que atendam às necessidades das populações na mesma proporção em que mantêm a estrutura com bom funcionamento hidráulico por meio do atendimento de tópicos como disponibilidade de vazão e qualidade da água. Para tanto, têm-se utilizado modelagem hidráulica para conciliar expansão populacional e manutenção dos parâmetros hidráulicos. O objetivo deste trabalho é propor um modelo para avaliar os parâmetro hidráulicos pressão e perda de carga em uma RDA ao longo de 20 anos de por meio de modelagem e simulação. Inicialmente utilizou-se o software EPANET 2.0 para simulação de uma RDA empírica e em seguida realizou-se uma interação entre os softwares EPANET 2.0 e R para avaliar a RDA em seus 20 anos posteriores de funcionamento. Os resultados demonstraram que a perda de carga foi levemente afetada, enquanto as pressões foram elevadas no decorrer dos anos e por isso as tubulações devem ser alteradas para diâmetros comerciais ligeiramente superiores para os anos de 2034 e 2044.

Palavras-chave: Sistema de Abastecimento de Água, simulação, modelagem, Redes de Distribuição de Água, rugosidade.

ABSTRACT

Water consumption directly reflects on social, economic and sanitary aspects when offered in adequate quality and quantity. It has become extremely important to design water distribution networks (WDN) that meet the needs of populations in the same proportion as they maintain the structure with good hydraulic functioning through the attendance of topics such as flow availability and water quality. For this, hydraulic modeling has been used to reconcile population expansion and maintenance of the hydraulic parameters. The objective of this work is to propose a model to evaluate the hydraulic parameters pressure and load loss in an RDA over 20 years of through modeling and simulation. Initially, the EPANET 2.0 software was used to simulate an empirical WDN and then an interaction between the EPANET 2.0 and R software was performed to evaluate WDN in its 20 years of operation. The results suffered that the pressure loss was slightly affected, while the pressures were elevated over the years and therefore the pipes must be changed to superior commercial ceramics for the years 2034 and 2044.

Keywords: Water Supply System, simulation, modeling, Water Distribution Networks, roughness.

Lista de Símbolos

π A razão entre a circunferência de um círculo e seu diâmetro

mca metros de coluna d'água

mm milímetros

m/km metro por quilômetro

mg/L miligrama por litro

m/s metros por segundo

L/hab.dia litros por habitante ao dia

h_f perda de carga

l/s litros por segundo

Lista de Abreviações

CRAN Comprehensive R Archive Network

ETA Estações de Tratamento de Água

LEHNS Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica

OMS Organização Mundial da Saúde

PPGMSB Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biosistemas

PVC Policloreto de Vinila

QGIS Quantum Geographic Information System

RDA Redes de Distribuição de Água

RNF Reservatório de Nível Fixo

RNV Reservatório de Nível Variado

SAA Sistema de Abastecimento de Água

SNIS Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

UFPB Universidade Federal da Paraíba

VRP Válvula Redutora de Pressão

Lista de Ilustrações

Fig. 2.1	Estrutura geral de um Sistema de Abastecimento de Água.	10
Fig. 2.2	Posicionamento das captações em cursos d'água superficiais.	11
Fig. 2.3	Adutoras por gravidade em conduto livre e conduto forçado.	12
Fig. 2.4	Adutoras mista e adutora por recalque.	12
Fig. 2.5	Fases do tratamento de água.	13
Fig. 2.6	Reservatórios de montante e de jusante.	14
Fig. 2.7	Tipos de reservatórios de água.	15
Fig. 2.8	Rede ramificada em espinha de peixe (a) e em grelha (b).	16
Fig. 2.9	Rede malhada em anéis.	16
Fig. 2.10	Rede malhada em blocos.	17
Fig. 2.11	Consumo médio <i>per capita</i> nas regiões geográficas do Brasil.	20
Fig. 2.12	Tipos de vazamento.	21
Fig. 2.13	Diagrama de Moody.	26
Fig. 2.14	Rugosidade dos tubos.	29
Fig. 2.15	Metodologia de projeto e análise de RDA por meio de cálculos.	30
Fig. 2.16	Metodologia de projeto e análise de RDA por meio de simulação e modelagem.	31
Fig. 2.17	Interface do EPANET 2.0.	34
Fig. 2.18	Interface do WaterCAD.	39
Fig. 3.1	Classificação da pesquisa.	47
Fig. 4.1	Fluxograma do modelo para avaliação de pressão e perda de carga em uma RDA ao longo do tempo.	49
Fig. 5.1	Gráfico dos valores de perda de carga em cada trecho com Dn 50 mm.	50
Fig. 5.2	Gráfico de pressão em isolinhas.	51
Fig. 5.3	Gráfico dos valores de pressão em cada nó.	51
Fig. 5.4	Alteração de diâmetro da tubulação principal.	53
Fig. 5.5	Gráfico dos valores de perdas em cada trecho.	54
Fig. 5.6	Gráfico dos valores de pressão em cada nó.	54

Fig. 5.7 Gráfico dos valores de pressão em cada nó.	55
Fig. 5.8 Gráfico dos valores de perda de carga em cada trecho no cenário 2.	55
Fig. 5.9 Gráfico dos valores de pressão em cada nó no cenário 2.	56
Fig. 5.10 Gráfico dos valores de perda de carga em cada trecho no cenário 3.	57
Fig. 5.11 Gráfico dos valores de pressão em cada nó no cenário 3.	57

Lista de Tabelas

Tbl. 2.1 Consumo médio <i>per capita</i> domiciliar.	21
Tbl. 2.2 Rugosidade dos tubos.	24
Tbl. 2.3 Valores do coeficiente de rugosidade para fórmula de Hazen-Williams.	27
Tbl. 2.4 Valores do coeficiente K para perda localizada.	28
Tbl. 2.5 Funções para o ambiente R fornecidas pelo <i>epanet2toolkit</i>	37
Tbl. 3.1 Informações sobre nós e trechos da RDA empírica.	43

Lista de Algoritmos

1

Código para interação entre R e EPANET66

Sumário

1	Introdução	1
1.1	O Problema	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Motivação	3
1.4	Objetivos	3
1.5	Hipóteses	3
1.6	Limites e limitações	4
1.7	Relevância do estudo	4
1.8	Contribuições	4
1.9	Aderência	5
1.10	Organização do documento de Defesa de mestrado	5
2	Estado da Arte	7
2.1	Hidráulica e dinâmica de fluidos	7
2.2	Sistema de Abastecimento de Água	9
2.3	Rede de Distribuição de Água	15
2.4	Simulação e modelagem	29
3	Materiais e métodos	41
3.1	Cenários avaliados	41
3.2	Simulação no software R	44
3.3	Parâmetros de avaliação	45
3.4	Tipo de Pesquisa	46
4	Modelo proposto	48
5	Resultados	50
5.1	Cenário 1: simulação da RDA e correção dos parâmetros hidráulicos pressão e perda de carga.	50
5.2	Cenário 2	55

5.3 Cenário 3	56
6 Conclusão	58
Referências Bibliográficas	59
7 Apêndice A	66

Introdução

A água compõe 70% ou mais da massa da maioria dos organismos. O seu consumo reflete diretamente sobre aspectos sociais, econômicos e sanitários, pois, quando ofertada em qualidade e quantidade adequadas reduz os níveis de doenças infecciosas como giardíase, amebíase e diarreia, quando ofertada em qualidade e quantidade adequadas, conforme necessário (Heller & de Pádua, 2010). Seus usos incluem preparação de alimentos, higiene pessoal, hidratação e limpeza (Tsutiya, 2006).

Dada sua importância, o abastecimento de água potável é prioritário entre os serviços de saneamento a serem prestados à população. O fornecimento coletivo de água à população é realizado por meio de estruturas conhecidas como Redes de Distribuição de Água RDA (Brasil, 2020). Nos Sistema de Abastecimento de Água (SAA), as RDA são as últimas a serem construídas, demandam a maior parcela do investimento e são também as mais próximas dos clientes. Devido ao alto investimento associado em sua implantação e manutenção ao longo do tempo e ao elevado índice de perdas por vazamentos que ocorrem nas tubulações, as RDA são alvo de preocupações quanto a seu dimensionamento e posterior operação (Pinnto, Castro, Barbosa, & Maia, 2016).

1.1 O Problema

Realizar um abastecimento de água em quantidade e qualidade adequados não é um serviço trivial, principalmente quando pretende-se unir a universalização desse serviço à uma gestão sustentável com ações planejadas para conservação e uso racional da água (Filho, 2016).

Questão: Como avaliar as RDA de acordo com parâmetros adequados de funcionamento?

1.2 Justificativa

O crescimento populacional aumenta o consumo de água e por consequência, as RDA têm seus parâmetros hidráulicos alterados. Isso pode ser observado por meio da redução ou elevação da pressão em certos pontos da tubulação, aumento da perda de carga na rede ou até mesmo falta de água (Salomão, da Silva, da Silva, & Zadorosny, 2023). Essas alterações podem provocar um dos mais preocupantes impactos ambientais gerados nas RDA: as perdas de água (Ávila, Sánchez-Romero, López-Jiménez, & Pérez-Sánchez, 2021).

As perdas são o déficit entre a quantidade de água produzida (água retirada do corpo hídrico e tratada para então ser distribuída) e a quantidade de água que é entregue aos consumidores (Heller & de Pádua, 2010). No ano de 2019, o Brasil teve 37,8% de perdas na distribuição de água, o que corresponde a aproximadamente 8 mil piscinas olímpicas de água tratada são desperdiçadas diariamente (Brasil, 2023). O principal tipo de perda que costuma ocorrer são as perdas reais causadas por vazamentos nas tubulações, cuja origem é a ocorrência de altas pressões na RDA (Huang et al., 2020).

Como resultado tem-se a sobrecarga de recursos hídricos, visto que maiores volumes de água serão requisitados para compensar o que foi perdido e de fato atender ao consumo populacional, bem como a possível ocorrência de danos à saúde devido a entrada de agentes patogênicos em rupturas de tubulações e à criação de ambientes com água parada propícios a proliferação de agentes transmissores de doenças (Al Qahtani, Yaakob, Yidris, Sulaiman, & Ahmad, 2020). Além disso, As estruturas dos SAA em sua maioria estão enterradas e em muitos casos, em vias de tráfego intenso de veículos, o que dificulta sua inspeção e manutenção (de Araujo et al., 2020).

Por isso, as entidades gestoras têm se preocupado em tratar problemas como: envelhecimento das tubulações, sobrecarga da estrutura, operação de RDA além da sua vida útil e negligências na manutenção (Ramos et al., 2023). Tornou-se extremamente importante projetar RDA que atenda as necessidades de consumo das populações ao longo do tempo na mesma proporção em que mantém a qualidade da água e um bom funcionamento hidráulico das estruturas (Ajaz & Ahmad, 2023).

Para tanto, conceitos de tecnologia tem sido utilizados juntamente com as teorias já conceituadas da hidráulica (Ociepa, Mrowiec, & Deska, 2019). Modelos analíticos aplicados a área de hidráulica no dimensionamento de RDA tem sido utilizados para modelagem e simulação de parâmetros. Dessa forma é possível observar variações no comportamento das RDA diante de mudanças, como o aumento populacional (M. Marques, da Silva Junior, Marisa, Corrêa, & Zanette, 2020). Por meio do uso de softwares e modelos para modelagem é possível identificar problemas e reduzir o tempo para elaboração de projetos (Muller, Gericke, & Pietersen,

2020).

1.3 Motivação

A motivação que conduziu ao desenvolvimento deste trabalho está na busca por maior sustentabilidade e concisão no gerenciamento de RDA. Os resultados esperados possuem características que contribuem positivamente nas questões sociais, econômicas e ambientais, a saber: otimização e expansão RDA e manutenção dos recursos hídricos.

1.4 Objetivos

Geral

O objetivo deste trabalho é propor um modelo para avaliar os parâmetros hidráulicos pressão e perda de carga em uma RDA ao longo de 20 anos de por meio de modelagem e simulação.

Específicos

- Analisar os parâmetros hidráulicos de uma RDA empírica;
- Realizar uma simulação no R com alteração na população e na rugosidade da tubulação adotada, para 10 e 20 anos posteriores;
- Apresentar alternativas para solucionar valores fora dos limites estabelecidos em legislação;

1.5 Hipóteses

Com base no modelo, pode-se levantar as seguintes questões:

- De que forma a modelagem e simulação podem funcionar como ferramentas para a manutenção de parâmetros adequados de funcionamento em RDA?
- Um modelo criado para avaliar a RDA ao longo do tempo, por meio da alteração da rugosidade dos tubos e aumento no consumo, pode colaborar com a eficiência no gerenciamento de RDA?

A partir desses questionamentos surgem as seguintes hipóteses:



- Otimizar uma RDA por meio de um modelo promove benefícios tais como: agilidade, observação de cenários variados e adequação de parâmetros hidráulicos.
- Através de um modelo é possível obter maior sustentabilidade no gerenciamento das RDA, visto que permitirá manter os parâmetros hidráulicos em funcionamento adequado para reduzir perdas reais e dessa forma contribuir com a conservação de recursos hídricos.

1.6 Limites e limitações

O limite dessa pesquisa está em compor resultados para parâmetros hidráulicos sem conexão com o aspecto econômico intrínseco às estruturas para dimensionamento de RDA por meio de planilhas orçamentárias comumente usadas.

Por se tratar de um estudo em uma RDA, deduz-se que na execução de projetos reais é necessário adotar serviços específicos para a localidade, como estudo topográfico e observação da variação de consumo de água ao longo do dia.

1.7 Relevância do estudo

Um modelo, tal como aplicado nesta pesquisa, possibilita um dimensionamento mais preciso de RDA, bem como a reabilitação daquelas que já estão implantadas. Portanto, como pontos de relevância desse estudo, tem-se:

1. Redução de impactos ambientais, como perdas reais;
2. Contribuição de avanços da tecnologia na área de abastecimento de água;
3. Compatibilização entre conservação de recursos hídricos e gerenciamento das RDA;
4. Redução no tempo de elaboração de projetos de RDA;
5. Avaliar as potencialidades do uso dos softwares R e Epanet 2.0 para a avaliação de RDA.

1.8 Contribuições

Modelagem e simulação compreendem a construção de sistemas reais na configuração de um modelo para possibilitar análises comportamentais baseadas na variação de parâmetros determinados. Esta seção destaca as principais contribuições do trabalho, que não apenas

avancam o conhecimento técnico na área de dimensionamento de RDA, como também contribuem para conservação dos recursos hídricos. Entre as contribuições desse trabalho, pode-se citar:

- Expansão de ferramentas de trabalho para projeto e operação de RDA, por meio da interação de um software de simulação hidráulica com um programa estatístico de modelagem;
- Melhoria da capacidade de previsão do comportamento hidráulico de RDA, visto que é possível prever cenários futuros e desenvolver estratégias eficazes para gestão das RDA;
- Geração de dados de simulação e análise de comportamento da RDA com a mudança no valor de rugosidade, natural ao decorrer de uso da tubulação de Policloreto de Vinila (PVC);
- Otimização de estratégias de gestão ambiental, por identificar locais sujeitos à ocorrência de vazamentos.

Essas contribuições representam avanços na gestão de SAA.

1.9 Aderência

Esta dissertação se concentra na avaliação de RDA por meio de modelagem e simulação. Está alinhada à linha de pesquisa Modelagem e Otimização de Biossistemas do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biossistemas (PPGMSB), cujo objetivo principal é o estudo e desenvolvimento de metodologias numéricas e analíticas relacionadas à Modelagem Computacional. O estudo foi realizado no Grupo de Pesquisa MAIA. No histórico do PPGMSB não foram identificadas dissertações relacionadas a este estudo.

1.10 Organização do documento de Defesa de mestrado

Esse trabalho de dissertação apresenta 6 capítulos organizados da seguinte forma:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Apresenta a proposta de pesquisa por meio da contextualização do problema, justificativa, objetivos, hipóteses, limites, limitações e relevância do estudo;
- **Capítulo 2 - Referencial Teórico:** Aborda os conceitos sobre SAA e simulação hidráulica;



- **Capítulo 3 - Materiais e métodos:** Exposição da classificação da pesquisa, define os parâmetros hidráulicos escolhidos, caracteriza a simulação com os softwares EPANET e R;
- **Capítulo 4 - Modelo:** Demonstra a construção do modelo hidráulico e apresenta aspectos da simulação;
- **Capítulo 5 - Resultados:** Apresenta os resultados obtidos pelo modelo hidráulico no R e no EPANET;
- **Capítulo 6 - Conclusões:** Expressa uma argumentação final sobre o trabalho realizado.

Estado da Arte

Neste Capítulo, baseado em pesquisa, por meio de livros e artigos científicos será encontrada uma revisão bibliográfica que tem por objetivo explicar os principais conceitos relativos ao tema abordado, para isso serão apresentados conceitos de hidráulica, dinâmica dos fluidos, SAA, RDA e os parâmetros que exercem influencia sobre RDA, como consumo, pressão, perda de carga e rugosidade. A compreensão desses conceitos é essencial para entender os fundamentos teóricos que sustentam a pesquisa.

Por último, apresenta-se maiores detalhamentos sobre o software EPANET 2.0 e o ambiente de software R, ambos usados para modelagem e simulação de RDA. Serão apresentados artigos recentes que pesquisaram assuntos correlatos e aplicaram soluções semelhantes às propostas neste estudo. Essa análise permitirá compreender como a pesquisa se insere no contexto atual e como as soluções propostas dialogam com as contribuições existentes na literatura.

2.1 Hidráulica e dinâmica de fluidos

A aplicação da hidráulica na engenharia e a construção de SAA, incluem a utilização de tubos e tubulações. Cabe definir a diferença de conceituação entre estes. Tubos são peças individuais, geralmente em formato cilíndrico, com comprimento limitado pelo tamanho de fabricação ou transporte. Podem ser fabricados em ferro fundido, concreto, aço, PVC e polietileno. A tubulação, por sua vez, é constituída de tubos ou possui longa continuidade fabricada no próprio local de instalação, somados com peças acessórias. Dentre seus sinônimos podem ser citados os termos: canalização, encanamento, tubulagem ou tubagem (de Azevedo Netto & Fernández, 2015).

Normalmente, os tubos são estruturas com seção transversal por onde é feito o transporte de fluidos. Quando o fluido em escoamento ocupa toda a seção transversal, a pressão interna

torna-se maior que a de fora (atmosférica). Nesse caso, é classificado como conduto forçado. Nas cidades, as canalizações de distribuição de água devem sempre funcionar como condutos forçados, para tanto, os são fabricados com material resistente à pressão interna resultante (de Azevedo Netto & Fernández, 2015).

O escoamento pode ser definido como permanente quando suas características físicas como velocidade, pressão, temperatura e massa específica, permanecem constantes ao longo do tempo em qualquer ponto da tubulação. Essa definição pode também ser aplicada a casos, nos quais os valores médios dessas características em cada seção do escoamento, tenham sido avaliados e não foram notadas discrepâncias atenuadas. Caso a velocidade ao longo da tubulação permaneça constante ou não, o escoamento permanente pode ser classificado em uniforme ou variado, respectivamente (Gomes, 2019).

Equações fundamentais

O transporte de água em condutos forçados é conduzido por duas equações fundamentais conhecidas como: equação da continuidade e equação de Bernoulli. A equação da continuidade presume que, para um escoamento permanente uma determinada vazão (Equação 2.1), mantém-se constante ao longo do conduto. Portanto, em duas seções distintas da tubulação, pode-se descrever a equação da continuidade como na Equação 2.2 (de Azevedo Netto & Fernández, 2015).

$$Q = A.V \quad (2.1)$$

$$A_1.V_1 = A_2.V_2 \quad (2.2)$$

Em que:

Q é a vazão de água na tubulação;

A é a área da seção transversal da tubulação;

V é a velocidade média de circulação da água.

A equação de Bernoulli (Equação 2.3), por sua vez, também conhecida como equação da energia, deduz que entre duas seções de um conduto, a soma das energias de pressão, potencial e cinética da primeira seção é igual a soma dessas mesmas energias na segunda seção com as perdas de carga ocorridas entre as duas seções.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (2.3)$$

Em que:

p_1 e p_2 são as pressões nas seções;

z são as cotas com relação a um plano horizontal de referência;

V é a velocidade de escoamento da água na tubulação nas duas seções;

γ é o peso específico da água;

g é o valor da aceleração da gravidade.

As energias são descritas na equação acima como: cinética, representada pela componente $V^2/2g$, associada à velocidade do fluido; potencial gravitacional, resultante da posição vertical (altitude) onde encontra-se o fluido, representada por Z e a componente de pressão no ponto analisado, representada por p/γ (Gomes, 2019).

Nas redes de água pressurizadas o termo correspondente a energia cinética $V^2/2g$ é desprezível dentre as cargas ao longo das tubulações, visto que as velocidades médias variam entre 1 e 3 m/s, ou seja, são muito pequenas quando comparadas as outras componentes da equação de Bernoulli. Portanto, a relação entre as cargas ou cotas piezométricas é reduzida (Gomes, 2019):

$$H_1 + z_1 = H_2 + z_2 + h_f \quad (2.4)$$

em que:

H representa a energia de pressão por unidade de peso, expressa em termos de altura de coluna d'água $H = p/\gamma$.

z_1 e z_2 são as cotas com relação a um plano horizontal de referência;

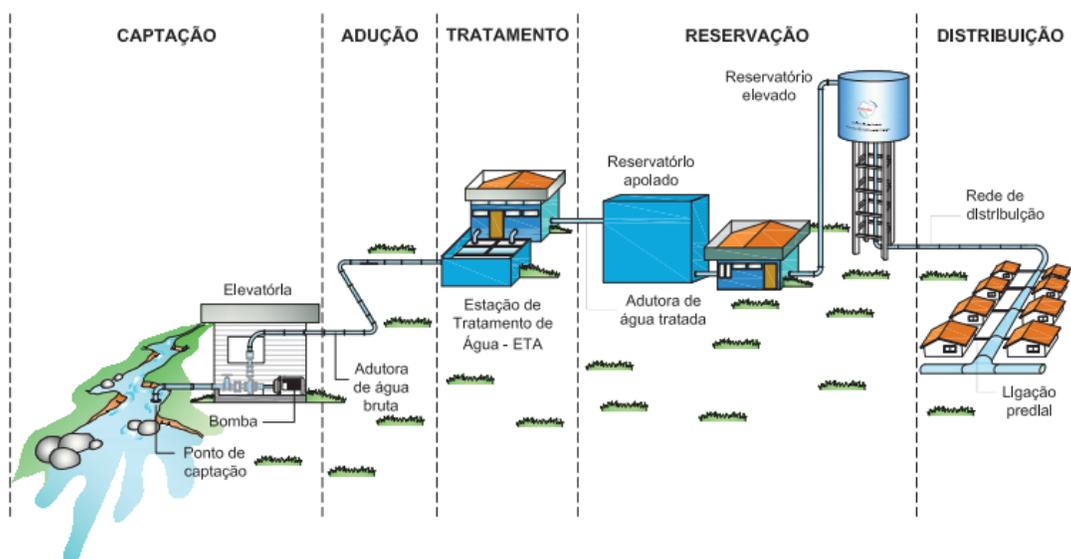
2.2 Sistema de Abastecimento de Água

O abastecimento de água é citado pela Lei n° 11.445/2007 como um dos tópicos de serviço público de saneamento básico que devem ser ofertados a população (Brasil, 2007). A estrutura responsável por retirar a água da natureza, adequar sua qualidade, transportá-la até os aglomerados humanos e fornecê-la à população em quantidade compatível com suas necessidades, é denominado SAA (Brasil, 2004).

A implantação de SAA resulta no aumento de vida da população atendida, reduz os índices de mortalidade, principalmente infantil e contribui para preservação da saúde. Além disso, regiões com cobertura de abastecimento de água possuem maior crescimento industrial, pois a água também é um insumo produtivo de muitas indústrias (Brasil, 2004).

De forma geral, os SAA são compostos pelas seguintes estruturas: manancial ou curso d'água, captação, adução, estações elevatórias, tratamento, reservatórios e rede de distribuição (Gomes, 2019). A Figura 2.1 aborda essas estruturas de forma esquemática.

Figura 2.1: Estrutura geral de um Sistema de Abastecimento de Água.



Fonte: ANUAL (2004)[p. 65]

Manancial

O manancial é a fonte de onde a água será retirada para abastecimento. Pode ser superficial ou subterrâneo, desde que atenda aos critérios de quantidade, qualidade, custos de operação e tratamento (Gomes, 2019). As fontes de água superficiais consistem em afluentes, como rios, lagos e represas, que estão na superfície. Nesse caso, é necessário um processo de tratamento mais robusto. Os mananciais subterrâneos, devido ao confinamento em que estão localizados, necessitam do conjunto motor-bomba para ser extraído e são geralmente de boa qualidade, portanto, seu tratamento é feito em muitos casos com uma simples desinfecção (Tsutiya, 2006).

Captação

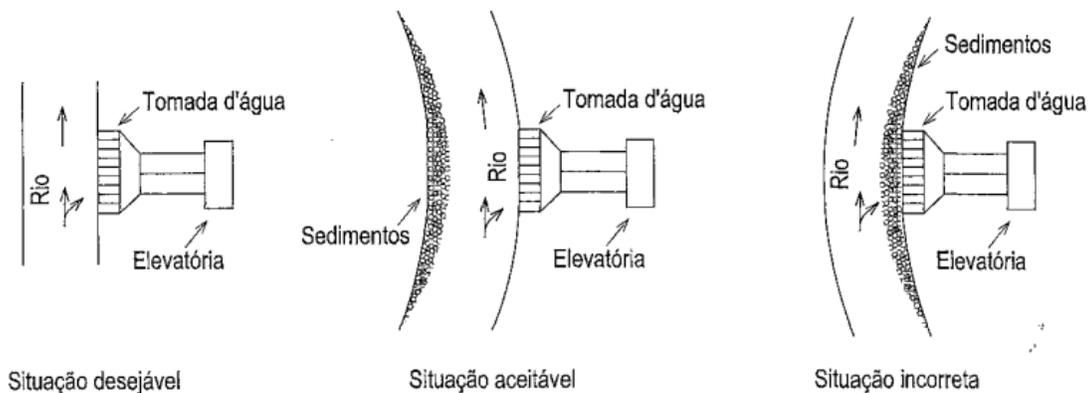
A captação torna possível a extração de água do manancial. Para tanto, é instalada uma estrutura conhecida como de tomada d'água, composta por canais ou tubulações com arquiteturas diferentes para atender a cada necessidade (Gomes, 2019). Em casos de captação superficial, orienta-se que haja cuidado especial com as características físicas, margens do curso d'água, e variações sazonais de vazão, devido a ocorrência de intempéries (Heller & de

Pádua, 2010). A escolha deve ser bem articulada para que em nenhuma época do ano ocorra interrupção do abastecimento e as manutenções sejam possíveis de serem feitas com acesso facilitado (Tsutiya, 2006).

No caso das águas subterrâneas é feita a perfuração de poços artesianos. Em localidades semelhantes a concavidade de uma parábola, voltada para cima, que quando perfuradas apresentam água que jorra, ocorre o chamado artesianismo natural. Nas situações em que a região é plana e a água não apresenta aspecto jorrante, pelo contrário, é necessário um conjunto motor-bomba para realizar a extração, tem-se um caso de artesianismo comum (Brasil, 2006).

Para as captações superficiais, recomenda-se que a captação seja instalada em trechos retilíneos. Quando não foi possível, o local escolhido deve ser na parte côncava do curso d'água para evitar a erosão das margens provocada pela alta velocidade de escoamento da água. Além disso, nos lagos e represas é necessário considerar um trecho com certa profundidade do nível de água a fim de evitar que algas e matéria orgânica em decomposição sejam arrastados para dentro do SAA. Nos casos em que o manancial se encontra em uma cota inferior à da região a ser abastecida, é construída uma estação elevatória (Brasil, 2006). A representação do posicionamento da tomada d'água pode ser visto na Figura 2.2.

Figura 2.2: Posicionamento das captações em cursos d'água superficiais.



Fonte: Tsutiya (2006)

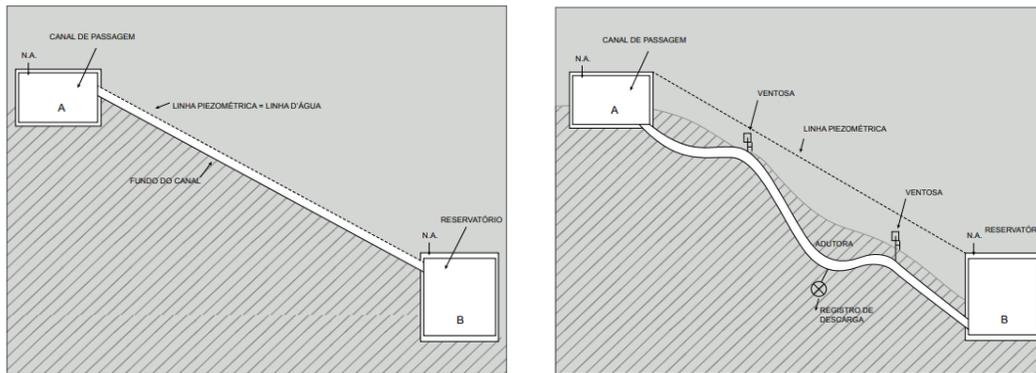
Adução

A adução é realizada por meio de tubulações denominadas de linhas adutoras, responsáveis por conduzir água bruta ou água tratada. Sua função é interligar as unidades de captação, tratamento, estações elevatórias, reservação e rede de distribuição (Heller & de Pádua, 2010).

De acordo com suas características hidráulicas, as adutoras podem ser classificadas como condutos livre, forçados ou mistos. Os condutos livres estão sob efeito da pressão atmosférica

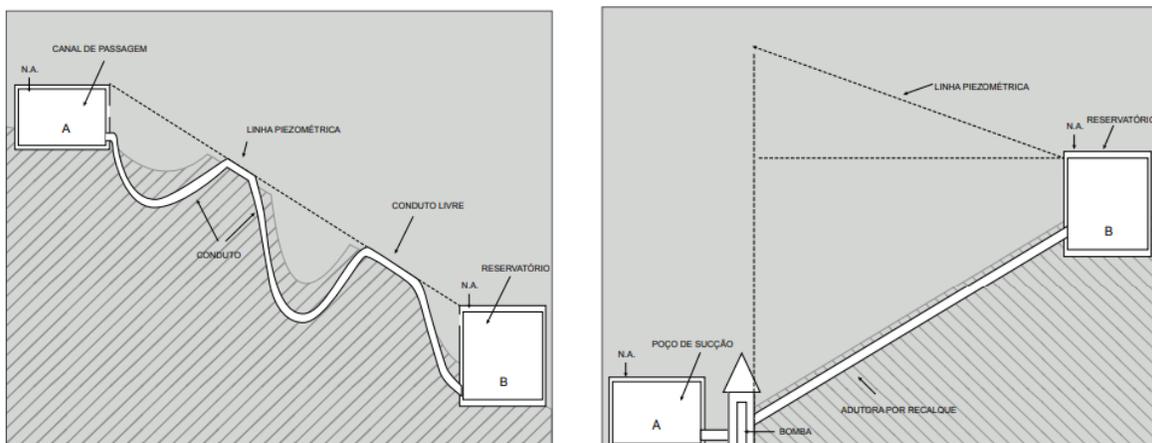
e podem ter ou não contato da água com o exterior. Nos condutos fechados, a água ocupa toda a seção do tubo, por consequência, a pressão interna é superior a pressão atmosférica. Os condutos mistos mesclam trechos com os dois tipos descritos anteriormente (Heller & de Pádua, 2010), conforme demonstrado na Figura 2.3 e Figura 2.4.

Figura 2.3: Adutoras por gravidade em conduto livre e conduto forçado.



Fonte: Tsutiya (2006).

Figura 2.4: Adutoras mista e adutora por recalque.



Fonte: Tsutiya (2006).

Estações Elevatórias

Nem sempre será possível instalar um SAA em perfil topográfico sem variações. Para que a água bruta ou tratada atinja níveis mais elevados são utilizadas estações elevatórias, também conhecidas como recalque ou bombeamento. Podem existir SAA sem nenhuma, ou mesmo com dezenas, centenas delas (Gomes, 2019; Heller & de Pádua, 2010). As elevatórias de SAA quando instaladas entre reservatórios ou em trechos da rede de distribuição são chamadas

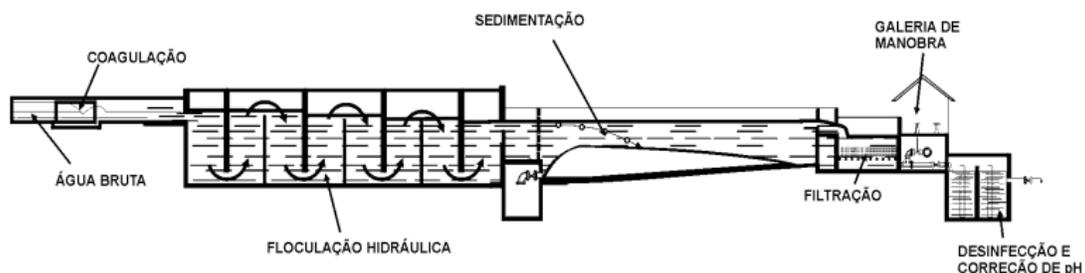
de booster (Heller & de Pádua, 2010).

Tratamento

Após retirar a água da natureza é necessário tornar sua qualidade compatível para consumo humano conforme previsto na Lei nº 888/2021. Com esse intuito são utilizadas as Estações de Tratamento de Água (ETA) (Heller & de Pádua, 2010). A complexidade e o quão oneroso esse procedimento será depende exclusivamente do nível de qualidade da água bruta a ser captada. Ao sair da ETA, a água estará sem ou com reduzido percentual de bactérias patogênicas, turbidez, cor, odor, sabor, dureza, corrosividade, ferro, manganês e sais minerais (Gomes, 2019).

O tratamento da água inicia-se com a retenção de sólidos finos em suspensão por meio de peneiras. Visto que podem ser encontrados na água metais dissolvidos, como ferro e manganês, a próxima etapa é a adição de cloro para oxidação desses metais. Prossegue-se o tratamento com a remoção de impurezas na etapa conhecida como coagulação, na qual ocorre a mistura de sulfato de alumínio à água para que as impurezas sejam unidas e formem flocos gelatinosos. Em outra etapa conhecida como floculação, com objetivo semelhante a anterior é realizada, porém nesta, as impurezas são unidas em flocos ainda maiores e mais pesados por meio de agitação mecânica. Após agitação, a água permanece em repouso na etapa chamada de decantação, para que os flocos formados depositem-se ao fundo do tanque e sejam, por fim, separados da água. Essas impurezas são então removidas por meio da filtração, na qual camadas de carvão ativado retiram o odor e o sabor das substâncias químicas. As últimas duas etapas a serem realizadas são a desinfecção e a fluoretação que consistem em: destruir microrganismos e prevenir cáries (Heller & de Pádua, 2010). As etapas podem ser vistas na Figura 2.5.

Figura 2.5: Fases do tratamento de água.



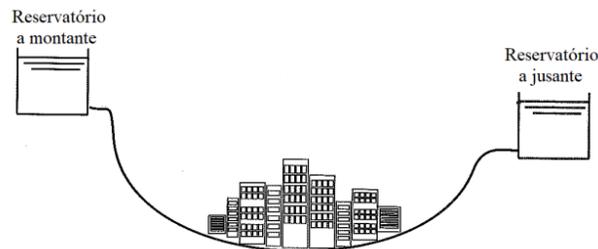
Fonte: Sperling et al. (1995)

Reservatórios

Torna-se necessário nos SAA a implantação de estruturas que equilibrem as vazões de produção e de consumo, visto que a vazão de produção, advinda das etapas de captação, adução e tratamento é pouco variável, enquanto a vazão de consumo, exigida pela população, é variável ao longo das horas do dia e dos dias do ano. Os reservatórios então, assumem essa função (Heller & de Pádua, 2010). Além de também servir como: reserva de emergência diante da necessidade de interromper o abastecimento, armazenamento de água para combater incêndios e condicionar as pressões disponíveis na rede de distribuição (Gomes, 2019).

De acordo com sua localização, podem ser classificados em reservatórios de montante ou jusante. Os reservatórios de montante situam-se antes da rede de distribuição para receber a água e repassar a população. Os reservatórios de jusante são instalados após a rede de distribuição e sua função é acumular água para abastecer os consumidores em momentos de alta demanda (Heller & de Pádua, 2010). Ambos os tipos de reservatório podem ser vistos na Figura 2.6.

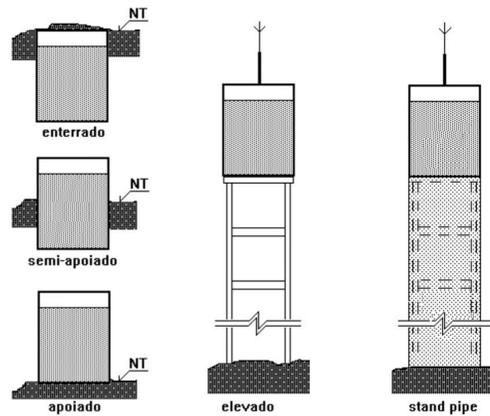
Figura 2.6: Reservatórios de montante e de jusante.



Fonte: Tsutiya (2006)

Conforme sua posição no terreno podem ser classificados em: apoiado (base completamente apoiado na superfície acima do solo), elevado (estruturas são utilizadas para elevar o reservatório), semi-apoiado (parte abaixo e parte acima do solo), enterrado (completamente abaixo do solo) e *stand-pipe* (reservatório com estrutura de elevação embutida de modo a manter contínuo o perímetro da seção transversal da edificação) (Guimarães, Carvalho, & Silva, 2007). A Figura 2.7 demonstra esses tipos de reservatórios.

Figura 2.7: Tipos de reservatórios de água.



Fonte: Tsutiya (2006)

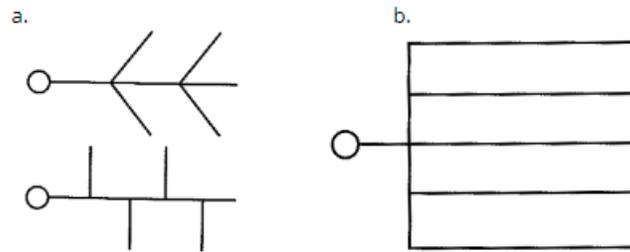
2.3 Rede de Distribuição de Água

A RDA é o objetivo final da organização de todas as partes descritas anteriormente. Nada mais é do que um conjunto de tubulações, conexões e peças especiais, distribuídos nos logradouros públicos para conduzir água até as residências, comércios, indústrias e locais públicos. A complexidade de sua estrutura varia em função do porte da população a ser abastecida, densidade demográfica e topografia da área de abastecimento (Heller & de Pádua, 2010).

As RDA possuem a finalidade de atender, com parâmetros hidráulicos adequados, cada um dos pontos de consumo cogitados. A concepção geométrica da rede de distribuição de água possui variâncias conforme o porte da cidade a ser abastecida e sua topografia. De maneira geral, a tubulação é classificada em: tronco ou principal e secundárias. A tubulação principal possui diâmetro superior as demais e sua função é conduzir água às tubulações secundárias, e estas por sua vez, conduzem água diretamente aos pontos de consumo (Porto, 2006). O fornecimento de água para as tubulações pode ser feito por meio de reservatórios (elevados, apoiados ou semi-enterrados) ou estações elevatórias de bombeamento (Tsutiya, 2006).

A partir da disposição das tubulações principais, secundárias e do escoamento do fluido, as redes de distribuição de água podem ser classificadas como ramificadas ou malhadas. Nas redes ramificadas, conforme observado na Figura 2.8, o abastecimento é realizado a partir de uma tubulação tronco alimentada por um reservatório de montante ou, de outra forma, sob pressão de um bombeamento, e a distribuição da água é feita diretamente para os condutos secundários. Portanto, nesse caso, o sentido de escoamento da água é perfeitamente definido. É possível deduzir que o interrupmento no escoamento da água em algum trecho da RDA por algum motivo, por exemplo, para manutenções, irá paralisar a distribuição de água em todos os trechos posteriores (Porto, 2006).

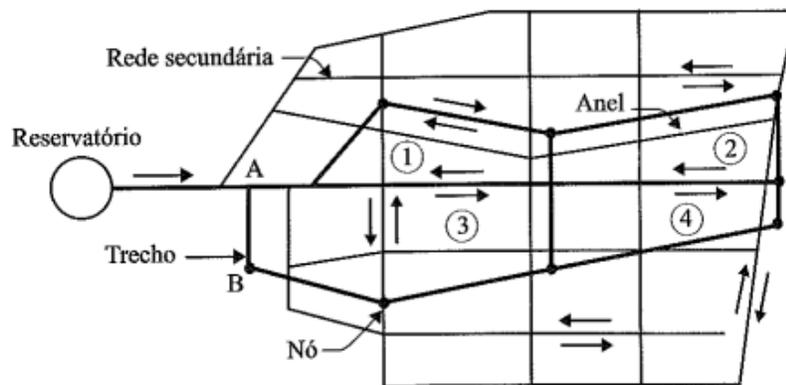
Figura 2.8: Rede ramificada em espinha de peixe (a) e em grelha (b).



Fonte: adaptado de Porto (2006).

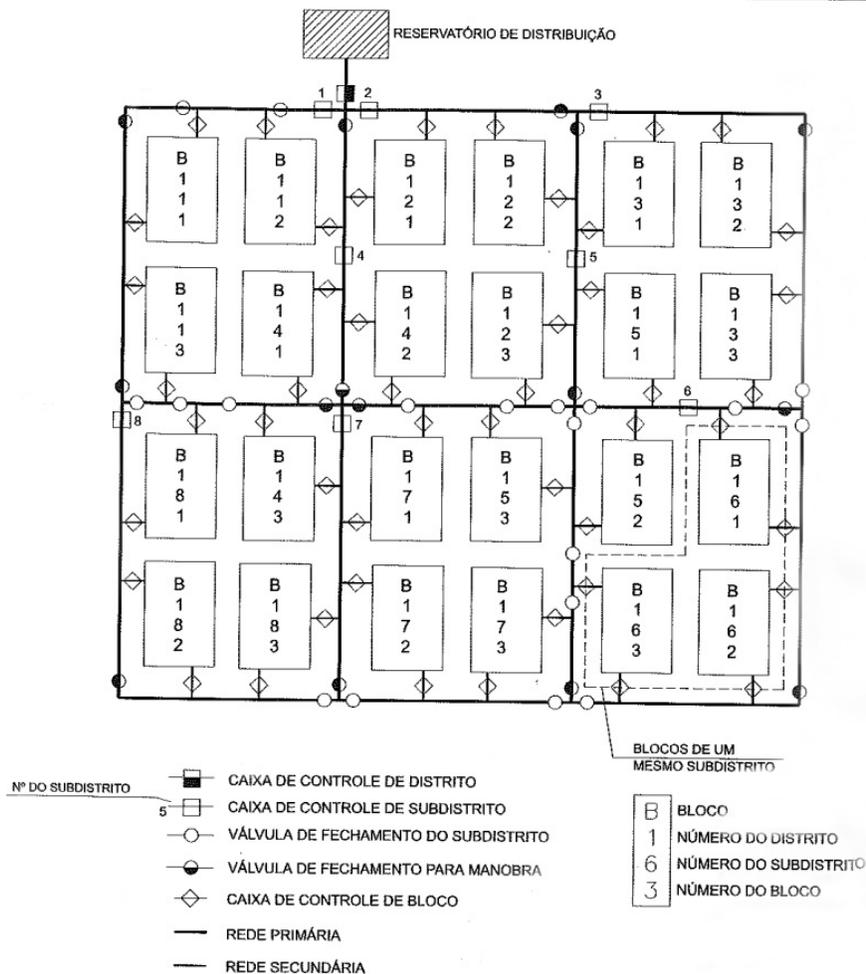
Na rede malhada é possível que o abastecimento seja feito por caminhos diferentes, desta forma, em casos de problemas em um determinado trecho, o abastecimento não é interrompido ou é minimizado. Ela pode ser classificada em dois tipos, rede malhada em anéis e em blocos (Tsutiya, 2006). Na rede malhada em anéis as tubulações são conectadas entre si e na rede malhada em blocos, as redes internas aos blocos possuem apenas dois pontos de alimentação, conforme ilustrado na Figura 2.9 e na Figura 2.10.

Figura 2.9: Rede malhada em anéis.



Fonte: Tsutiya (2006).

Figura 2.10: Rede malhada em blocos.



Fonte: Tsutiya (2006).

O método de cálculo para o dimensionamento de redes ramificadas segue as etapas a seguir:

1. Etapa de pré-processamento, na qual são numerados os trechos de jusante para montante de forma que o mais afastado do reservatório receba o número 1 e são obtidas as extensões dos trechos e as cotas topográficas.
2. Determinar a extensão total da RDA.
3. Cálculo da vazão de distribuição (Equação 2.5).

$$Q_d = \frac{P \cdot q_m \cdot K_1 \cdot K_2}{3.600h} \quad (2.5)$$

em que:

Q_d é a vazão de distribuição;

P é a população a ser abastecida;

q_m é o consumo *per capita*;
 K_1 é o coeficiente do dia de maior consumo;
 K_2 é o coeficiente da maior hora de consumo;
 h é o número de horas de operação do sistema.

4. Cálculo da vazão em marcha total da RDA (Equação 2.6).

$$Q_m = \frac{Q_d}{E_{total}} \quad (2.6)$$

em que:

Q_d é a vazão de distribuição;
 E_{total} é a extensão total.

5. Cálculo da vazão em marcha para cada trecho (Equação 2.7).

$$Q_m = Q_{m_1} \cdot E_{trecho} \quad (2.7)$$

em que:

Q_{m_1} é a vazão de distribuição em cada trecho;
 E_{total} é a extensão total.

6. Determinar os trechos de ponta seca para determinar a vazão de jusante (Q_j). Nas pontas secas, Q_j é igual a 0. Nos demais trechos, Q_j é igual ao somatório das vazões de montante.

7. Calcular a vazão de montante (Equação 2.8).

$$Q_{mont} = Q_{m_1} + Q_j \quad (2.8)$$

em que:

Q_{mont} é a vazão de montante de cada trecho;
 Q_m é a vazão de distribuição em cada trecho;
 Q_j é a vazão de jusante de cada trecho.

8. Calcular da vazão fictícia (Q_f) conforme definição dos trechos de ponta seca. As fórmulas de vazão fictícia para trechos de ponta seca e trechos com abastecimento posterior são encontradas nas Equação 2.9 e Equação 2.10 respectivamente.

$$Q_f = \frac{Q_{mont}}{1,732} \quad (2.9)$$

$$Q_f = \frac{Q_{mont} + Q_j}{2} \quad (2.10)$$

9. Calcular da perda de carga, por meio das fórmulas de Hazen-Williams (Equação 2.18) ou Darcy Weisbach (Equação 2.13).
10. Cálculo cotas piezométricas de jusante.
11. Cálculo cotas piezométricas de montante.

Para o dimensionamento de RDA em softwares busca-se obter a população total conforme Equação 2.11 e o consumo base de cada trecho que será inserido nos nós de acordo com o número de casas a serem abastecidas, conforme demonstrado na Equação 2.12.

$$Pop = n \times T_x \quad (2.11)$$

em que:

Pop é a população atual de projeto;

n é o total de residências;

T_x é a taxa de ocupação nas residências.

$$Q_b = \frac{Q_d}{n} \quad (2.12)$$

em que:

Q_b é o consumo base;

Q_d é a vazão de distribuição;

n é o número de residências do trecho;

Alguns fatores podem afetar o desempenho hidráulico das RDA ao longo do tempo, como: consumo, pressão, perda de carga e rugosidade.

Consumo de água em residências

O abastecimento de água no Brasil, em 2022, atingiu uma população total de 171 milhões (SNIS, 2023). Usualmente, é medido o consumo *per capita* que representa o volume de água médio diário, em litros por habitante ao dia L/hab.dia que uma pessoa utiliza para sua sobrevivência, em usos como: cozinhar alimentos, banhos, usos sanitários, lavagem de roupa, rega de jardins, beber, entre outros (Gomes, 2019).

Nos SAA urbanos, o consumo pode ser classificado de suas formas: consumo *per capita* domiciliar e consumo *per capita* efetivo médio. O primeiro é referente aos usos domésticos da água, portanto, é medido por meio de hidrômetros instalados nas residências. O cálculo para esse consumo é feito por meio da divisão do consumo, obtido com a leitura mensal do hidrômetro, pelo número de habitantes do domicílio (Gomes, 2019). Já o consumo *per capita* efetivo médio é definido pela soma dos consumos: domiciliares, comerciais e industriais, com inclusão das perdas de água que ocorre em todo SAA (Gomes, 2019).

De maneira geral, uma população com padrão de renda mais elevado conseqüentemente consumirá mais água em decorrência da prática de atividades que proporcionem mais conforto e lazer como: uso de máquinas de lavar roupas e louças, piscinas, duchas, jardins e lavagens de veículos. Da mesma maneira, o consumo de água é diretamente proporcional ao aumento de temperatura, portanto regiões quentes e secas terão um consumo de água mais elevado que às regiões temperadas e frias. O grau de desenvolvimento das cidades, refletido em zonas industrializadas também influencia no consumo (Heller & de Pádua, 2010).

O consumo médio de água no Brasil em 2022 foi de 148,2 L/hab.dia. Na figura Figura 2.11 é possível notar o consumo *per capita* nas regiões brasileiras no ano de 2022.

Figura 2.11: Consumo médio *per capita* nas regiões geográficas do Brasil.



Fonte: SNIS (2022)

Na literatura técnica, são apresentados diferentes valores estimados para um número populacional específico, conforme demonstra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Consumo médio *per capita* domiciliar.

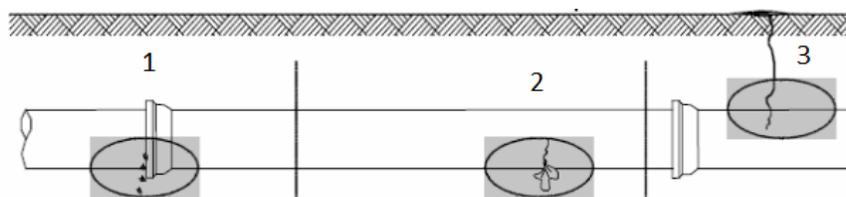
Autor	População	Consumo <i>per capita</i> L/hab.dia
(Heller & de Pádua, 2010)	< 5.000	90 a 140
	5.000 a 10.000	100 a 160
	10.000 a 50.000	110 a 180
	50.000 a 250.000	120 a 220
	> 250.000	150 a 300
Brasil (2004)	6.000	100 a 150
	6.000 a 30.000	150 a 200
	30.000 a 100.000	200 a 250
	> 100.000	250 a 300

No que tange as RDA, o aumento populacional ao longo do tempo consequentemente acarreta o aumento do consumo de água. Por sua vez, o aumento no consumo de água irá refletir-se em alterações nos parâmetros hidráulicos pressão e perda de carga. A medida que o consumo aumenta, as pressões são reduzidas e as perdas de carga aumentadas (Salomão et al., 2023).

Pressão

Controlar a pressão em RDA é um tópico fundamental para reduzir o número de vazamentos e a vazão de água que escapa (Fritz, de Carvalho Gimenes, & de Pina Filho, 2020). A Figura 2.12 demonstra os tipos de vazamentos que podem ocorrer nas RDA.

Figura 2.12: Tipos de vazamento.



Fonte: Fritz et al. (2020), pg 504.

O tipo 1 demonstrado diz respeito aos vazamentos inerentes que não são visíveis e não são detectáveis por meio de instrumentos de acústica. Semelhantemente, o tipo 2, também não é visível, mas pode ser detectado acusticamente. O tipo 3 apresenta-se visivelmente na superfície, esta é inclusive a causa de reclamações por parte da população (Tsutiya, 2006).

Uma das técnicas mais bem conceituadas e utilizadas no gerenciamento de pressões nas RDA para tratar da ocorrência de pressões altas é a setorização. Como o próprio nome sugere, significa dividir a RDA em setores controlados individualmente. Dessa forma espera-se

identificar rapidamente vazamentos, localizar melhor locais para instalação de Válvula Redutora de Pressão (VRP) e proteger o restante da rede de eventos de contaminação acidental ou maliciosa (Khoa Bui, S. Marlim, & Kang, 2020).

A NBR 12.218/2017 estabelece valores de pressão específicos para pressão estática e dinâmica. A pressão estática máxima é definida sob consumo nulo e com o reservatório em nível máximo. Não ultrapassar seu limite significa proteger a integridade dos tubos, conexões e válvulas, além de reduzir as perdas de água (Heller & de Pádua, 2010). Os valores de pressão estática máxima nas tubulações distribuidoras deve ser de 40 mca. Em caso de regiões com topografia acidentada, o valor da pressão estática máxima pode chegar a 50 mca (“NBR12218”, 2017).

A pressão dinâmica mínima é entendida como a pressão referida ao nível do eixo da via pública, em determinado ponto da rede, no dia e hora de maior consumo, e com o nível mínimo de água no reservatório. Sua função é vencer os desníveis topográficos e as perdas de carga nos ramais prediais e nas tubulações dos prédios a serem abastecidos de forma que a água chegue até os reservatórios predial, a partir do qual será distribuída (de Azevedo Netto & Fernández, 2015). No caso da pressão dinâmica mínima, esta, deve ser de no mínimo 10 mca (“NBR12218”, 2017). Vale ressaltar que valores superiores ou inferiores aos recomendados na norma, tanto para pressão estática quanto para pressão dinâmica, serão aceitos, desde que justificados técnica e/ou economicamente.

Gomes (2019) relata motivos para estabelecer limites as pressões máximas das redes:

- Maiores pressões aumentam o custo energético de bombeamento, para que a altura manométrica e impulsão seja alcançada;
- As tubulações serão mais caras, visto que o material precisa suportar os valores de pressão;
- Aumento das possibilidades de rupturas nas tubulações;
- Aumento de perdas reais de água, pois com maiores pressões, as fissuras que ocorrem nos tubos e em junções terão maior vazão.

Perda de carga

Conforme definido por Gomes (2019)[p. 60]:

"Parte da energia que os líquidos dispõem em regime dinâmico se dissipa devido ao efeito de sua viscosidade ou atrito interno, unido ao efeito da turbulência ou dos choques entre as partículas do fluido. Essa parte da energia dissipada, que se

transforma em calor, se denomina perda de carga por atrito, perda de energia por atrito ou perda de carga contínua ao longo do conduto".

O atrito que ocorre entre as partículas de um líquido pode ser interno ou externo. O atrito interno também pode ser chamado de viscosidade e é definido como a resistência de um determinado líquido ao movimento. Quanto maior a viscosidade mais espesso será o líquido e o escoamento mais lento. O atrito externo é correspondente a uma fina camada formada nas superfícies sólidas por onde o líquido escoar, como as paredes de um conduto (White, 2018).

Em termos gerais, quando se trata de escoamento uniforme e permanente em condutos, a perda de carga (h_f), entre duas seções é proporcional a distância entre elas. As características físicas do fluido, como viscosidade e massa específica, e as características geométricas do conduto, a saber: diâmetro interno e rugosidade absoluta das paredes internas do tubo, determinam a perda de carga por atrito (de Azevedo Netto & Fernández, 2015).

A NBR 12.218/2017 estabeleceu que o valor máximo admitido para a perda de carga é de 10 m/km. Empiricamente, por meio de distintas condições experimentais foram elaboradas fórmulas para determinar a perda de carga por atrito em escoamento uniforme e permanente. Entre as fórmulas utilizadas podem ser citadas as equações de Darcy Weisbach e Hazen-Williams (de Azevedo Netto & Fernández, 2015).

A equação de Darcy Weisbach criada em 1845 é definida da seguinte forma (Equação 2.13):

$$h_f = f \frac{LV^2}{D \cdot 2g} \quad (2.13)$$

em que:

h_f é a perda de carga ao longo do conduto, em mca (metros de coluna d'água);

f é o fator de atrito de Darcy Weisbach (adimensional);

L é o comprimento da tubulação, em metros;

V é a velocidade de escoamento do líquido na tubulação (m/s);

D é o diâmetro da tubulação, em metros;

g é o valor da aceleração da gravidade $m^2/2g$

As variáveis necessárias são encontradas da seguinte forma: o comprimento e o diâmetro são observados conforme necessidade de projeto, a velocidade (V) é encontrada por meio da Equação da Continuidade, conforme demonstra a Equação 2.14.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2.14)$$

em que:

V é a velocidade de escoamento do líquido na tubulação (m/s);

Q é a vazão (m^3/s);

A é a área da seção de escoamento (m^2)

A A é a área da seção de escoamento é calculada pela Equação 2.15:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.15)$$

em que:

D é o diâmetro do tubo (em metros).

O fator de atrito é obtido por meio da Equação de Colebrook & White (Equação 2.16):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2.16)$$

O fator de rugosidade da tubulação (ϵ) é medido por equipamento específico de nome rugosímetro. Seu valor é predeterminado por fabricantes e aumenta com o passar dos anos, conforme pode ser observado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Rugosidade dos tubos.

Material	Tubos novos (m)	Tubos velhos (m)
Aço galvanizado	0,00015	0,0046
Aço rebitado	0,0010	0,0060
Aço revestido	0,0004	0,0012
Aço soldado	0,00004	0,0024
Chumbo	Liso	Liso
Cimento-amianto	0,000025	Não determinado
Cobre	Liso	Liso
Ferro forjado	0,0004	0,0024
Ferro fundido	0,00025	0,0050
Manilhas cerâmicas	0,0006	0,0030
Plástico	Liso	Liso
Vidro	Liso	Liso

Fonte: de Azevedo Netto and Fernández (2015)

Em 1883, Osborne Reynolds observou o comportamento de líquidos em escoamento com diâmetros e temperaturas diferente. Por meio de investigações teóricas e experimentais, sua pesquisa convencionou o tipo de movimento de uma tubulação por meio do chamado, número de Reynolds, uma grandeza adimensional, citado na Equação 2.17.

$$Re = \frac{VD}{\nu_{cn}} \quad (2.17)$$

em que:

V é a velocidade do fluido, em m/s;

D é o diâmetro do tubo, em metros;

ν_{cn} é a viscosidade cinemática, em $\frac{m^2}{s}$.

O número de Reynolds torna possível classificar o escoamento de tubulações como laminar, de transição ou turbulento. Se o número de Reynolds for menor ou igual a 2000, tem-se um escoamento laminar cujas características são: trajetória de partículas do fluido bem definidas, sem cruzamento, dessa forma ocorre a formação de uma lâmina que preserva as características do meio. Esse tipo de escoamento é comum em fluidos com alta viscosidade e baixa velocidade de escoamento (de Azevedo Netto & Fernández, 2015).

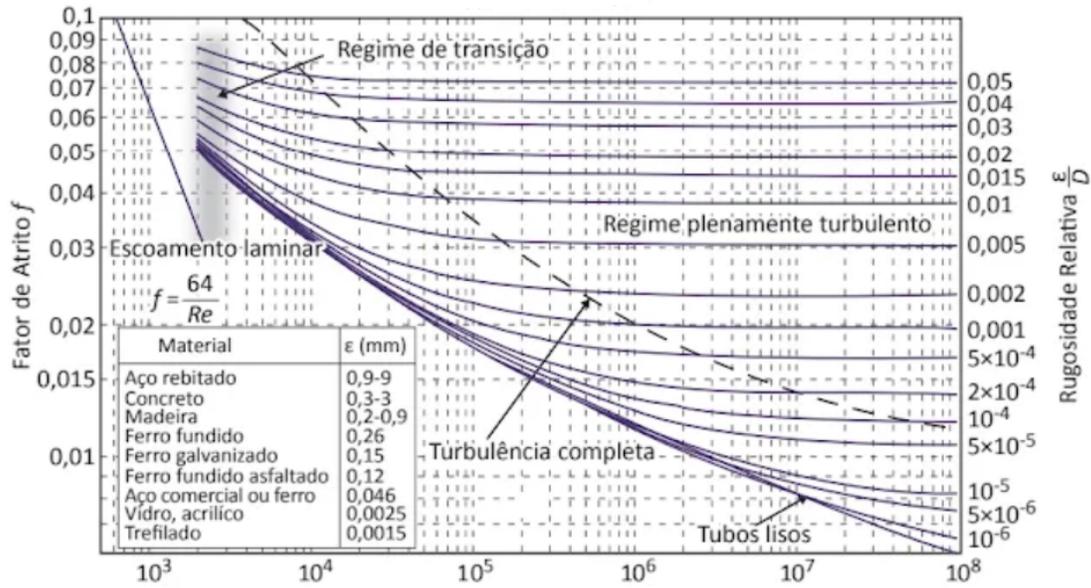
A partir do número de Reynolds, nas tubulações, classifica-se o escoamento da seguinte forma:

- Escoamento laminar: $Re < 2000$.
- Escoamento em transição: $2000 \leq Re \leq 4000$.
- Escoamento turbulento: $Re > 4000$.

No escoamento turbulento ocorrem trajetórias indefinidas e turbulência. A rugosidade da tubulação é um fator de influência de maneira que quanto maior a rugosidade maior a turbulência e conseqüentemente, maior a perda de carga. Esse é o tipo de escoamento comum em fluidos de baixa viscosidade como a água. Nos SAA, portanto, o regime de escoamento de água é sempre turbulento (de Azevedo Netto & Fernández, 2015).

Visto que a fórmula de Colebrook-White não possuía fácil resolução, em 1944, Moody criou um diagrama para obtenção do fator de atrito (f) em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa de uma tubulação (Figura 2.13).

Figura 2.13: Diagrama de Moody.



Fonte: de Azevedo Netto and Fernández (2015)

Em 1903, Allen Hazen & Gardner Williams desenvolveram outra fórmula de perda de carga conhecida como fórmula de Hazen-Williams (Equação 2.18).

$$h_f = 10,667 \frac{L}{D^{4,87}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \quad (2.18)$$

em que:

- h_f é a perda de carga ao longo do conduto, em mca;
- L é o comprimento da tubulação, em metros;
- D é o diâmetro da tubulação, em metros;
- C é o coeficiente de rugosidade.

Os valores do coeficiente de rugosidade (C) podem ser encontrados em literaturas específicas sobre hidráulica. Para a fórmula de Hazen Williams, os autores de Azevedo Netto and Fernández (2015), sugeriram os seguintes valores para cada tipo de material, conforme apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Valores do coeficiente de rugosidade para fórmula de Hazen-Williams.

Tubos	Novos	Usados ± 10 anos	Usados ± 20 anos
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	–	–
Aço galvanizado roscado	125	100	–
Aço rebitados	110	90	80
Aço soldado comum (revestimento betuminoso)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento - amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto (bom acabamento)	130	–	–
Concreto (acabamento comum)	130	120	110
Ferro fundido (revestimento epóxico)	140	130	120
Ferro fundido (revestimento de argamassa)	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
hline Latão	130	130	130
Tijolos (condutos bem executados)	100	95	90
Plástico (PVC)	140	135	130

Fonte: de Azevedo Netto and Fernández (2015)

Além da perda de carga ao longo do conduto, ocorrem também perdas nas conexões e peças acessórias como curvas, cotovelos, registros, válvulas e outros, calculadas individualmente conforme Equação 2.19. Normalmente nesses locais ocorrem distorções no escoamento que causam perda de carga.

$$\Delta h_f = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.19)$$

em que:

K é o coeficiente de perda de carga singular (determinado experimentalmente, conforme demonstrado na Tabela 3.1);

V é a velocidade de escoamento da água na tubulação nas duas seções;

g é o valor da aceleração da gravidade ($m_2/2g$).

Tabela 2.4: Valores do coeficiente K para perda localizada.

Peças	K	Peças	K
Ampliação gradual	0,30*	Junção	0,40
Bocais	2,75	Medidor venturi	2,50
Comporta aberta	1,00	Redução gradual	0,15*
Controlador de vazão	2,50	Registro do ângulo, aberto	5,00
Cotovelo de 90° raio curto	0,90	Registro de gaveta, aberto	0,20
Cotovelo de 90° raio longo	0,60	Registro de globo, aberto	10,00
Cotovelo de 45°	0,40	Saída de canalização	1,00
Crivo	0,75	Tê, passagem direta	0,60
Curva de 90°, r/D = 1	0,40	Tê, saída lateral	1,30
Curva de 45°	0,20	Tê, saída bilateral	1,80
Curva de retorno, $\alpha = 180^\circ$	2,20	Válvula de bóia	6,00
Entrada normal	0,50	Válvula de pé	1,75
Entrada de borda	1,00	Válvula de retenção	2,75

Fonte: Gomes (2019).

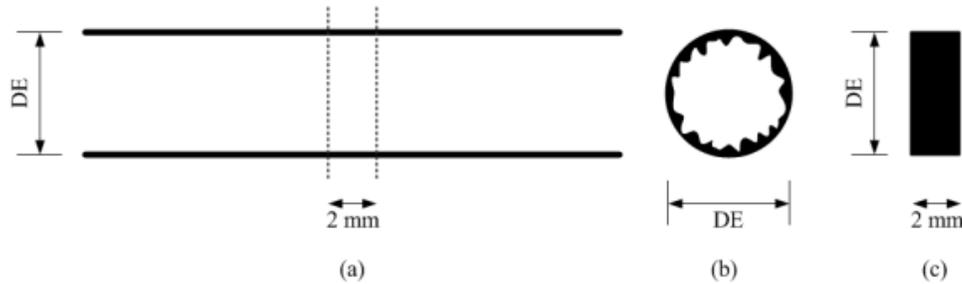
Os valores de perda de carga determinarão a carga de pressão disponível em cada cota topográfica da RDA, de forma inversamente proporcional: quanto menor a perda de carga, maior a pressão (Porto, 2006).

Rugosidade

A percepção da rugosidade como um parâmetro influenciador nas RDA foi identificada por Darcy (1855) no século XIX (Taylor, Carrano, & Kandlikar, 2006). A rugosidade é definida como a altura das imperfeições superficiais que ocorrem no lado interno de tubulações causadas pelo uso ou na fabricação, tal como demonstrado na Figura 2.14 (Bidmus, 2019). O desempenho hidráulico de RDA, portanto, possui ligação com a rugosidade.

A rugosidade é uma propriedade de fabricação do material que compõe a tubulação. Não há tubos com parede interna perfeitamente lisa, fisicamente, todos possuem superfícies ásperas que podem acumular materiais. A superfície interna dos tubos está representada na Figura 2.14. Se as imperfeições geram desigualdades discrepantes na superfície, a superfície é classificada como áspera, e caso as desigualdades sejam menores, é classificada como lisa (da Costa Rocha, 2018) (Brkić, 2011; MacDonald, Chan, Chung, Hutchins, & Ooi, 2016).

Figura 2.14: Rugosidade dos tubos.



Fonte: adaptado de Porto (2006).

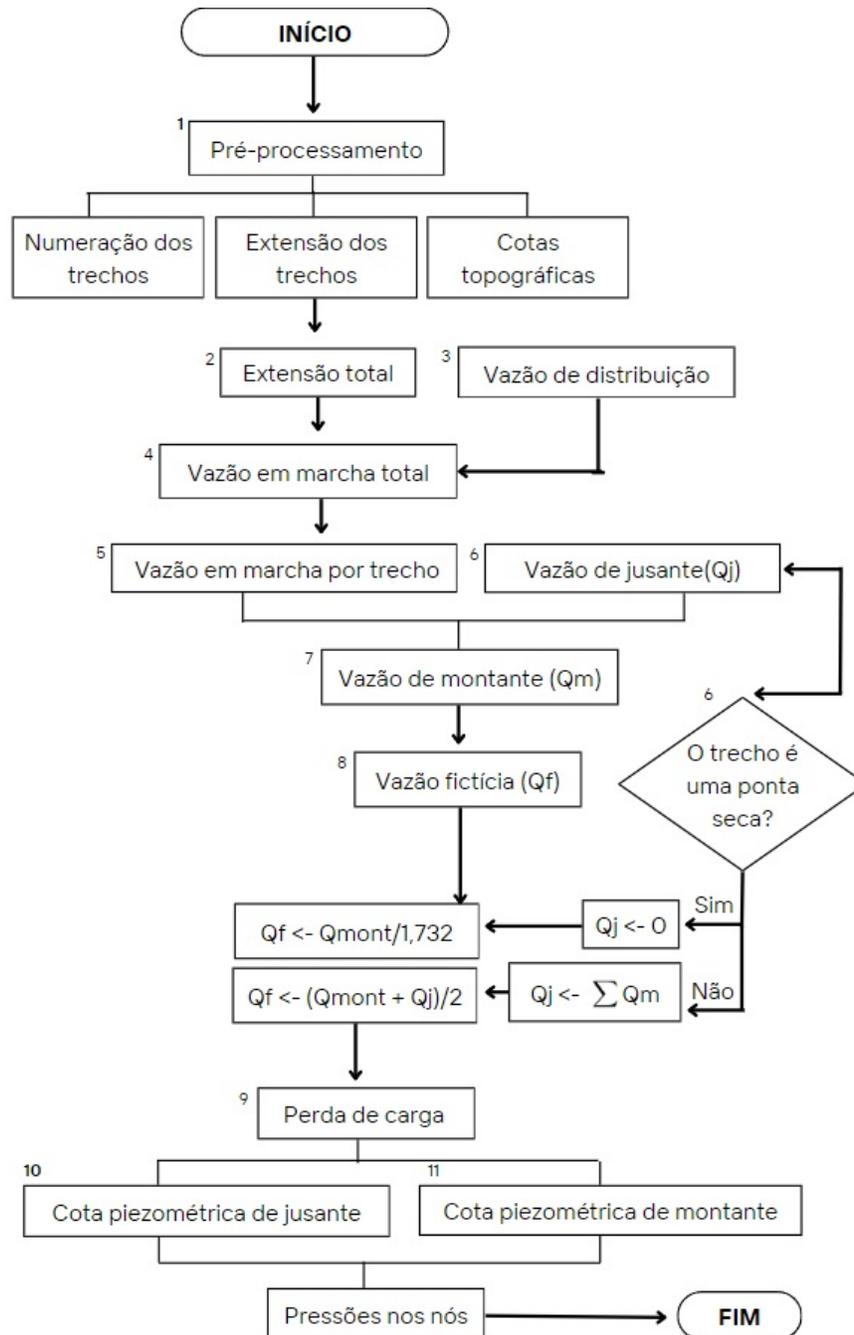
Nos SAA comumente são utilizados tubos de PVC para transportar água já tratada e por isso não há entrada de sedimentos constantemente. No caso desse tipo de tubulação costuma ocorrer um processo de polimento, no qual forma-se uma camada muito fina na superfície interna do tubo e a tornam mais lisa, com o passar do tempo, a rugosidade é reduzida. Essa camada é conhecida como biofilme, pois colônias de micror-organismos permanecem ali aderidos e prejudicam a qualidade da água a ser distribuída. Até mesmo a própria pressão de escoamento da água no tubo causa uma espécie de erosão interna e também faz com que a superfície adquira aspecto liso (Erdei-Tombor, Kiskó, & Taczman-Brückner, 2024; Hemdan, El-Taweel, Goswami, Pant, & Sevda, 2021). É comum que gestores de RDA utilizem substâncias desinfetantes como o cloro e técnicas de descarga para minimizar a formação de biofilme (Douterelo, 2013).

Na literatura clássica, os autores (de Azevedo Netto & Fernández, 2015) relatam um aumento da perda de carga à medida que a rugosidade é reduzida. A deterioração do coeficiente de rugosidade é, portanto, um indicativo de diminuição de desempenho hidráulico, visto que irá ocasionar o aumento no consumo de energia, além de comprometer a qualidade da água destinada ao consumo humano (Santos, 2020).

2.4 Simulação e modelagem

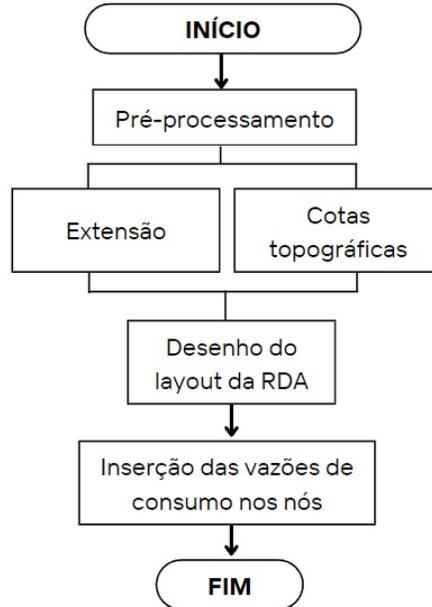
A modelagem consiste em utilizar os conceitos da física, da matemática e da hidráulica para reproduzir o fluxo de água no interior das tubulações e acessórios das RDA. Essa nova metodologia para análise e projeto de RDA tem se destacado, em substituição as técnicas antigas que realizavam os cálculos citados no Tópico 2.3 em calculadoras ou planilhas do Microsoft Excel (Porto, 2006). É possível acompanhar a simplificação desse processo por meio das Figura 2.15 e Figura 2.16.

Figura 2.15: Metodologia de projeto e análise de RDA por meio de cálculos.



Fonte: adaptado de Porto (2006).

Figura 2.16: Metodologia de projeto e análise de RDA por meio de simulação e modelagem.



Fonte: elaboração própria, 2024.

Estudos nessa área têm se intensificado devido ao aprofundamento de modelos matemáticos e a um maior desenvolvimento de tecnologias de supervisão e controle. Dessa forma pode-se construir sistemas inteligentes que trazem a possibilidade de analisar o comportamento da RDA em diferentes cenários e condições, além de produzir respostas mais rápidas e eficientes aos problemas identificados (Salvino, Carvalho, & Gomes, 2015).

Desta forma, nas unidades gestoras, sua aplicabilidade permite (de Jesus Gomes, 2011):

- Analisar problemas relacionados com pressões elevadas/reduzidas;
- Desenvolver procedimentos operacionais de emergência, devido a situação de incêndio ou interrupção de abastecimento de água (falhas de bomba, roturas e manutenção de reservatórios e válvulas de controlo);
- Desenvolver planos de investimento curto, médio e longo prazo;
- Estabelecer prioridades em termos de investimento e intervenção nos sistemas;
- Avaliar o comportamento hidráulico do sistema para uma variação previsível de consumos;
- Comparar diferentes alternativas para fornecimento, transporte, armazenamento e distribuição de água;

- Avaliar os custos e benefícios operacionais quando se pretende concessionar sistemas;
- Avaliar o impacto causado pela necessidade de expansão das infraestruturas de adução, armazenamento e distribuição de água;
- Controle operacional do sistema em tempo real;
- Treinar operadores, no que se refere à sensibilidade ao comportamento hidráulico do sistema.

Para obter tais resultados têm sido desenvolvidos modelos de: programação dinâmica (Lansey & Awumah, 1994), algoritmos genéticos (Carrijo, 2004), programação linear (Vicente, 2005) e programação não linear (de Lucena, 2012). A programação dinâmica é uma técnica matemática que decompõe um problema em vários estágios como uma sequência a ser resolvida para chegar na solução final (Rao, 2019). Os algoritmos genéticos buscam resolver problemas por meio da reprodução de forma lógica do mecanismo de evolução natural das espécies desenvolvido por Charles Darwin (Salvino et al., 2015).

Programação linear é uma técnica de análise quantitativa para decidir acerca de um objetivo desejado. Nela, é criada uma função objetivo que tem a seguinte forma: $a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n = 0$ (nessa função todas as variáveis tem grau um). Assim é calculado um valor matemático considerado ótimo para o problema que se propõe resolver. As decisões são tomadas por meio da maximização ou minimização dessa função (Dantzig & Thapa, 1997; Kunwar & Sapkota, 2022; Stanimirović, 2022). Já a programação não linear estabelece uma função objetivo que poderá ser controlada por equações de restrição lineares e/ou não lineares (Nash & Sofer, 1996).

Na área de hidráulica, as RDA têm sido analisados por meio de modelagem e simulação por meio de softwares comerciais como EPANET 2.0 e WaterCAD (Sonaje & Joshi, 2015), além de criar interações entre softwares e linguagens de programação (Arandia & Eck, 2018a; Bizarro et al., 2020).

EPANET 2.0

Dentre os softwares que tem sido utilizados para esta finalidade está o EPANET 2.0 de 2000. Este é um software de domínio público e código aberto, em ambiente Windows, cuja versão em português foi traduzida pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica (LEHNS) em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), para simular o comportamento hidráulico de sistemas pressurizados de água, ao longo do tempo (Gomes, 2019).

Os modelos podem ser apresentados de forma dinâmica ou estática. Nos modelos dinâmicos, as grandezas hidráulicas, como vazão nos trechos, pressão nos nós, níveis de água nos

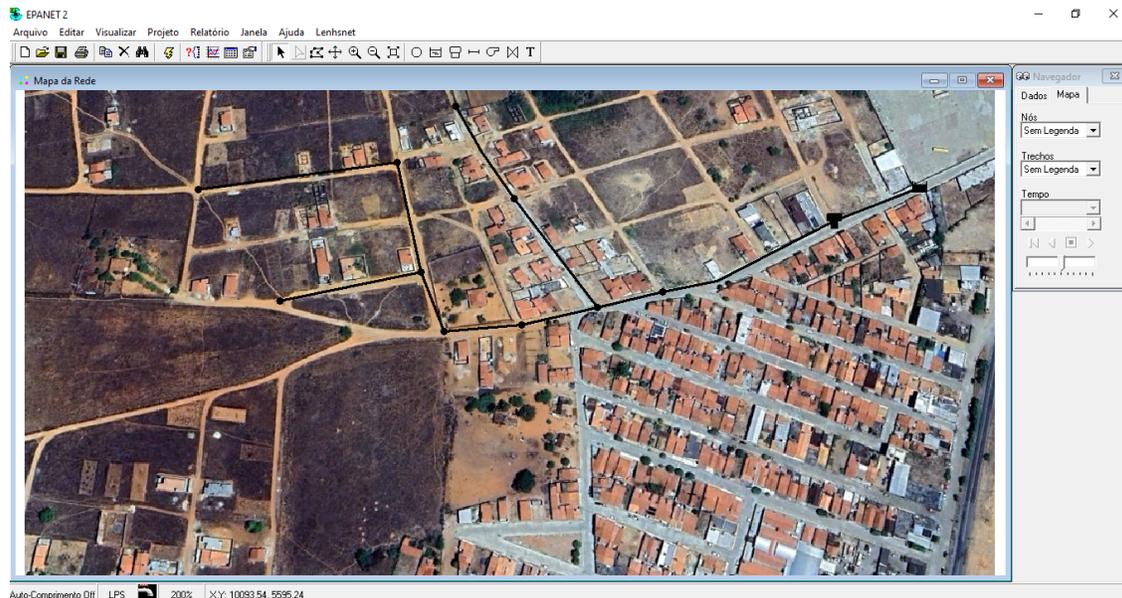
reservatórios e energia requerida para bombeamento, seguem a mudança causada pelo consumo variado de água ao longo do tempo. Já na forma estática, os valores são determinados para uma condição de operação específica, sem variar ao longo do tempo (Gomes, 2019).

O uso do EPANET 2.0 para simulação e modelagem hidráulica destaca-se por permitir: o dimensionamento ilimitado do número de componentes da rede analisada, o cálculo da perda de carga pode ser feito com diversas fórmulas de perda de carga citadas em literatura, conforme escolha do projetista, dentre elas: Hazen-Williams e DarcyWeisbach. Nele também é feita a consideração de perdas de cargas equivalentes, a modelagem de bombas de velocidade constante ou variável, o cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo e a modelagem dos principais tipos de válvulas e reservatórios de nível variável (Rossman, 2009).

No dimensionamento de RDA, os pontos de derivação de vazão e de mudança de diâmetro são chamados de nós e as tubulações que conectam os nós, são chamadas de trechos. O sentido de escoamento da água ocorre da tubulação principal até as secundárias e assim por diante até finalizar nas extremidades conhecidas como pontas secas, que limitam o abastecimento até um determinado ponto (Porto, 2006). Apresenta-se a seguir um exemplo de rede de distribuição inserida no EPANET 2.0 para conhecimento da interface do software na Figura 2.17.

A rede é composta por um reservatório ilimitado ou Reservatório de Nível Fixo (RNF) , que representa as captações de água com nível constante e qualidade conhecida, como as ETA. A água é então bombeada para um sistema de distribuição. A rede de distribuição está ligada a um Reservatório de Nível Variado (RNV). Os nós são usados para inserir as informações de cota e consumo base e são interligados por linhas chamadas de trechos. Nos trechos insere-se os comprimentos, o material que compõe a tubulação, e o coeficiente de rugosidade.

Figura 2.17: Interface do EPANET 2.0.



Fonte: elaboração própria, 2024.

O EPANET 2.0 tem sido utilizado na literatura científica para estudos de caso de RDA em diferentes locais do mundo. Uma das análises que têm sido feitas com uso do EPANET 2.0 é a de qualidade da água por meio da mensuração de sua idade. Idade da água é o termo utilizado para indicar o tempo que a água leva para viajar de uma fonte de água até os consumidores, regida pelo projeto e pelos componentes do sistema de distribuição de água. Ao percorrer uma RDA, a água potável sofre transformações estéticas, físicas e químicas (Monteiro, Algarvio, & Covas, 2021). Caso a água permaneça muito tempo na RDA antes de ser entregue aos consumidores, a concentração de desinfetantes como o cloro, pode ter ação reduzida para o controle de microrganismos que afetam a saúde humana (García-Ávila et al., 2020).

No trabalho dos autores Mabrok, Saad, Ahmed, and Alsayab (2022), realizado no Kuwait (Oriente Médio), a metodologia do trabalho consistiu em estabelecer cenários de simulação no EPANET 2.0, nos quais a RDA estaria com 20%, 50% e 100% de ocupação da área territorial. Os resultados demonstraram que com 20% de ocupação, alguns nós excederam os limites aceitáveis para a idade da água para a ação desinfetante do cloro. O aumento de 50% na ocupação reduziu a idade da água em diferentes locais ao longo de todo o rede. E por último, com 100% da área ocupada, obteve-se a menor idade da água nas tubulações da rede. Pode-se concluir que a qualidade da água no sistema é significativamente afetada pela ocupação, de tal forma que quanto maior a ocupação, menor será a idade da água.

Apesar de possuir importância para neutralizar microrganismos, o uso de cloro para desinfecção em contato com precursores orgânicos ou inorgânicos presentes na água produz sub-

produtos como os trihalometanos, em suas concentrações mais altas (Rahman, Whalen, & Gagnon, 2013; Villanueva et al., 2017). Esses compostos têm chamado atenção devido à sua carcinogenicidade, genotoxicidade e mutagenicidade (An et al., 2022).

Baseado nisso, os autores Zuthi et al. (2023), realizaram um estudo, na cidade de Chittagong (Bangladesh), para identificar zonas de risco com concentrações de trihalometanos presente. Para tanto, um modelo hidráulico foi desenvolvido no software EPANET 2.0 e foram coletadas amostras de água na RDA para avaliação laboratorial dos parâmetros de qualidade. O valor observado de cloro livre na área de estudo variou de 0,02 a 0,17 mg/L, abaixo do limite estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (OMS) para cloro residual livre em 0,2 mg/L a fim de manter a água protegida de qualquer contaminação microbiana dentro da RDA. Dessa forma, a modelagem de cloro nessa RDA demonstrou que uma dose inicial de cloro de 3 mg/L é adequada para sustentar um teor residual próximo de 0,2 mg/L em toda a rede. Por outro lado, uma dose de cloro primário de 4mg/L faz com que o nível elevado de cloro livre para todos os nós fique acima de 0,2 mg/L.

O EPANET 2.0 também é utilizado para estudos sobre análise do comportamento hidráulico das RDA. Na Indonésia, a cidade de Jember, os autores Widiarti et al. (2020) observaram que a RDA não atendia a população de maneira adequada. O estudo realizado por esses autores teve o objetivo de realizar um diagnóstico da RDA feito por meio do EPANET 2.0 e da calibração com coleta de dados em campo, para posterior comparação e ajuste na modelagem e simulação. Os valores de pressão e velocidade obtidos estavam fora dos limites aceitáveis no país. Conclui-se que é necessário corrigir sua estrutura para abastecer a adequamento à população.

Ainda com objetivo de utilizar simulação e modelagem para diagnóstico de RDA, na cidade de Guelma, Argélia, também foi utilizado o software EPANET 2.0 para tal finalidade. Os parâmetros estabelecidos para avaliar a RDA foram: pressão nos nós, velocidade de escoamento da água nos trechos e decaimento de cloro ao longo da RDA. Observou - se que de maneira geral, durante o dia as pressões eram aceitáveis, porém a noite as pressões na RDA eram maiores e por isso, alguns nós chegavam a atingir mais de 70 mca e portanto, exigiam a inserção de VRR. Também foram notados aspectos de superdimensionamento da RDA, visto que trechos com velocidade de escoamento baixa possuíam diâmetros altos, a partir disso recomendou-se a redução de diâmetros nesses trechos (Mazouz & Abdelraouf, 2021).

Além desses benefícios, o EPANET 2.0 também possui como entre suas potencialidades uma interface de associação com outros softwares de Sistema de Informações Geográficas, como o Quantum Geographic Information System (QGIS), para georreferenciamento das RDA e posterior otimização. A interação com o QGIS permite conhecer as características de elevação do terreno e assim obter o comprimento preciso das tubulações e as cotas topográficas a

serem inseridas nos nós, para então avaliar o comportamento da RDA (Deb, Das, Gupta, & Mukherjee, 2023). Para evitar erros de comprimento nas tubulações, tem-se também a possibilidade de exportar RDA em desenho técnico de programas como o AutoCAD para o EPANET 2.0 (Jawale, Kamire, & Iyer, 2022).

No trabalho dos autores Freitas, Silva, Silva, and Barbedo (2022), foi construído um cenário, denominado cenário-base, que refletia as mesmas características físicas da RDA em análise. O cenário-base revelou a ausência de trechos na faixa abaixo de 10 mca e pressão média de 62,3 mca, este último resultado fora do limite estabelecido pela NBR 12.218/2017. A simulação do EPANET 2.0 foi então exportada para o software QGIS para análise das curvas de nível do terreno. Em seguida, outros cenários foram feitos com mudanças na estrutura para avaliação da redução de pressão. Por intermédio da instalação de mais uma VRP e de duas bombas, os autores obtiveram uma redução de pressão média de 62,3 mca para 41,0 mca. Dessa forma, foi possível concluir o potencial de uso do EPANET 2.0 e um software de georreferenciamento.

Ao final das simulações e trabalhos realizados é possível extrair do EPANET 2.0 arquivos com os seguintes dados e formatos: Dados de entrada (*.inp*); Cálculo hidráulico (*.hyd*); Cálculo de qualidade (*.out*) e Relatório (*.rpt*) (Rossman, 2009). Ainda é possível realizar simulações e criar modelos através da interação entre o EPANET 2.0, linguagens de programação e ambientes de computação como Python, R, C/C++, C#, MATLAB e Visual Basic (Sela & Housh, 2019).

EPANET 2.0 e o R

As análises de redes de água são feitas no R pelos pacotes *epanet2toolkit* e *epanetReader*. Por definição, o R é um ambiente de software de código aberto multiplataforma com linguagem de programação própria que dispõe de recursos para realização de análise estatística e gráfica dos dados. Possui versões para uso em MacOS, Windows e Linux (Ihaka & Gentleman, 1996). A linguagem R, nesse caso, é utilizada para explicar melhor o processamento de dados espaço-temporais e analisar o desempenho das redes de abastecimento de água (Celar & Cisty, 2016; Rossman, 2009).

Uma interface gráfica foi desenvolvida para aprimorar a usabilidade do R, chamada de RStudio. No RStudio funcionalidades do R como a importação de dados, visualização de comandos, funções, resultados, gráficos e geração de documentos, tornam-se mais amigáveis e funcionais (Henning, 2016; Racine, 2012). Além disso, no R pode-se incrementar softwares para realização das mais variadas tarefas, o que permite aos usuários resolver problemas de diversas áreas do conhecimento (de Souza, Rodrigues, de Lima, & Chagas, 2020; Konrath et al., 2018). Estes são conhecidos como pacotes e são encontrados no repositório denominado Comprehensive R Archive Network (CRAN) (Plakidas, Schall, & Zdun, 2017).

Como pacote utilizado para simulação e modelagem hidráulica de uma RDA obtida do EPANET 2.0 está o *epanet2toolkit*. Complementar ao *epanet2toolkit* é utilizado o *epanetReader* para análise de arquivos de dados EPANET 2.0. Por meio desse pacote é possível ler dados, gerar gráficos. Abaixo estão descritas funções para o ambiente R fornecidas pelo *epanet2toolkit* (Eck, 2016). As funções utilizadas no ambiente R fornecidas pelo *epanet2toolkit* podem ser consultadas na Tabela 2.5

Tabela 2.5: Funções para o ambiente R fornecidas pelo *epanet2toolkit*.

Nome	Descrição
<i>ENepanet()</i>	Executa uma simulação completa
<i>ENopen()</i>	Abre o motor EPANET 2.0
<i>ENclosed()</i>	Fecha o motor EPANET 2.0
<i>ENSolverH()</i>	Resolve a hidráulica da rede
<i>ENSolverQ()</i>	Resolve a qualidade da água da rede
<i>ENopenH()</i>	Abre o sistema de análise hidráulica
<i>ENinitH()</i>	Inicializa a rede antes da simulação
<i>ENrunH()</i>	Executa uma análise hidráulica de período único
<i>PTpróximoH()</i>	Período de tempo até o próximo evento hidráulico
<i>ENclosedH()</i>	Fecha o sistema de análise hidráulica
<i>ENopenQ()</i>	Configurações para análise de qualidade da água
<i>ENinitQ()</i>	Inicializa a análise qualidade da água
<i>ENrunQ()</i>	Calcula os resultados do qualidade da água no momento atual
<i>PTpróximoQ()</i>	Avanços de qualidade da água para o início do próximo período de tempo
<i>ENstepQ()</i>	Avanços de qualidade da água para um intervalo de tempo específico
<i>ENcloseQ()</i>	Fecha a análise de qualidade da água
<i>ENsaveH()</i>	Salva resultados hidráulicos em arquivo binário
<i>ENsaveinpfile()</i>	Salva os dados atuais no arquivo de texto <i>INP</i>
<i>ENreporting()</i>	Grava arquivo de relatório de simulação

Fonte: Arandia and Eck (2018b).

Visto que o R possui alto desempenho para análises estatísticas, os autores Lourenço et al. (2024), propuseram uma metodologia de simulação em R com uma RDA teórica criada no EPANET 2.0 para avaliar os resultados da demanda diária de consumo. Nessa proposta, os níveis de água nos reservatórios que abastecem a RDA foram variados conforme demanda da população ao longo do dia. Os pacotes utilizados foram: *epanetReader*, *epanet2toolkit*, *tidyverse*, *ggplot2*, *dplyr*. Os resultados demonstraram que conforme aumenta o consumo, o nível de água no reservatório diminui, bem como os valores de pressão são reduzidos. Além disso foi possível observar que os valores de pressão variaram ao longo do dia em limites fora do previsto em norma. Os autores concluem o trabalho com a afirmação de que um modelo integrado entre EPANET 2.0 e R podem auxiliar a avaliar o desempenho da RDA e identificar

oportunidades de otimização, redução de perdas e aumento de eficiência energética.

Com base nessa proposta, os autores S. M. Marques et al. (2023), analisaram uma rede teórica de distribuição de água com objetivo de obter o melhor cenário para rugosidade e diâmetros para gerar valores de pressão em uma RDA com 48,4% de perdas. Na simulação do EPANET 2.0 foi possível verificar valores de pressão desfavoráveis. Em alguns pontos pressões baixas, menores que 10 mca e em outros altas pressões, superiores a 80 mca, o que justificava o percentual alto de perdas devido a ocorrência de rupturas na RDA. No R, foi estabelecido o valor mínimo de 10 mca e o valor máximo de 50 mca para pressão, conforme determina a NBR 12.218/2017. Em seguida, gerou-se um cenário com valores aleatórios para níveis de reservatório, rugosidade e diâmetros de forma a obter os valores de pressão ideais. O resultado obtido foram pressões entre 20 e 40 mca. O nó com valor mais baixo teve um acréscimo de 56,19% na pressão e o nó com valor mais alto, teve 46,70% de redução em sua pressão.

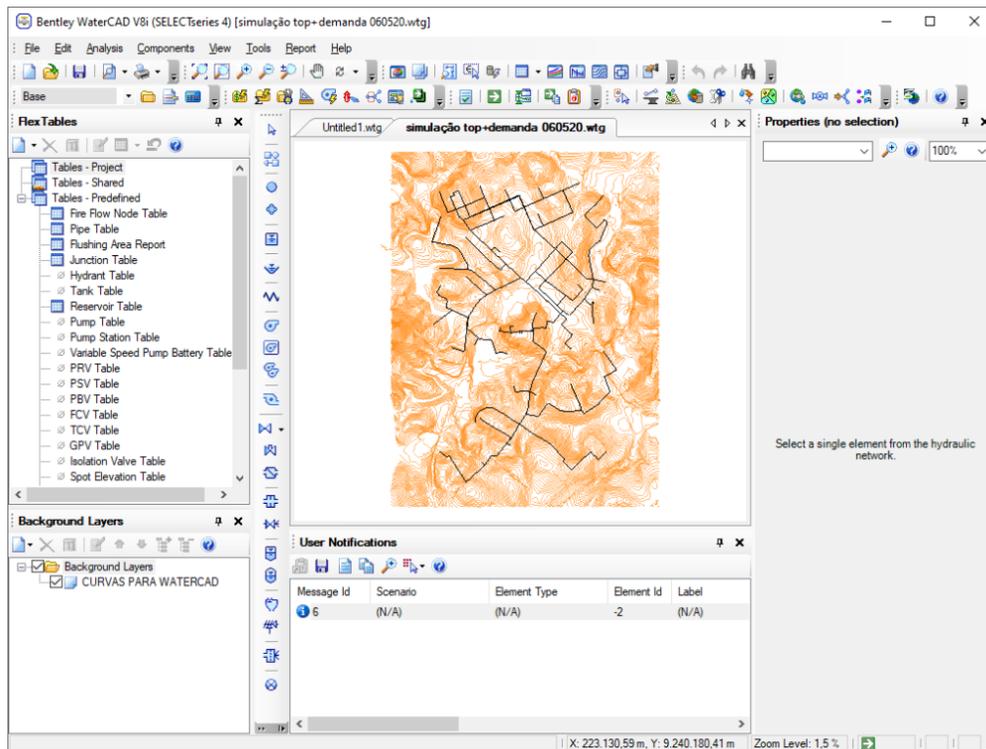
WaterCAD

O software WaterCAD, assim como o EPANET 2.0, também é utilizado para simulação e modelagem de RDA e qualidade da água. Fabricado pelo fornecedor *Bentley Systems*, possui como maior destaque a possibilidade de interação direta com outros softwares pela assimilação de arquivos do AutoCAD (.*dwg*), do QGIS (.*shp*) e até planilhas. As RDA projetadas podem ser exportadas para o AutoCAD e para o EPANET 2.0 (Diwana & Ogawa, 2015). A Figura 2.18 demonstra a interface gráfica do WaterCAD na qual a RDA é apresentada com destaque para curvas de nível do terreno.

Com mecanismo de uso simples e fácil, pode ser uma ferramenta de suporte à decisão para infraestrutura de água confiável e que economiza recursos. As funções do WaterCAD permitem: analisar vazões de incêndio, dimensionar bombas, avaliar custos energéticos, analisar a qualidade da água (Sarker, 2021), calibrar e detectar vazamentos e modelar a inserção de VRP (Diwana & Ogawa, 2015). O WaterCAD tem funcionamento hidráulico desenvolvido por meio de algoritmos genéricos. Dessa forma, é possível que o projetista obtenha bons resultados por meio da calibração (reproduzir em software algum resultado medido em campo) da RDA (Sutharsan, 2023).

Seu uso é liberado mediante o pagamento de licença. A partir de 200 dólares é possível obter a licença para o dimensionamento de redes com até 10 trechos, acessar o suporte técnico e receber o manual. Além do pagamento, alguns requisitos são necessários para uso do software: processador superior a um Pentium IV, memória RAM de 256MB e sistema operacional Microsoft® Windows 2000 ou mais novo (Diwana & Ogawa, 2015).

Figura 2.18: Interface do WaterCAD.



Fonte: da Silva (2020).

Os autores Sutharsan (2023) utilizaram o WaterCAD para auxiliar os gerentes de serviços de água na otimização do custo de investimento e na eficiência operacional. Os resultados demonstraram uma variação de consumo ao longo do dia, normalmente a maior demanda surge nas primeiras horas da manhã e no final da noite, quando as pessoas consomem mais água para tomar banho, lavar e cozinhar. O monitoramento da pressão indicou valores adequados para o desempenho RDA, acima de 10 mca. A justificativa dada para isso foi a pequena diferença de elevação no nível do solo da área de estudo. A velocidade de escoamento da água em alguns trechos estava abaixo do valor recomendado, de 0,6 m/s. Nesses casos, é aconselhado reduzir o diâmetro da tubulação para aumentar a velocidade e assim reduzir a probabilidade de deposição de lodo na tubulação. Porém nesse trabalho, visto que a maioria dos trechos tinham velocidade adequada, optou-se por não aumentar o diâmetro dos tubos, com vistas na redução de gastos orçamentários. Para resolução desse problema estabeleceu-se que seriam realizadas maiores quantidades de operações de limpeza na RDA por meio de descargas.

Em Umbulan, Indonésia, um SAA visava distribuir água para quatro cidades. Nesse caso, a RDA começou a apresentar baixo desempenho no atendimento a demanda de água e aumento dos custos operacionais da energia elétrica. A simulação dessa RDA no WaterCAD

demonstrou baixas pressões, às 08 horas da manhã, visto como horário de pico. Uma das partes da RDA definida como zona 1 apresentou os menores valores de pressão, conforme análise da RDA e das cotas topográficas, concluiu-se que essa é a região com maior elevação. Como medidas de intervenção foi definida a inserção de válvulas de gaveta com o objetivo de direcionar o abastecimento em um único sentido para a zona 1 e VRP na chamada zona 3 para reduzir pressões (Kurniawan, Santosa, & Nasihien, 2021).

O WaterCAD também é utilizado para análise de decaimento de cloro nas RDA. Em um estudo, a simulação realizada demonstrou-se bastante próxima da realidade. Três nós da simulação apresentaram erro menor que 5% quando comparados com os valores da coleta de cloro em campo. A simulação mostrou que os valores de cloro na rede estavam dentro dos valores permitidos em mais de 95% dos tubos da rede e diminuem nos horários de pico e em valores de alta pressão. Os dados disponíveis indicam uma diminuição na porcentagem de cloro residual livre em alguns pontos. Concluiu-se com a ressalva de que é necessário injetar cloro em alguns pontos da rede em determinados horários era importante (Alsaeed, Alaji, & Khouri, 2024).

Visto que uma das potencialidades do WaterCAD incluem a interação com softwares de georreferenciamento, os autores Ibrahim et al. (2023) exploraram o uso desse software em conjunto com o QGIS. A problemática envolvia a falta de abastecimento de em um Instituto Nacional de Recursos Hídricos, em Kaduna, cidade da Nigéria. WaterCAD foi usado na avaliação da RDA, enquanto o QGIS foi usado para desenvolver o mapa topográfico do instituto a fim de obter as informações topográficas necessárias para a análise. Os resultados mostraram pressão, vazão e velocidade eram adequados o suficiente o fornecimento de água. As razões para a ineficiência no fornecimento de água estavam na incapacidade das bombas em encher o tanque aéreo principal, conexões inadequadas, canos rompidos e quedas de energia.

Materiais e métodos

Este capítulo apresenta o arcabouço metodológico detalhado empregado no âmbito desta pesquisa, delinea as estratégias adotadas para analisar o comportamento de uma rede hidráulica diante de alterações nos parâmetros de consumo e rugosidade ao longo de três cenários distintos. Serve também como um guia para compreender o contexto e a estrutura dos experimentos conduzidos, com transparência e a replicabilidade do processo de avaliação dos diferentes cenários. A abordagem metodológica aqui delineada constitui também a base para a análise e interpretação dos resultados apresentados no capítulo Resultados, com objetivo de fornecer as condições necessárias para a compreensão das contribuições deste estudo para o campo da análise de redes hidráulicas.

As Seções a seguir discutirão a descrição dos cenários simulados, que envolvem diferentes populações e níveis de rugosidade das tubulações; os dados e as ferramentas utilizadas; a configuração e procedimento experimental que contém as etapas de parametrização dos dados e o desenvolvimento das simulações para cada cenário; as métricas de avaliação selecionadas para quantificar o impacto das mudanças nos parâmetros da rede; a análise estatística e por fim; o tipo dessa pesquisa.

3.1 Cenários avaliados

Para a realização das simulações e análises, foram utilizadas as seguintes ferramentas:

- EPANET: Um software amplamente utilizado para modelagem de sistemas de distribuição de água, empregado aqui para simular o comportamento da rede hidráulica nos diferentes cenários propostos. O EPANET permitiu a construção da RDA no primeiro cenário e análise detalhada da pressões e perdas de carga ao longo da rede.
- R: Um ambiente e linguagem de programação para computação estatística e gráfica,



utilizado nesta pesquisa para abordar a RDA gerada no primeiro cenário do EPANET 2.0. O R foi empregado na construção dos próximos cenários com redução da rugosidade e aumento do consumo de água devido ao crescimento populacional, criação de gráficos, execução de análises estatísticas e interpretação dos dados gerados pelo EPANET.

O primeiro cenário base foi criado no EPANET 2.0 com dados empíricos para o ano de 2024. Os dados de entrada da simulação foram: o traçado da rede, a posição dos nós, o consumo base, as cotas topográficas do terreno (obtidas junto ao Google Earth) e do reservatório, o diâmetro e o comprimento das tubulações. Dessa forma, a RDA empírica proposta possuiu as seguintes características:

- População em 2014: 200 habitantes.
- População em 2024: 500 habitantes.
- Consumo *per capita* (q_m): 100 L/hab.dia.
- Taxa de ocupação por residência (T_x): 4 habitantes.
- Tipo de RDA: ramificada.
- Material dos tubos: PVC.
- Fórmula para perda de carga: Hazen-Williams (Equação 2.18)
- K_1 : 1,2.
- K_2 : 1,5.

Tabela 3.1: Informações sobre nós e trechos da RDA empírica.

Identificador do nó	Cota topográfica	Identificação do trecho	Extensão do trecho
1	183	1	295
2	183	2	166
3	187	3	216
5	189	4	526
6	189	5	85
7	175	6	311
8	176	7	344
9	177	8	295
10	176	9	190
11	175	10	453
12	188	11	260
13	188	12	185
14	184	13	106
15	188	14	604
16	180	15	155
17	180	16	391
18	175	17	415
19	193	18	204
20	190	19	394
21	189	20	349
22	198	21	247
23	195	22	309
24	174	23	117
25	186	24	321
26	178	25	176
27	189	26	63
28	194	27	774
29	188	–	–

Fonte: elaboração própria, 2024.

O segundo cenário e o terceiro foram criados no R a partir do cenário base desenvolvido no EPANET 2.0. O segundo cenário representou o comportamento hidráulico da RDA 10 anos a frente (2034), na qual o coeficiente de rugosidade do tubo PVC é reduzido para o valor de 135. Já o terceiro e último cenário refletiu o comportamento da RDA com um crescimento populacional para 20 anos a frente (2044) e redução de coeficiente de rugosidade do tubo PVC para 130.

A fórmula de projeção aritmética (Equação 3.1) foi utilizada para calcular a variação populacional nos anos de 2034 e 2044 (Heller & de Pádua, 2010; Rezagama, Handayani, Zaman, & Putra, 2020).

$$P_t = P_0 + K_a \cdot (t - t_0) \quad (3.1)$$

em que:

P_t é a população de projeto;

P_0 é a população inicial empírica;

K_a é a taxa de crescimento aritmética;

t é o ano de final de projeto;

t_0 é o ano inicial de projeto.

$$K_a = \frac{P_2 - P_0}{t_2 - t_0} \quad (3.2)$$

em que:

K_a é a taxa de crescimento aritmética;

P_2 é a população final empírica;

t_2 é o ano final de projeto;

t_0 é o ano inicial.

As simulações hidráulicas nos três cenários avaliados possuem os seguintes dados:

- Rugosidade das tubulações no cenário 1: 140.
- Rugosidade das tubulações no cenário 2: 135.
- Rugosidade das tubulações no cenário 3: 130.
- Fórmula para perda de carga: Hazen-Williams.

Essas ferramentas foram essenciais para o desenvolvimento do estudo por permitirem uma análise robusta e detalhada dos diferentes cenários de rede hidráulica avaliados.

3.2 Simulação no software R

No ambiente de software R foi construído um modelo para simular o compostamento hidráulico da RDA com base na redução de rugosidade do tubo PVC para 10 e 20 anos posteriores (de Azevedo Netto & Fernández, 2015) e no aumento populacional relatos a esses anos. Ao final, foi observado o comportamento dos parâmetros hidráulicos: pressão e perda de carga diante desses novos cenários. O modelo utilizado para este ensaio está descrito no Capítulo 7 - Modelo proposto.

Para construção do modelo, inicialmente foram instaladas as bibliotecas: *epanet2toolkit*, *margittr*, *epanetReader*, e *ggplot2*. Suas funções são: realizar a interação entre o Epanet 2.0 com a linguagem de programação, ler e análise dados da RDA dimensionada, melhorar a legibilidade do código e conduzir a uma melhor visualização de resultados complexos em gráficos simples e intuitivos.

Prosseguiu-se com a inserção da RDA para leitura e execução dos demais comandos no R. Os arquivos *.inp* e *.rpt* obtidos no EPANET 2.0, por meio da exportação dos dados da RDA, para que a RDA seja conhecida em termos de dados e relatório de funcionamento, respectivamente. Esses arquivos foram armazenados em uma mesma pasta e em seguida, no R, foi definido o diretório para que fossem encontrados e lidos. A execução da análise hidráulica foi solicitada com o comando *ENepanet*.

É possível consultar o resumo de dados e fazer a visualização gráfica da RDA, por meio dos comando *summary* e *plot*. Em seguida, os comandos *ENopen*, *ENopenH* e *ENinitH(0)* abrem a rede hidráulica, iniciam a análise e estabelecem as condições iniciais. Para configurar no algoritmo a contagem de nós e trechos necessários à modelagem no R foram utilizados os comandos *EN_NODECOUNT* e *EN_LINKCOUNT*.

Em seguida, as funções *ENgetnodevalue* e *ENgetlinkvalue* cria vetores para armazenar as pressões e perdas de carga em todos os nós e tubulações. Os valores de rugosidade também precisam ser armazenados. Nesse caso, em um primeiro momento, criou-se uma matriz para conter os valores de rugosidade para os diferentes cenários, a saber: 140, 135 e 130. Cada linha dessa matriz representa um cenário diferente.

Os resultados de pressão e perda de carga em cada cenário foram também armazenados em matrizes. Em um segundo momento da modelagem fez-se a alteração dos cenários conforme aumento populacional para incrementar demanda de consumo a RDA. Para cada cenário de redução a rugosidade também foram ajustados os valores de elevação do consumo. O comando *ENSolveH* foi responsável por resolver o sistema hidráulico.

A penúltima etapa antes da obtenção dos dados consistiu em calcular o erro absoluto entre as perdas de carga e as pressões em cada cenário. O cenário com menor erro é considerado o cenário ideal para as análises solicitadas. Esses resultados são então armazenados em arquivos *.csv* para serem abertos em planilhas. Os comandos *EncloseH* e *Enclose* fecham a simulação hidráulica.

3.3 Parâmetros de avaliação

Há parâmetros hidráulicos a serem seguidos no que diz respeito as pressões, aos diâmetros, e às perdas de carga. No Brasil, a “NBR12218” (2017) estabelece procedimentos para a

elaboração de projetos de rede de distribuição de água para abastecimento público, entre os quais cabe destacar:

- O diâmetro mínimo dos condutos secundários deve ser 50 mm.
- A pressão nos nós é uma métrica crucial para garantir o adequado fornecimento de água aos consumidores finais. Durante as simulações, as pressões nos diferentes nós da rede foram monitoradas para verificar se estavam dentro dos limites recomendados para um sistema de distribuição eficiente. O objetivo foi assegurar que a rede mantivesse uma pressão adequada em todos os pontos, para evitar tanto pressões excessivas, que podem danificar a infraestrutura, quanto pressões insuficientes, que podem comprometer o fornecimento de água. No Brasil, a “NBR12218” (2017) estabelece procedimentos para a elaboração de projetos de rede de distribuição de água para abastecimento público, entre os quais cabe destacar que a pressão estática máxima nas tubulações distribuidoras deve ser de 50 mca, e a pressão dinâmica mínima, de 10 mca.;
- A perda de carga ao longo das tubulações é outra métrica fundamental para a avaliação do desempenho da rede hidráulica. Ela indica a redução de pressão causada pelo atrito interno nas tubulações, e é diretamente influenciada pela rugosidade e pelo fluxo de água. Nas simulações, a perda de carga foi calculada utilizando a fórmula de Hazen-Williams, que é amplamente utilizada em sistemas de distribuição de água. A análise das perdas de carga permitiu avaliar a eficiência da rede e identificar potenciais pontos de melhoria, especialmente em relação às variações na rugosidade das tubulações nos diferentes cenários simulados. Assim como para as pressões, a “NBR12218” (2017) estabelece que a perda de carga deve ser menor ou igual a 10 m/km calculada por meio da fórmula universal;

Ainda que a perda de carga seja menor ou igual a 10 m/km, buscou-se neste trabalho reduzi-la o máximo possível para proporcionar aumento de pressão nos nós posteriores.

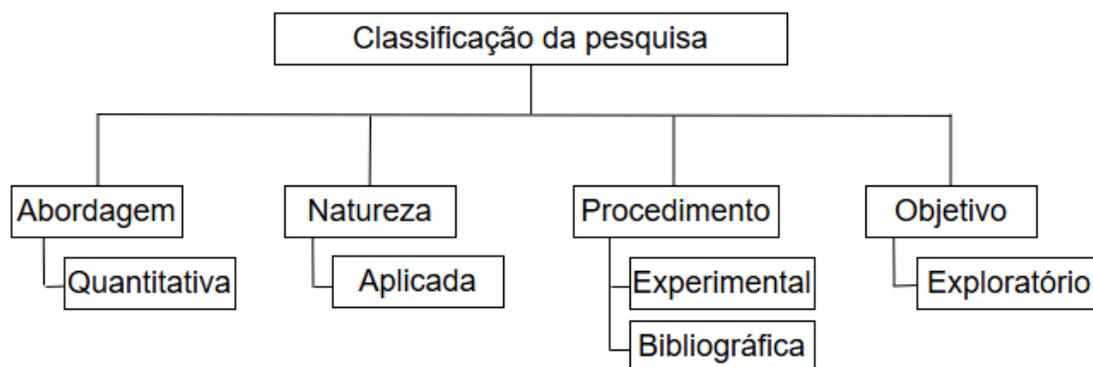
3.4 Tipo de Pesquisa

Essa pesquisa foi desenvolvida com a operação de softwares de simulação e estatística para avaliar os parâmetros hidráulicos pressão e perda de carga, de forma quantificável. Entende-se portanto sua abordagem como quantitativa. Sua natureza é aplicada, visto que é direcionada a solução de um problema específico (Gil, 2008).

Como tipos de procedimentos, inicialmente foi empregado o procedimento de análise bibliográfica de áreas correlatas ao tema como: hidráulica e modelagem de RDA em livros e artigos

científicos. O estudo aqui desenvolvido foi concentrado em uma rede de distribuição elaborada com características próprias. Esta, foi simulada no EPANET 2.0 e em seguida, criou-se um modelo para analisar a RDA, com base na redução da rugosidade da tubulação ao longo do tempo. Compreende-se portanto que além do procedimento bibliográfico, os procedimentos experimental e documental também estão presentes na realização dessa pesquisa. Por fim, o objetivo dessa pesquisa pode ser classificado como exploratório (Gil, 2008). A classificação dessa pesquisa foi representada esquematicamente em Figura 3.1.

Figura 3.1: Classificação da pesquisa.



Fonte: adaptado de Gil (2008).

Modelo proposto

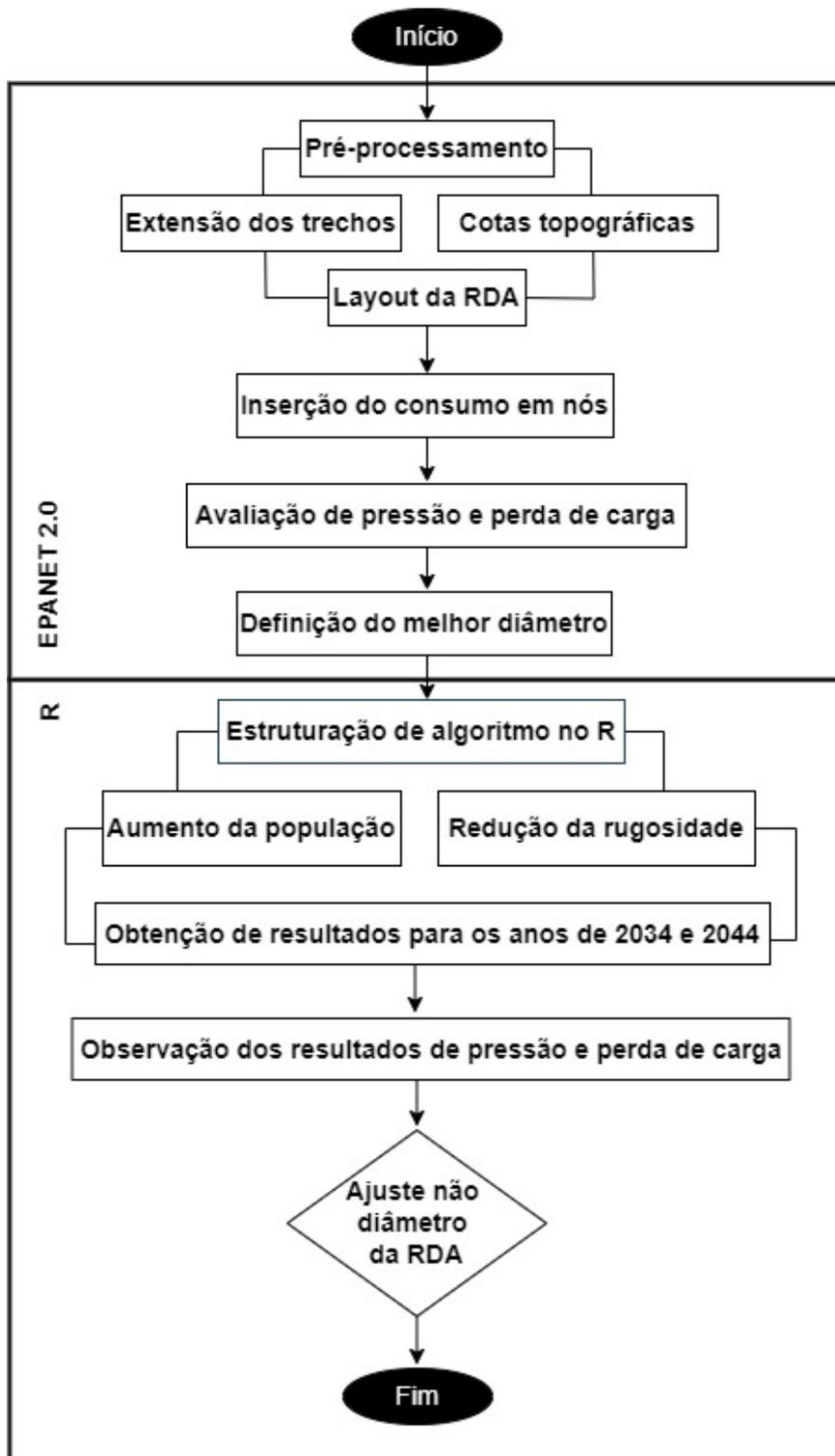
O modelo proposto tem início com o pré-processamento dos dados necessários à realização da simulação no EPANET 2.0. Nessa etapa são inseridos dados sobre a extensão dos trechos e as cotas topográficas. Em seguida o layout (desenho) da RDA é construído conforme o escoamento de água do reservatório em direção aos trechos.

Em cada nó criado durante a definição do layout da RDA foi inserido o valor de consumo, conforme o valor total de vazão e vazão nodal (Equação 2.11 e Equação 2.12, respectivamente). Após inserção dessas informações a simulação foi executada e foram observados os valores de pressão e perda de carga. Os valores de pressão devem estar compreendidos entre 10 e 50 mca, enquanto os valores de perda de carga devem ser iguais ou menores que 10 m/km. Diante do ajuste desses valores foram definidos os diâmetros das tubulações.

Em seguida, essa RDA foi exportada o R console nos formatos *.inp*, que carrega as informações dos dados inseridos e *.rpt* que trás um relatório sobre o funcionamento da RDA. Em seguida estruturou-se o algoritmo 1 com as funções necessárias para alteração de duas variáveis: aumento de consumo e redução da rugosidade, na RDA inserida. O consumo foi acrescido conforme estimativa populacional para em 2034 e 2044. E os valores de rugosidade para o tubo PVC foram reduzidos para 135 (10 anos a frente, em 2034) e 130 (20 anos a frente, em 2044), conforme aborda o autor (de Azevedo Netto & Fernández, 2015).

A modelagem com algoritmo no R console gera ao final arquivos *.csv* para análise dos resultados e geração dos gráficos. Dessa forma pode-se acompanhar as variações de pressão e perda de carga e então decidir pelo aumento no diâmetro dos tubos ou não.

Figura 4.1: Fluxograma do modelo para avaliação de pressão e perda de carga em uma RDA ao longo do tempo.



Fonte: elaboração própria, 2024.

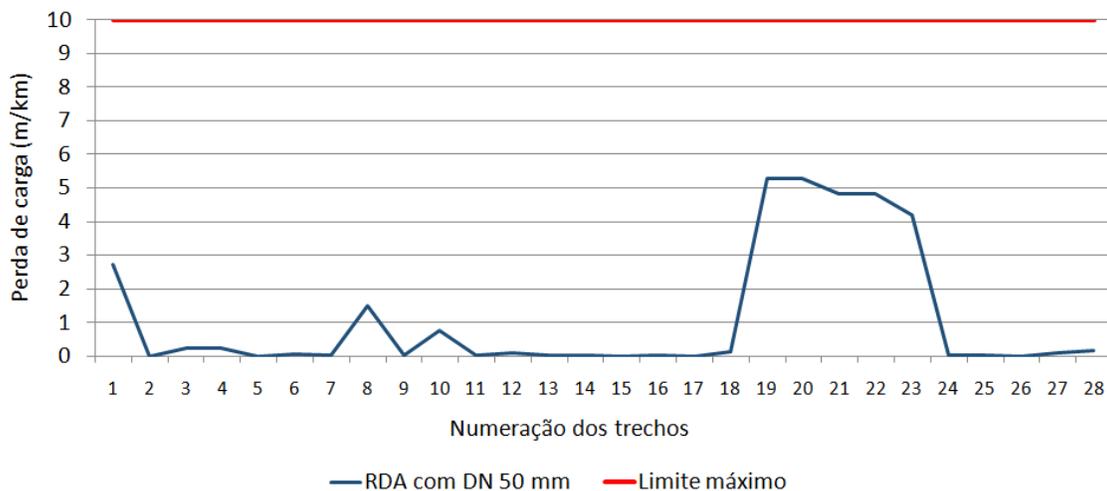
Resultados

5.1 Cenário 1: simulação da RDA e correção dos parâmetros hidráulicos pressão e perda de carga.

Os valores obtidos para população e vazão de projeto foram respectivamente: 500 habitantes e 1,04 l/s. A construção do traçado da rede conforme características tipográficas exigiu a 29 nós e 28 trechos.

A simulação inicial, na qual o trecho de saída do reservatório possuía 100 mm de diâmetro e os demais trechos tinham 50 mm de diâmetro demonstrou resultados negativos para o funcionamento da RDA. Para o parâmetro perda de carga são observados valores de perda de carga dentro do permitido em legislação, mas ainda assim, nos trechos 19 a 23, cabe adotar ações para reduzir a perda de carga e aumentar as pressões em nós posteriores. A Figura 5.1 demonstra o gráfico com os valores de perda de carga.

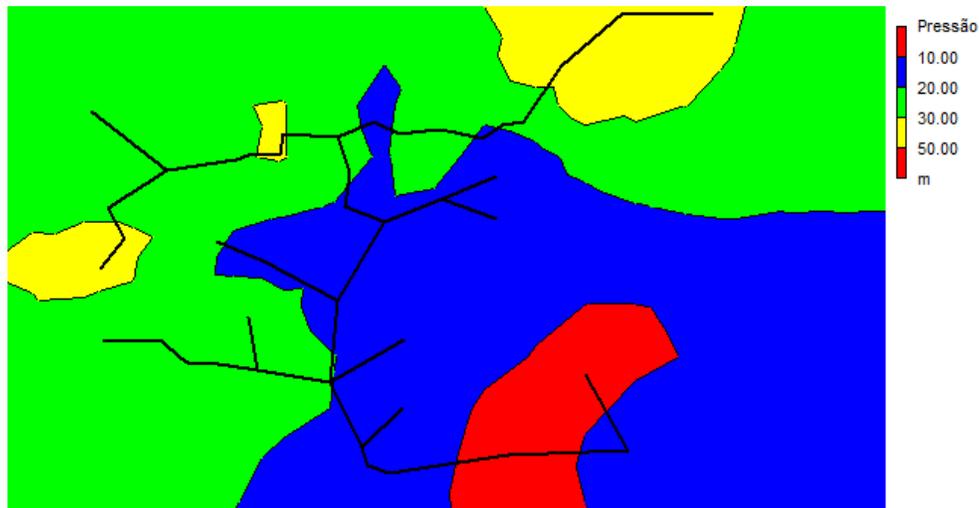
Figura 5.1: Gráfico dos valores de perda de carga em cada trecho com Dn 50 mm.



Fonte: elaboração própria, 2024.

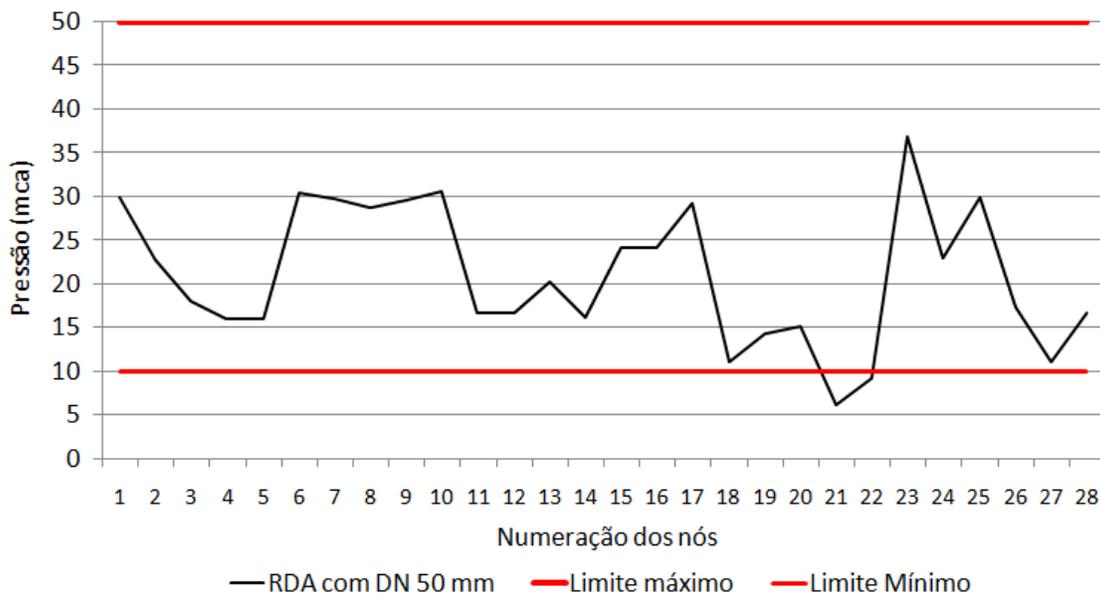
Notou-se que as pressões foram, em sua maioria adequadas. Positivamente, não ocorreram pressões superiores a 50 mca. Nos nós 21 e 22, as pressões foram baixas, abaixo de 10 mca, o que demonstra que nessa área houve abastecimento, porém insuficiente. Os resultados de pressão são demonstrados por meio do gráfico de isolinhas (na Figura 5.2) e por meio de gráfico com os valores de pressão em cada nó (na Figura 5.3).

Figura 5.2: Gráfico de pressão em isolinhas.



Fonte: elaboração própria, 2024.

Figura 5.3: Gráfico dos valores de pressão em cada nó.



Fonte: elaboração própria, 2024.

Em outros trabalhos tal como este, os autores utilizaram como solução para as pressões



abaixo de 10 mca, o aumento do diâmetro da tubulação em trechos da RDA com objetivo de reduzir a perda de carga e elevar a pressão nos nós desejados (Lourenço et al., 2024; Pratama & Soedjono, 2023).

Dessa forma, manteve-se o diâmetro da tubulação de saída do reservatório em 100 mm e o diâmetro de toda a tubulação principal foi substituído de 50 para 75, como pode-se observar na representação da Figura 5.4. O resultado alcançou o objetivo desejado.

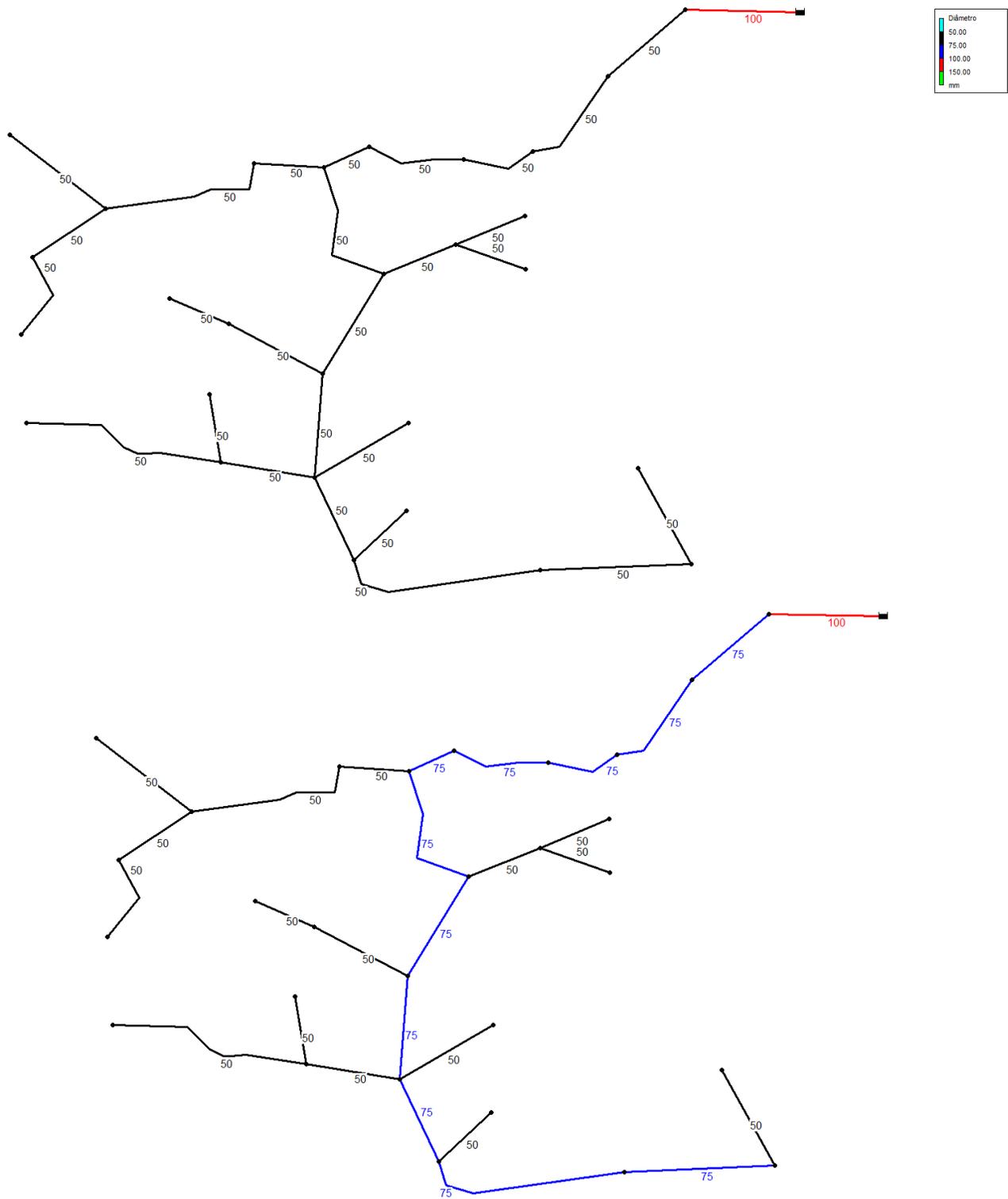
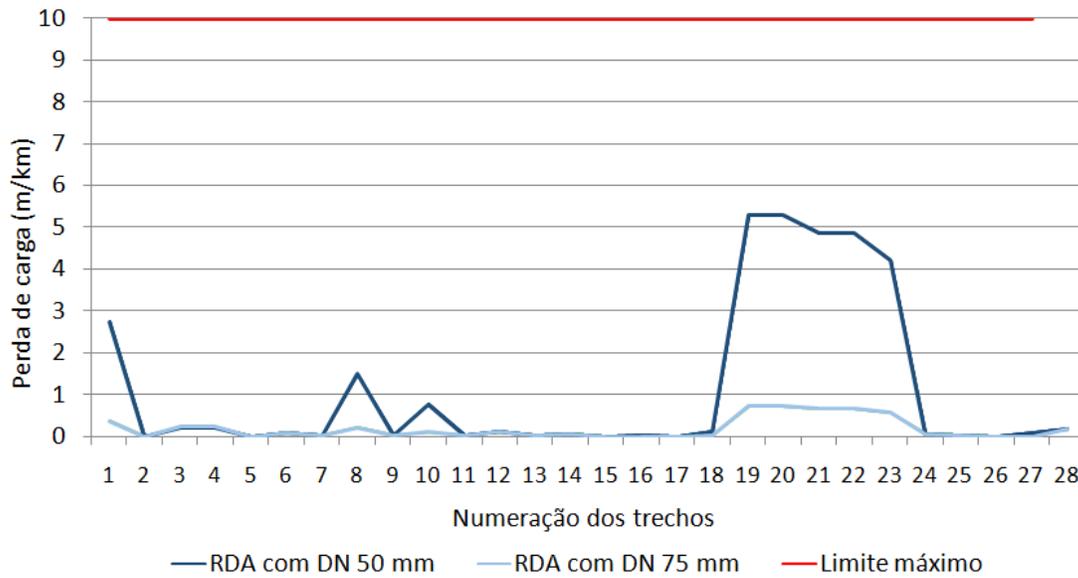


Figura 5.4: Alteração de diâmetro da tubulação principal.

Fonte: elaboração própria, 2024.

A perda de carga foi reduzida de forma satisfatória nos trechos de 19 a 23, conforme pode-se observar na figura Figura 5.5.

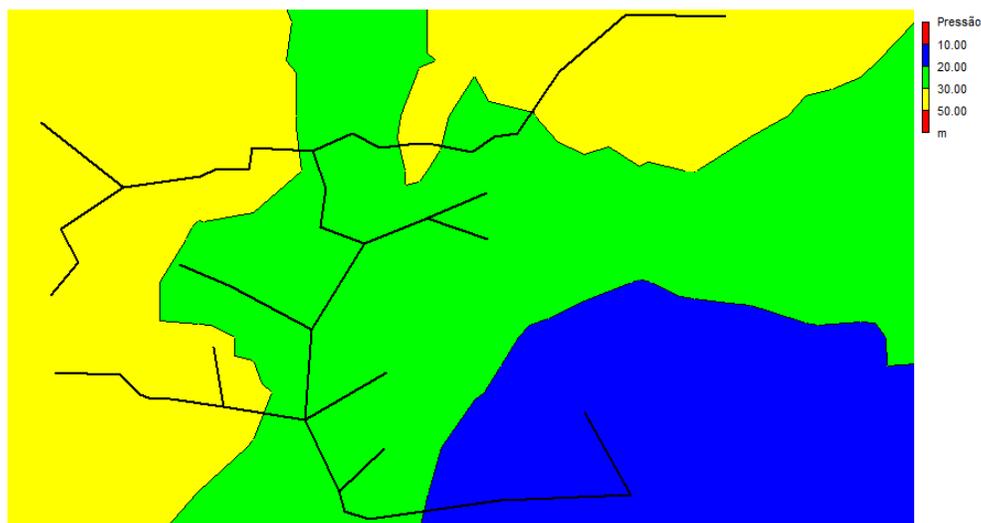
Figura 5.5: Gráfico dos valores de perdas em cada trecho.



Fonte: elaboração própria, 2024.

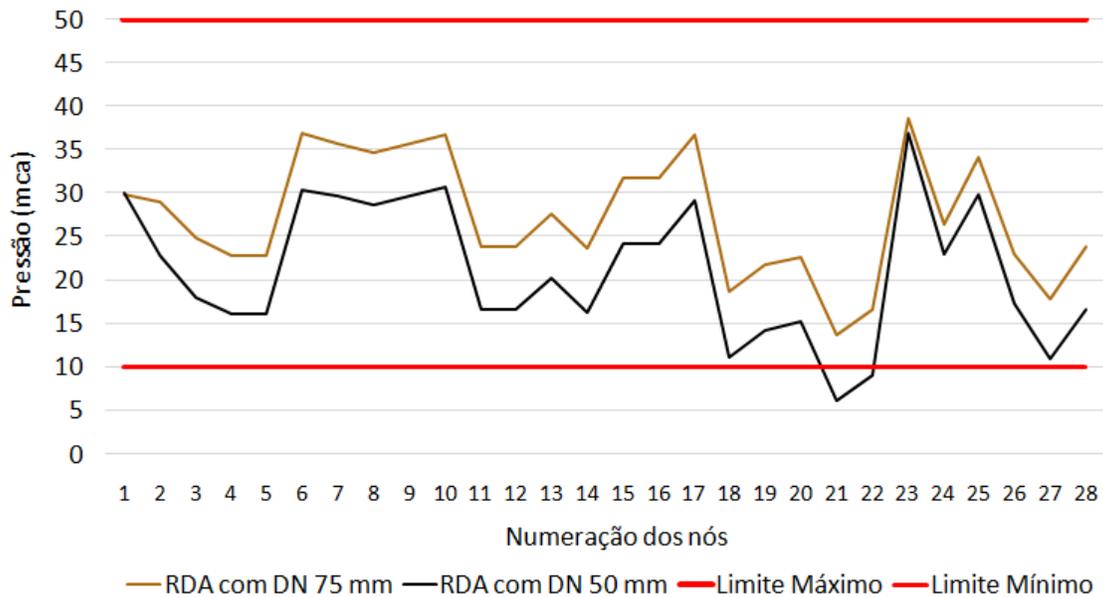
O parâmetro pressão também foi ajustado pela alteração de diâmetro na tubulação principal de forma que os nós 21 e 22, antes com pressão menor que 10 mca, tiveram seus valores de pressão elevados e enquadrados dentro do limite requisitado pela NBR 12.218/2017, como pode-se observar nas Figura 5.6 e Figura 5.7.

Figura 5.6: Gráfico dos valores de pressão em cada nó.



Fonte: elaboração própria, 2024.

Figura 5.7: Gráfico dos valores de pressão em cada nó.

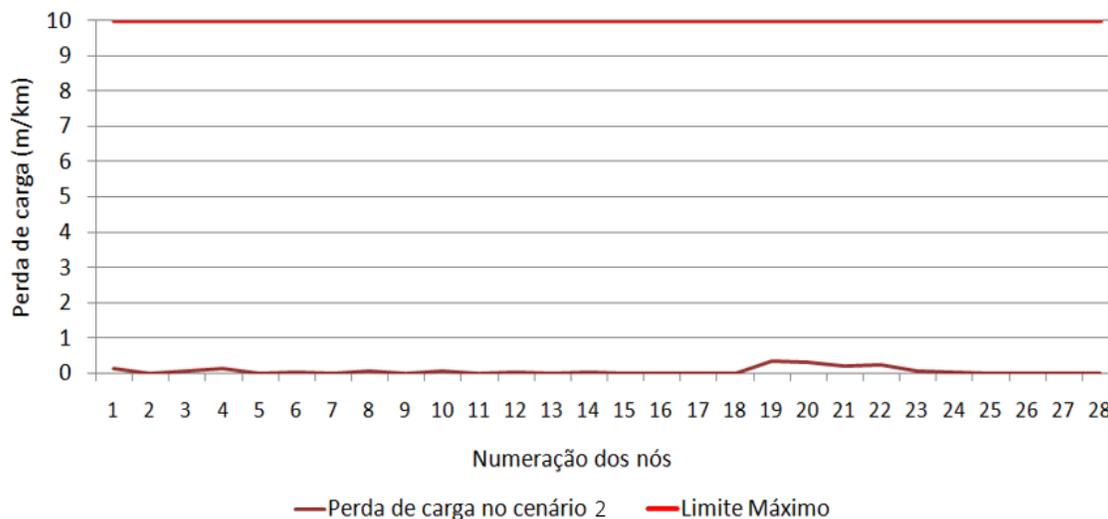


Fonte: elaboração própria, 2024.

5.2 Cenário 2

Este cenário atende uma população de 800 habitantes cuja vazão de consumo total é de 1,67 l/s. Os resultados de perda de carga permaneceram inferiores a 10 m/km em todos os trechos, conforme demonstrado na Figura 5.8. Percebe-se que, a perda de carga foi reduzida em aproximadamente 4% quando comparada ao primeiro cenário, isso pode ser justificado pelo aumento de consumo de água na RDA.

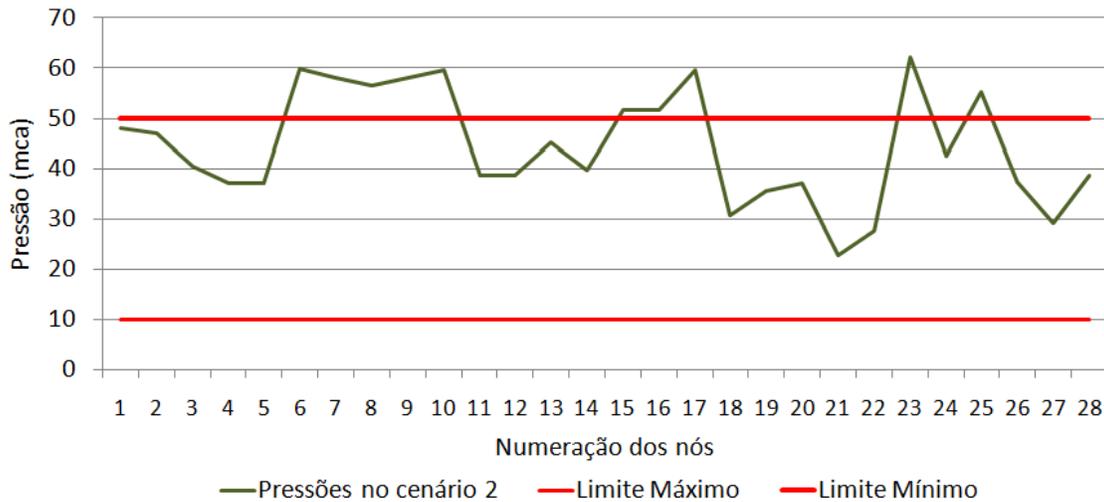
Figura 5.8: Gráfico dos valores de perda de carga em cada trecho no cenário 2.



Fonte: elaboração própria, 2024.

Além disso, constata-se uma elevação das pressões na RDA causada pelo aumento populacional e pela redução da rugosidade. Nesse cenário não ocorreram pressões menores que 10 mca. Porém em alguns nós a pressão foi superior a 50 mca. Os valores de pressão para o cenário 2 estão representados na Figura 5.9.

Figura 5.9: Gráfico dos valores de pressão em cada nó no cenário 2.

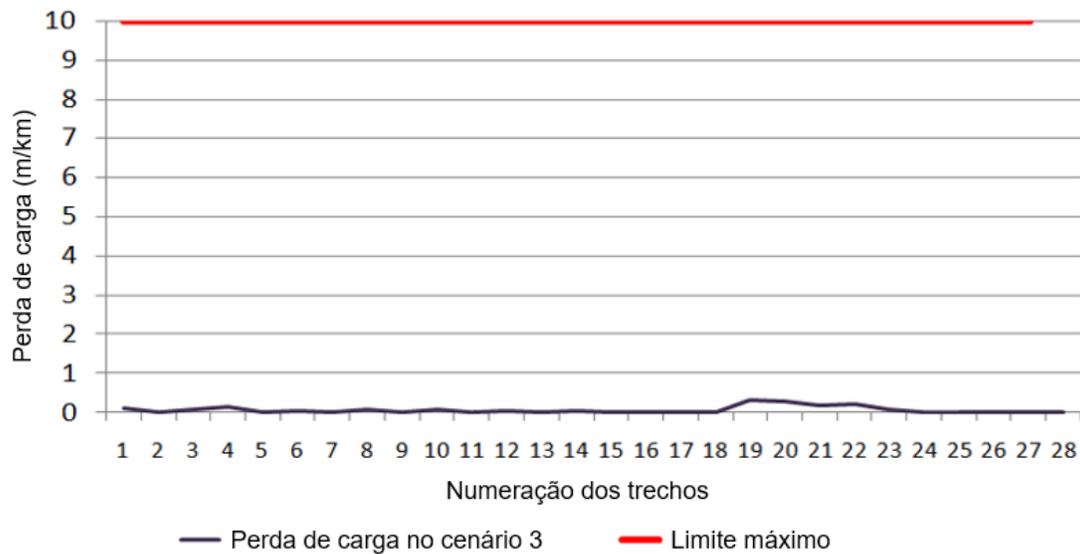


Fonte: elaboração própria, 2024.

5.3 Cenário 3

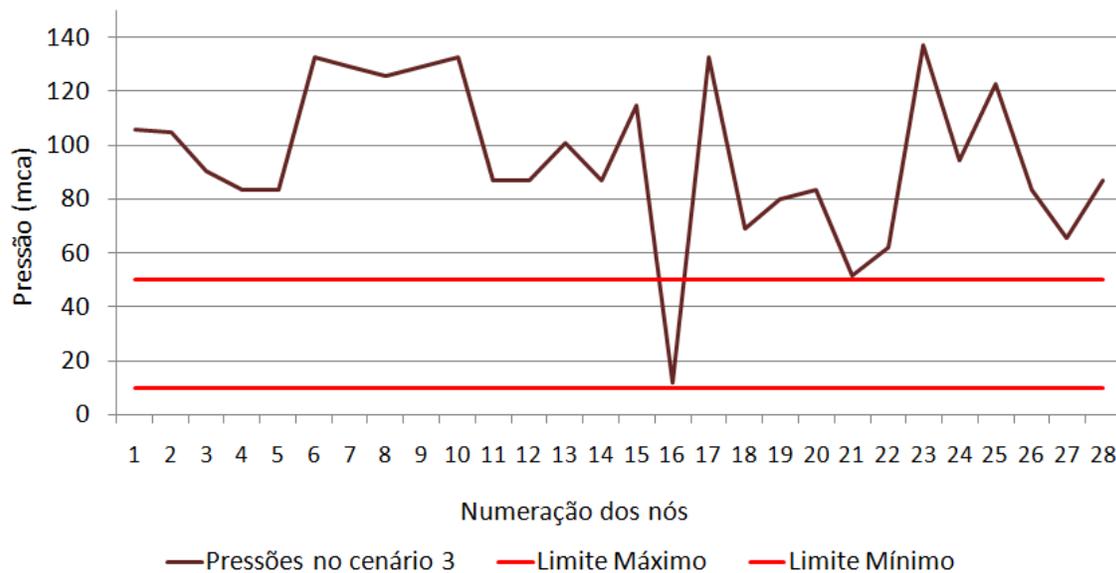
A população estimada desse cenário é de 1.100 habitantes. A vazão necessária para atender essa população é de 2,3 l/s. No cenário 3, as perdas de carga continuaram dentro do limite exigido, porém com resultados 7,5 % superiores aos do cenário 2. Já os resultados de pressão estiveram em sua maioria acima de 50 mca.

Figura 5.10: Gráfico dos valores de perda de carga em cada trecho no cenário 3.



Fonte: elaboração própria, 2024.

Figura 5.11: Gráfico dos valores de pressão em cada nó no cenário 3.



Fonte: elaboração própria, 2024.

Nesse cenário é exposto que quando a rugosidade atinge o valor de 130, ocorre um aumento de perda de carga. Conclui-se então que o valor de rugosidade em 130 possui influência considerável para o desempenho hidráulico da RDA.

Conclusão

No estudo, a construção de um modelo para avaliar os parâmetros hidráulicos pressão e perda de carga em uma RDA ao longo de 20 anos, pela associação das ferramentas EPANET 2.0 e R, demonstrou bons resultados para observação do desempenho na RDA e identificação de problemas. O EPANET 2.0 apresenta-se versátil, dinâmico e intuitivo para auxílio em situações do dia a dia e para representar qualquer tipo de layout na estrutura de RDA. O R por sua vez, proporciona um melhor tratamento estatístico dos dados e permite criar cenários variados. Portanto, são ferramentas com grande potencial para utilização em organizações e também para desenvolvimento de estudos no ambiente acadêmico, tanto pela eficiência para gerar informações técnicas quanto pela gratuidade, visto que são softwares gratuitos.

Além disso, constatou-se nesse trabalho que o aumento populacional e a redução da rugosidade são os motivos para a elevação de pressões em nós de RDA. O parâmetro perda de carga foi levemente afetado pelas modificações propostas e somente apresentou resultados consideráveis no terceiro cenário, no qual a rugosidade tinha valor 130. Os diâmetros utilizados no cenário base não suportaram atender ao consumo exigido nos anos de 2034 e 2044, portanto devem ser substituídos por diâmetros comerciais ligeiramente superiores. Dessa forma, ano de 2034 as tubulações com diâmetro de 75 mm devem ser substituídas por outras com diâmetro de 100 mm e as tubulações com diâmetro de 50 mm, por sua vez, substituídos por tubulações com diâmetro de 75 mm. No ano de 2044, deve-se dar sequência a alteração para diâmetros superiores e nesse ano, os diâmetros de 100 mm serão substituídos por tubulações de diâmetro 150 mm e as tubulações com diâmetro 75 mm substituídas por outras com diâmetro 100 mm.

Referências Bibliográficas

- Ajaz, M., & Ahmad, D. (2023). Review of water distribution system modelling by epanet 2.0 and the decision variables for optimal design. *Environmental Sciences Proceedings*, 5(10), 1-5.
- Al Qahtani, T., Yaakob, M. S., Yidris, N., Sulaiman, S., & Ahmad, K. A. (2020). *Uma revisão sobre o método de detecção de vazamento de água na rede de distribuição de água* (Vol. 68) (No. 2).
- Alsaeed, R. D., Alaji, B., & Khouri, L. (2024). Modeling chlorine residuals in urban water distribution networks (al-ashrafieh–homs). *Environmental Research Communications*.
- An, S.-l., Xiong, S.-m., Shen, X.-b., Ni, Y.-q., Chen, W., He, C.-d., & Zhou, Y.-z. (2022). The associations between exposure to trihalomethanes during pregnancy and adverse birth outcomes: a systematic review and meta-analysis. *Chemosphere*, 293, 133524.
- ANUAL, P. D. C. O. (2004). *Ministério da saúde fundação nacional de saúde*. Brasília.
- Arandia, E., & Eck, B. (2018a). An r package for epanet simulations. *Environmental modelling and software*, 107, 59-63.
- Arandia, E., & Eck, B. J. (2018b). An r package for epanet simulations. *Environmental modelling & software*, 107, 59–63.
- Ávila, C. A. M., Sánchez-Romero, F.-J., López-Jiménez, P. A., & Pérez-Sánchez, M. (2021). Leakage management and pipe system efficiency. its influence in the improvement of the efficiency indexes. *Water*, 13(14), 1909.
- Bidmus, J. e. D. K., Hamid e Chau. (2019). Rugosidade absoluta de tubos de diferentes métodos de fabricação e tratamento e impacto no projeto de dutos. In *Reunião anual do psig* (pp. PSIG–1926).
- Bizarro, I. A., García, E. Q., Barrantes, M. L., Saucedo, F. M., Caballero, O., Sanchez, H. L. J., ... Vargas, J. O. (2020). Performance between the hydraulic gradient method and the perturbation method for the analysis of water supply networks. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 9, 217–226.
- Brasil. (2004). *Manual de saneamento* (3rd ed.). Brasília: Fundação Nacional de Saúde.
- Brasil. (2006). *Boas práticas no abastecimento de água: procedimentos para a minimização*

- de riscos à saúde*. Editora Ministério da Saúde Brasília.
- Brasil. (2007). Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007. estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. cria o comitê interministerial de saneamento básico; altera as leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. [Computer software manual]. Brasília, DF. (Diário Oficial [da República Federativa do Brasil])
- Brasil. (2020). Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. [Computer software manual]. Brasília, DF. (Diário Oficial [da República Federativa do Brasil])
- Brasil. (2023). *Diagnóstico temático serviços de Água e esgoto*. SNS/MDR Brasília.
- Brkić, D. (2011). New explicit correlations for turbulent flow friction factor. *Nuclear Engineering and Design*, 241(9), 4055–4059.
- Carrijo, I. B. (2004). *Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina* (Unpublished doctoral dissertation). Universidade de São Paulo.
- Celar, L., & Cisty, M. (2016). Rirr-new open source model for the design, analysis and modelling of irrigation systems. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 3, 251-258.
- da Costa Rocha, J. (2018). *Predição do consumo de água por meio de redes neurais artificiais* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Pará, Belém.
- Dantzig, G. B., & Thapa, M. N. (1997). *Linear programming 1: Introduction*. Springer-Verlag New York.
- da Silva, H. B. (2020). *Rastreamento da água de rede de abastecimento da cidade de Guarabira-PB* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal da Paraíba, Paraíba.
- de Araujo, A. A. Q., de Lima, A. R. B., de Santana, C. F. D., Oliveira, S. H., do Nascimento, R. S., & de Oliveira, R. (2020). Desempenho de rede de abastecimento de água a partir da simulação computacional utilizando o epanet 2.0. *Brazilian Journal of Development*, 6(8), 55257-55269.
- de Azevedo Netto, J. M., & Fernández, M. (2015). *Manual de hidráulica* (9th ed.). São Paulo: Blucher.
- Deb, A., Das, S., Gupta, R., & Mukherjee, A. (2023). Water distribution system project using qgis and epanet. *Environmental Industry Letters*, 1(2), 101–110.
- de Jesus Gomes, R. (2011). *Modelação matemática como ferramenta de gestão e exploração de sistemas de distribuição de água* (Unpublished doctoral dissertation). Instituto Politecnico de Leiria (Portugal).
- de Lucena, K. F. M. (2012). Epanet-irrig: Aperfeiçoamento do epanet para aplicações em sistemas de irrigação. *Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB*(20),

- 9–21.
- de Souza, D. F., Rodrigues, S., de Lima, H. V., & Chagas, L. T. (2020). R software packages a tool for evaluating soil physical and hydraulic properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168(2), 55-71.
- Diwana, F. A., & Ogawa, S. C. C. P. (2015). *Ana lise comparativa dos modelos hidráulicos epanet, watercad e sistema ufc para sistemas de abatecimento de Água - rede de distribuição* [Monografia]. Rio de Janeiro.
- Douterelo, R. e. B. J., I e Sharpe. (2013). *Influência dos regimes hidráulicos na estrutura e composição da comunidade bacteriana em um sistema experimental de distribuição de água potável* (Vol. 47) (No. 2). Elsevier.
- Eck, B. J. (2016). An r package for reading epanet files. *Environmental modelling & software*, 84, 149–154.
- Erdei-Tombor, P., Kiskó, G., & Taczman-Brückner, A. (2024). Biofilm formation in water distribution systems. *Processes*, 12(2), 280.
- Filho, J. T. (2016). Aspectos relevantes do controle de perdas em sistemas públicos de abastecimento de água. *Revista Dae*, 64(201), 6-20.
- Freitas, C. L. d., Silva, F. d. G. B. d., 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, 31–39.
- Fritz, R. T., de Carvalho Gimenes, J., & de Pina Filho, A. C. (2020). Um estudo da automação para redução de perdas na rede de distribuição de água. *Brazilian Journal of Development*, 6(8), 56408–56416.
- García-Ávila, F., Valdiviezo-Gonzales, L., Cadme-Galabay, M., Gutiérrez-Ortega, H., Altamirano-Cárdenas, L., Zhindón-Arévalo, C., & Del Pino, L. F. (2020). Considerations on water quality and the use of chlorine in times of sars-cov-2 (covid-19) pandemic in the community. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2, 100049.
- Gil, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. Editora Atlas SA.
- Gomes, H. P. (2019). *Abastecimento de Águas*. João Pessoa – PB: LENHS/UFPB.
- Guimarães, A. J. A., Carvalho, D. d., & Silva, L. d. (2007). Saneamento básico. *Rio de Janeiro: UFRRJ*, 1–3.
- Heller, L., & de Pádua, V. L. (2010). *Abastecimento de água para consumo humano* (2nd ed.). Belo Horizonte: Editora UFMG.
- Hemdan, B. A., El-Taweel, G. E., Goswami, P., Pant, D., & Sevda, S. (2021). The role of biofilm in the development and spread of ubiquitous pathogens in drinking water distribution systems: An overview of surveillance, outbreaks, and prevention. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37, 1–18.
- Henning, E. e. a. (2016). Para além da computação estatística: o uso do ambiente r para o

- ensino de métodos numéricos. *Renote*, 14.
- Huang, Y., Zheng, F., Kapelan, Z., Savic, D., Duan, H.-F., & Zhang, Q. (2020). Localização eficiente de vazamentos em sistemas de distribuição de água usando operações de válvulas otimizadas em vários estágios e medição de demanda inteligente. *Pesquisa em Recursos Hídricos*, 56(10), 1-20.
- Ibrahim, A., Muhammad, A. Y., Ahmed, S., Engbonye, S. J., Saleh, I., & Hayatu, J. M. (2023). Assessment of water distribution network of national water resources institute mando using watercad. *ATBU Journal of Science, Technology and Education*, 10(4), 73–91.
- Ihaka, R., & Gentleman, R. (1996). R: a language for data analysis and graphics. *Journal of computational and graphical statistics*, 5(3), 299–314.
- Jawale, M. P., Kamire, M. A., & Iyer, M. V. (2022). Analysis of water distribution network using ep-anet for normal and leakage conditions and its effect on pressure. *International Journal for Research in Applied Science Engineering Technology (IJRASET)*, 10(4), 1661-168.
- Khoa Bui, X., S. Marlim, M., & Kang, D. (2020). *Particionamento da rede de água em áreas com medição distrital: uma revisão do estado da arte* (Vol. 12) (No. 4). MDPI.
- Konrath, A. C., da Silva, S. A., Henning, E., dos Santos, L. M., de Miranda, R. G., & Samohyl, R. W. (2018). Desenvolvimento de aplicativos web com r e shiny: inovações no ensino de estatística. *Abakós*, 6(2), 55-71.
- Kunwar, R., & Sapkota, H. (2022). An introduction to linear programming problems with some real-life applications. *European Journal of Mathematics and Statistics*, 3(2), 21–27.
- Kurniawan, A., Santosa, F. R. E., & Nasihien, R. D. (2021). Water pipeline network analysis using watercad software in pasuruan industrial estate rembang:(pier). *ADRI International Journal of Sciences, Engineering and Technology*, 6(01), 59–65.
- Lansey, K. E., & Awumah, K. (1994). Optimal pump operations considering pump changes. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(1), 17–35.
- Lourenço, C. A., Silva, F. d. G. B. d., Silva, A. T. Y. L., Barbedo, M. D. G., Marques, S. M., & Reis, J. A. T. d. (2024). Development of a database for water supply systems aiming for hydro energy efficiency using r and epanet. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 29, e20230143.
- Mabrok, M. A., Saad, A., Ahmed, T., & Alsayab, H. (2022). Modeling and simulations of water network distribution to assess water quality: Kuwait as a case study. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12), 11859–11877.
- MacDonald, M., Chan, L., Chung, D., Hutchins, N., & Ooi, A. (2016). Turbulent flow over transitionally rough surfaces with varying roughness densities. *Journal of Fluid Mechanics*, 804, 130–161.
- Marques, M., da Silva Junior, A. P., Marisa, M., Corrêa, R. I. L., & Zanette, F. C. (2020). Modelagem matemática aplicada em sistemas hidráulicos de abastecimento de água no

- município de belo horizonte-mg. *Revista Paramétrica*, 12(13), 790–802.
- Marques, S. M., Silva, F. d. G. B. d. e. S., Lima, A. T. Y., Barbedo, M. D. G., Marcondes, M. C., Alves, S. C. R., & Reis, J. A. T. d. (2023). Evaluation of the hydraulic behavior of the water distribution network varying levels, roughness and ceramic diameters of the reservoirs using r and epanet. *Revista Ambiente & Água*, 18, e2893.
- Mazouz, K., & Abdelraouf, B. (2021). Analysis of the simulation of the water supply network of the new city of guelma by epanet. *Pakistan Journal of Geology*, 35 - 40(1), 217–226.
- Monteiro, L., Algarvio, R., & Covas, D. (2021). Enhanced water age performance assessment in distribution networks. *Water*, 13(18), 2574.
- Muller, A., Gericke, O., & Pietersen, J. (2020). Methodological approach for building a water distribution network model using qgis and epanet. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 62(4), 32–43.
- Nash, S. G., & Sofer, A. (1996). Preconditioning of reduced matrices. *SIAM Journal on Matrix and Applications Analysis*, 17(1), 47–68.
- NBR12218 [Computer software manual]. (2017, mai.). Rio de Janeiro.
- Ociepa, E., Mrowiec, M., & Deska, I. (2019). Analysis of water losses and evaluation of initiatives aimed at reducing them in selected water supply systems. , 11(5), 1037.
- Pinnto, M. R., Castro, M. A. H. d., Barbosa, J. M. C., & Maia, J. V. F. (2016). Dimensionamento econômico otimizado de redes de distribuição de água considerando custos de manutenção. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22(01), 145–153.
- Plakidas, K., Schall, D., & Zdun, U. (2017). Evolution of the r software ecosystem: Metrics, relationships, and their impact on qualities. *Journal of Systems and Software*, 132, 119–146.
- Porto, R. D. M. (2006). *Hidraulica basica* (4^a ed.). Brasil: EESC USP.
- Pratama, H. A., & Soedjono, E. S. (2023). Evaluation of the primary pipe network at banua anyar booster pump as an effort to reduce water loss in the service area of northern banjarmasin, south kalimantan. *Science and Environmental Journal for Postgraduate*, 6(1), 259–264.
- Racine, J. (2012). Rstudio: A platform-independent ide for r and sweave. *Journal of Applied Econometrics*, 27(1), 167–172.
- Rahman, M. S., Whalen, M., & Gagnon, G. A. (2013). Adsorption of dissolved organic matter (dom) onto the synthetic iron pipe corrosion scales (goethite and magnetite): effect of ph. *Chemical engineering journal*, 234, 149–157.
- Ramos, H. M., Kuriqi, A., Besharat, M., Creaco, E., Tasca, E., Coronado-Hernández, O. E., ... Iglesias-Rey, P. (2023). Redes de água inteligentes e gêmeo digital para a gestão da eficiência do sistema em redes de distribuição de água. *Água*, 15(6), 1129.
- Rao, S. S. (2019). *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley Sons.

- Rezagama, A., Handayani, D., Zaman, B., & Putra, R. (2020). Design optimization of water distribution suburban area in mranggen, semarang, indonesia. In *Iop conference series: Earth and environmental science* (Vol. 448, p. 012066).
- Rossman, L. (2009). *Epanet 2.0 – manual do usuário*. PB, Brasil: traduzido e Adaptado por Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento.
- Salomão, G. L., da Silva, J. H., da Silva, M. J. M., & Zadorosny, L. (2023). Avaliação do impacto do crescimento populacional em um sistema de abastecimento de água. *Unifunec Científica Multidisciplinar*, 12(14), 1–18.
- Salvino, M. M., Carvalho, P. S. O. d., & Gomes, H. P. (2015). Calibração multivariada de redes de abastecimento de água via algoritmo genético multiobjetivo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 20(03), 503–512.
- Santos, F. T. (2020). Limpeza de tubulações por metodologia polly pigs para recuperação do fator c de hazen-williams. *Brazilian Journal of Development*, 6(7), 49322–49344.
- Sarker, S. (2021). Pipe network design and analysis: An example with watercad.
- Sela, L., & Housh, M. (2019). Increasing usability of water distribution analysis tools through plug-in development in epanet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(5), 02519001.
- SNIS. (2023). *Abastecimento de água*. Retrieved from <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/aba> (Acessado em 15 de dezembro de 2023)
- Sonaje, N. P., & Joshi, M. G. (2015). A review of modeling and application of water distribution networks (wdn) softwares. *International Journal of Technical Research and Applications*, 3(5), 174–178.
- Sperling, M. v., Costa, A. d., Castro, A., Barros, R., Chernicharo, C., Heller, L., & Sperling, M. (1995). Manual de saneamento e proteção ambiental para os municípios. *Belo Horizonte*, 2.
- Stanimirović, I. (2022). *Avanços em otimização e programação linear*. Apple Academic Press.
- Sutharsan, M. (2023). Optimizing the water distribution network of community water supply using different computer simulation techniques. *Journal of Science of the University of Kelaniya*, 16(1), 01–14.
- Taylor, J. B., Carrano, A. L., & Kandlikar, S. G. (2006). Characterization of the effect of surface roughness and texture on fluid flow—past, present, and future. *International journal of thermal sciences*, 45(10), 962–968.
- Tsutiya, M. T. (2006). *Abastecimento de água* (3rd ed.). São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Vicente, R. V. (2005). *Modelo de operação para centros de controle de sistemas de abastecimento de água: estudo de caso-sistema adutor metropolitano de são paulo*. (Unpublished doctoral dissertation). Universidade de São Paulo.



- Villanueva, C. M., Gracia-Lavedan, E., Bosetti, C., Righi, E., Molina, A. J., Martín, V., . . . others (2017). Colorectal cancer and long-term exposure to trihalomethanes in drinking water: a multicenter case–control study in Spain and Italy. *Environmental health perspectives*, 125(1), 56–65.
- White, F. M. (2018). *Mecânica dos fluidos*. McGraw Hill Brasil.
- Widiarti, W. Y., Wahyuni, S., Wiyono, R. U. A., Hidayah, E., Halik, G., & Sisinggih, D. (2020). Evaluation of pipe network distribution system using epanet 2.0 (a case study of the city of Jember). In *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 437, p. 012043).
- Zuthi, M., Khan, F., Sajol, M. S., Kabir, M., Kaiser, N., Rahman, M., & Hasan, S. (2023). Combined application of epanet and empirical model for possible formation of trihalomethanes in water distribution network of Chattogram city to identify potential carcinogenic health risk zone. *Heliyon*, 9(6).

Algoritmo 1 utilizado Código para interação entre R e EPANET

função simulação de rugosidade

entrada: *epanet2toolkit*, *epanetReader*, *magrittr*, *ggplot2* {carrega biblioteca}

```
1: {definir semete para gerar números aleatórios}
2: {definir parâmetros (coeficiente de rugosidade, diâmetro, perda de carga e vazão)}
3: para cada  $i \leftarrow 1$  até  $j$  faça
4:   {calcula a perda de carga}
5: fim para
6: {Definir diretório de trabalho}
7: ENepanet("arquivo.inp", "arquivo.rpt")
8: read {Leitura dos arquivos .inp e .rpt}
9: summary e plot {Resumo e visualização dos dados}
10: ENgetcount("ENNODECOUNT") {obter valores de pressão nos nós}
11: ENgetcount("ENLINKCOUNT") {obter valores de pressão nos trechos}
12: {definir 1000 (mil) pontos para matriz de resultados}
13: pressaoReferencia < apply(1 : numNo, function(node_id), times <-
    ENgetnodevalue(node_id, EN_PRESSURE))
14: tabCenario <- matrix(runif(numTubulacao * numTeste, min <- 100, max <- 150), nrow <- numTeste) {matriz
    de cenários}
15: pressaoCenario <- matrix(0, nrow <- numTeste * numNo, ncol <- numNo) {matriz com resultados de pressão de
    cenário conforme aumento da rugosidade}
16: para  $y \leftarrow 1$  até  $\beta$  faça
17:   {calcula valores de rugosidade}
18:   ENsetlinkvalue {definir valores de rugosidade}
19:   para  $z \leftarrow 1$  até  $\delta$  faça
20:     {matriz com reavaliação da pressão conforme as novas perdas de carga geradas pela variação da rugosidade}
21:   fim para
22:   {obter valores de erros absolutos nos nós}
23:   {obter valores de erros absolutos nos cenários}
24:   {obter valores de índice de cenário ótimo}
25:   {obter valores de cenários}
26:   ENclose {execução fechamento da conexão com o EPANET}
27:   {grava valores de cenários}
28:   {grava valores das pressões do cenários}
fim função
```
