



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FERNANDO ANTONIO DE CASTELO BRANCO E RAMOS FILHO

AVALIAÇÃO DAS PERDAS DE ÁGUA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM
APOIO DA MODELAGEM HIDRÁULICA: ESTUDO DE CASO NO DISTRITO DE
VAZANTES, ARACOIABA-CE

FORTALEZA

2026

FERNANDO ANTONIO DE CASTELO BRANCO E RAMOS FILHO

AVALIAÇÃO DAS PERDAS DE ÁGUA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM APOIO
DA MODELAGEM HIDRÁULICA: ESTUDO DE CASO NO DISTRITO DE VAZANTES,
ARACOIABA-CE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Hidráulica e
Ambiental da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- R143a Ramos Filho, Fernando Antonio de Castelo Branco e.
Avaliação das perdas de água em redes de distribuição com apoio da modelagem hidráulica : estudo de caso no distrito de Vazantes, Aracoiaba-CE / Fernando Antonio de Castelo Branco e Ramos Filho. – 2026. 99 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.
1. Abastecimento de água. 2. Perdas hídricas. 3. Simulação hidráulica. 4. EPANET. 5. Válvula redutora de pressão. I. Título.

CDD 620

FERNANDO ANTONIO DE CASTELO BRANCO E RAMOS FILHO

AVALIAÇÃO DAS PERDAS DE ÁGUA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM APOIO
DA MODELAGEM HIDRÁULICA: ESTUDO DE CASO NO DISTRITO DE VAZANTES,
ARACOIABA-CE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Hidráulica e
Ambiental da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil

Aprovada em: 13/01/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Carlos Alves Barroso Junior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Engenheiro Civil Régis Silva Cardoso
(CAGECE)

À Deus.

Aos meus pais, Fernando e Glória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela vida, saúde, força e sabedoria concedidas durante toda esta caminhada, iluminando meu caminho e me dando coragem para superar os desafios.

Aos meus pais, Fernando e Glória, pelo amor incondicional, incentivo constante, apoio e investimentos durante todo o meu ciclo educacional até aqui. À minha irmã Maria Fernanda, que por muitos anos compartilhou comigo a rotina de estudos, e aos meus tios, tias, primos e primas, pela influência e conselhos que tanto contribuíram para minha formação.

À minha namorada Catarina, pelo carinho, paciência e companheirismo em todos os momentos. À Didi, pelo cuidado e dedicação, sempre me acompanhando e buscando na escola durante tanto tempo.

Ao meu orientador, professor Iran, por todo o apoio e orientação na pesquisa, por lapidar minhas ideias, sugerir novas referências, corrigir equívocos e esclarecer dúvidas fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao engenheiro Régis Cardoso, que foi essencial para a escolha e desenvolvimento do tema, transmitindo conhecimentos valiosos sobre modelagem hidráulica e indicando bibliografias fundamentais. Ao meu coordenador na CAGECE, Jorge Fernandes, pelo apoio e incentivo que possibilitaram o amadurecimento deste estudo.

Aos engenheiros Ronaldo, Cláudio, Dylson Junyer, Messias e Guilherme, bem como às arquitetas Manuela e Emiliana, da Prefeitura Municipal de Fortaleza; à engenheira Beatriz Tote, da Moura Dubeux; e ao engenheiro Matheus Pinheiro, da NP & P Engenharia, pelos conhecimentos compartilhados durante meus estágios e pela significativa contribuição para minha formação profissional.

Ao professor Heber, pelos ensinamentos transmitidos em todas as disciplinas cursadas e pela disponibilidade em acompanhar meus estágios.

Por fim, agradeço aos amigos e colegas de curso e de estágio pelo apoio, pelas trocas de conhecimento e pela alegria compartilhada no dia a dia acadêmico, com um agradecimento especial a Letícia Sales, Caio Karbage e Hadassa, que estiveram presentes de forma mais próxima ao longo dessa trajetória.

RESUMO

O distrito de Vazantes, localizado no município de Aracoiaba-CE, apresenta índices elevados de perdas de água no sistema de abastecimento, com valores significativamente acima dos patamares considerados aceitáveis para sistemas urbanos. Esse cenário compromete a eficiência operacional, a sustentabilidade do serviço e o uso racional dos recursos hídricos, configurando-se como um problema relevante do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. O presente trabalho tem como objetivo analisar o sistema de abastecimento de água do distrito de Vazantes, em Aracoiaba-CE, diagnosticando as principais causas de perdas e propondo soluções para mitigá-las. A pesquisa foi estruturada a partir da coleta de dados fornecidos pela CAGECE, incluindo informações sobre cadastro de tubulações, consumo micromedido, idade dos hidrômetros, registros de vazamentos e ensaios de medição de pressões e vazões in loco. Para a análise, foi utilizado o software EPANET, que possibilitou a modelagem e simulação hidráulica da rede, considerando dados topográficos, padrões de consumo e pressões medidas em campo. Os resultados obtidos evidenciaram que o distrito apresenta perdas totais próximas a 70% do volume distribuído, sendo atribuídas tanto a perdas aparentes, decorrentes de falhas cadastrais, fraudes e hidrômetros antigos, quanto a perdas reais, principalmente relacionadas à ocorrência frequente de vazamentos. A simulação hidráulica demonstrou a presença de trechos com pressões acima dos limites recomendados pela norma ABNT NBR 12218, especialmente na entrada da zona urbana e na região norte, que coincidem com os pontos de maior incidência de vazamentos. Como propostas de solução, foram destacadas medidas para redução de perdas aparentes, como a renovação dos hidrômetros e a atualização cadastral, bem como a investigação de possíveis ligações clandestinas. Para o controle das perdas reais, foi sugerida a instalação de válvulas redutoras de pressão (VRP) em pontos críticos da rede, além da consideração da utilização de Pump as Turbines (PAT) como alternativa sustentável, com potencial de geração de energia elétrica. Conclui-se que, apesar das limitações, o estudo alcançou seu objetivo de diagnosticar os principais fatores que influenciam as perdas de água no distrito e indicar soluções técnicas para sua mitigação, servindo como subsídio para futuras ações de melhoria do sistema de abastecimento local.

Palavras-chave: abastecimento de água; perdas hídricas; simulação hidráulica; EPANET; válvula redutora de pressão.

ABSTRACT

The district of Vazantes, located in the municipality of Aracoiaba–CE, presents high levels of water losses in its water supply system, with values significantly above those considered acceptable for urban systems. This scenario compromises operational efficiency, service sustainability, and the rational use of water resources, constituting a relevant problem from technical, economic, and environmental perspectives. This study aims to analyze the water supply system of the district of Vazantes, in Aracoiaba–CE, by diagnosing the main causes of water losses and proposing solutions for their mitigation. The research was structured based on data collection provided by CAGECE, including information on pipeline registration, micro-metered consumption, water meter age, leakage records, and in situ pressure and flow measurement tests. For the analysis, the EPANET software was used, enabling the hydraulic modeling and simulation of the network, considering topographic data, consumption patterns, and pressures measured in the field. The results indicated that the district presents total water losses close to 70% of the distributed volume, attributed to both apparent losses—resulting from registration failures, fraud, and aged water meters—and real losses, mainly related to the frequent occurrence of leaks. The hydraulic simulation demonstrated the presence of sections with pressures above the limits recommended by ABNT NBR 12218, especially at the entrance of the urban area and in the northern region of the district, which coincide with the areas with the highest incidence of leaks. As proposed solutions, measures to reduce apparent losses were highlighted, such as the replacement of old water meters and the updating of technical and operational records, as well as the investigation of possible illegal connections. To control real losses, the installation of pressure reducing valves (PRVs) at critical points in the network was suggested, in addition to considering the use of Pumps as Turbines (PATs) as a sustainable alternative with potential for electric power generation. It is concluded that, despite its limitations, this study achieved its objective of diagnosing the main factors influencing water losses in the district and indicating technical solutions for their mitigation, serving as a basis for future actions to improve the local water supply system.

Keywords: water supply; water losses; hydraulic simulation; EPANET; pressure reducing valve.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Partes gerais de um sistema de abastecimento de água.....	20
Figura 2 – Tipos de associação de bombas	23
Figura 3 – Reservatório de posição intermediária	25
Figura 4 – Croqui da Estação de Tratamento de Gramame em João Pessoa.....	26
Figura 5 – Tipos de rede de distribuição	28
Figura 6 – Parcelas das perdas de água (reais e aparentes) em relação ao volume que entra no sistema	30
Figura 7 - Origens e magnitudes das perdas físicas	32
Figura 8 – Tipologia dos vazamentos.....	33
Figura 9 - Causas Prováveis de Falhas e Rupturas em Tubulações.....	34
Figura 10 – Valores usuais de C	43
Figura 11 – Interface inicial do programa	45
Figura 12 – exemplo de traçado de rede.....	46
Figura 13 - Fluxograma de etapas	48
Figura 14 – Aracoiaba - CE (cor laranja)	49
Figura 15 – localização do distrito de Vazantes	50
Figura 16 – Esquema de distribuição de água em Vazantes.....	51
Figura 17 – Modelo de Datalogger utilizado na aferição da pressão.	55
Figura 18 – Cadastro operacional da CAGECE em Vazantes-CE	59
Figura 19 – Mapa termal de vazamentos registrados entre janeiro de 2024 e outubro de 2024	64
Figura 20 – Mapa termal de vazamentos registrados entre outubro de 2024 e maio de 2025 ..	64
Figura 21 – Ampliação do mapa termal de vazamentos registrados entre outubro de 2024 e maio de 2025	65
Figura 22 – Pontos de instalação para medição de vazão.....	66
Figura 23 – Divisão de áreas de consumos micromedidos.....	66
Figura 24 – Mapa de auxílio para transcrição no EPANET	69
Figura 25 – Mapa do sistema no EPANET fora de escala	70
Figura 26 – Coordenadas do marcador central.....	70
Figura 27 – Inserção das coordenadas das extremidades da imagem de fundo no EPANET ..	71
Figura 28 – Imagem de fundo em escala	72
Figura 29 – Transcrição do sistema com auxílio da imagem de fundo	73

Figura 30 – By pass no reservatório desativado	73
Figura 31 – Inserção dos consumos no Bloco de Notas	76
Figura 32 – Quadrante com as informações altimétricas no TOPODATA.....	77
Figura 33 – Inserção das coordenadas do EPANET sobre a camada raster no Qgis	77
Figura 34 – Coluna com os dados de elevação no arquivo texto do EPANET.	78
Figura 35 – Exemplo de nó com sua respectiva informação altimétrica.....	79
Figura 36 – Ensaio de pressão realizado na entrada da adutora de Vazantes.....	80
Figura 37 – Cota do nível d’água no reservatório do modelo	81
Figura 38 – Padrão de consumo do modelo	82
Figura 39 – Simulação Hidráulica às 0 horas com os consumos micromedidos.....	83
Figura 40 – Simulação Hidráulica às 12 horas com os consumos micromedidos ampliada. ...	84
Figura 41 – Simulação Hidráulica às 12 horas com os consumos micromedidos ampliada, região superior	84
Figura 42 – Inserção do Coeficiente do emissor 1	86
Figura 43 – Inserção do Coeficiente do emissor 2	86
Figura 44 – Simulação com os consumos desconhecidos adicionados	87
Figura 45 – Comparação entre o mapa de vazamentos entre janeiro e outubro de 2024 com a simulação da rede	88
Figura 46 – Comparação entre o mapa de vazamentos entre outubro de 2024 e maio de 2025 com a simulação da rede.....	89
Figura 47 – Instalação de uma válvula redutora de pressão na entrada da área urbana de Vazantes.....	90
Figura 48 – Simulação com a instalação da Válvula redutora de pressão.....	91
Figura 49 – Área com alteração de diâmetro para 40 mm	92
Figura 50 – Resultado da simulação com diminuição do diâmetro.....	93
Figura 51 – Resultado da simulação com diminuição do diâmetro reduzida	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores de K para cada acessório	44
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de economias e consumos registrados em Vazantes entre outubro de 2024 e março de 2025.....	60
Tabela 2 – Média de vazões aferidas nos três medidores.....	67
Tabela 3 – Consumos nodais.....	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Percentual de perdas na distribuição SNIS (2023).....	16
Gráfico 2 – Índice de perdas mensais na distribuição em Vazantes em 2024.....	17
Gráfico 3 – Quantidade de Vazamentos em Vazantes	63
Gráfico 4 – Vazões distribuídas entre o ponto 2 e o ponto 3 de aferição	68
Gráfico 5 – Vazões distribuídas após o ponto 3 de aferição	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos.....	18
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>18</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>18</i>
1.2	Estrutura do trabalho	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	Componentes do Sistema de abastecimento de água.	20
<i>2.1.1</i>	<i>Manancial.....</i>	<i>21</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Estruturas de captação de água.....</i>	<i>21</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Adução</i>	<i>22</i>
<i>2.1.4</i>	<i>Estações elevatórias.....</i>	<i>22</i>
<i>2.1.5</i>	<i>Reservatórios.....</i>	<i>24</i>
<i>2.1.6</i>	<i>Estação de Tratamento de água.....</i>	<i>25</i>
<i>2.1.7</i>	<i>Rede de Distribuição de água.....</i>	<i>26</i>
2.2	Perdas	29
<i>2.2.1</i>	<i>Tipologia das Perdas</i>	<i>29</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Perdas Aparentes.....</i>	<i>31</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Perdas físicas</i>	<i>32</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Boas práticas para redução de perdas</i>	<i>34</i>
2.3	Hidráulica de redes	36
<i>2.3.1</i>	<i>População de projeto.....</i>	<i>36</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Consumo</i>	<i>38</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Vazão de distribuição</i>	<i>39</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Princípios de conservação de massa e energia.....</i>	<i>39</i>
<i>2.3.5</i>	<i>Perdas de carga.....</i>	<i>41</i>
<i>2.3.6</i>	<i>Epanet.....</i>	<i>44</i>

3	METODOLOGIA	47
3.1	Caracterização do setor	48
3.2	Coleta de dados.....	51
3.3	Comprovação de perdas	52
3.4	Modelagem da rede	53
3.5	Simulação da rede	56
3.6	Soluções	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	Análise dos dados obtidos	59
<i>4.1.1</i>	<i>Cadastro e consumos.....</i>	<i>59</i>
<i>4.1.2</i>	<i>Idade das tubulações e hidrômetros</i>	<i>62</i>
<i>4.1.3</i>	<i>Vazamentos.....</i>	<i>63</i>
4.2	Comprovação das perdas in loco	65
4.3	Modelagem da rede	69
<i>4.3.1</i>	<i>Desenho do sistema no EPANET</i>	<i>69</i>
<i>4.3.2</i>	<i>Inserção dos consumos.....</i>	<i>74</i>
<i>4.3.3</i>	<i>Cotas topográficas</i>	<i>76</i>
<i>4.3.4</i>	<i>Ajuste do nível d'água no reservatório fictício.....</i>	<i>79</i>
<i>4.3.5</i>	<i>Padrão de consumo</i>	<i>81</i>
4.4	Simulação da rede	82
4.5	Propostas de solução	89
5	CONCLUSÃO	96
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

O abastecimento de água desempenha um papel fundamental no bem-estar da população e no desenvolvimento urbano, sendo responsável por fornecer água potável de forma contínua e segura. No entanto, esse sistema enfrenta diversos desafios, especialmente relacionados às perdas de água nas redes de distribuição, representando um obstáculo tanto para a eficiência operacional quanto para a gestão sustentável dos recursos hídricos. Diante desse contexto, cresce a necessidade de se compreender a importância da redução das perdas e de se adotar práticas voltadas à melhoria do desempenho das redes. A otimização, o monitoramento e a manutenção adequada da infraestrutura de distribuição surgem, assim, como elementos centrais na busca por sistemas de abastecimento mais eficientes e resilientes.

Nessa perspectiva, estruturas de captação, estações de Tratamento, adutoras, estações elevatórias, reservatórios e as redes de distribuição, são alguns dos principais elementos contidos em um sistema de distribuição de água, descritos por Gomes (2019), responsáveis pela captação, tratamento e transporte até a chegada da água no consumidor final. Do ponto de vista de projeto, diversos fatores devem ser cuidadosamente considerados na concepção e operação de uma rede de distribuição de água. Entre eles, destacam-se o estudo das vazões necessárias para o atendimento à demanda, a definição do traçado mais adequado conforme a topografia local, as perdas de carga inerentes ao sistema, sejam elas distribuídas ou localizadas, a escolha dos materiais, dimensões e acessórios das tubulações, bem como o dimensionamento da potência das estações elevatórias. Além disso, é fundamental garantir o cumprimento das normas técnicas vigentes, com especial atenção ao controle das pressões hidráulicas ao longo da rede, de forma a assegurar a eficiência, segurança e durabilidade do sistema.

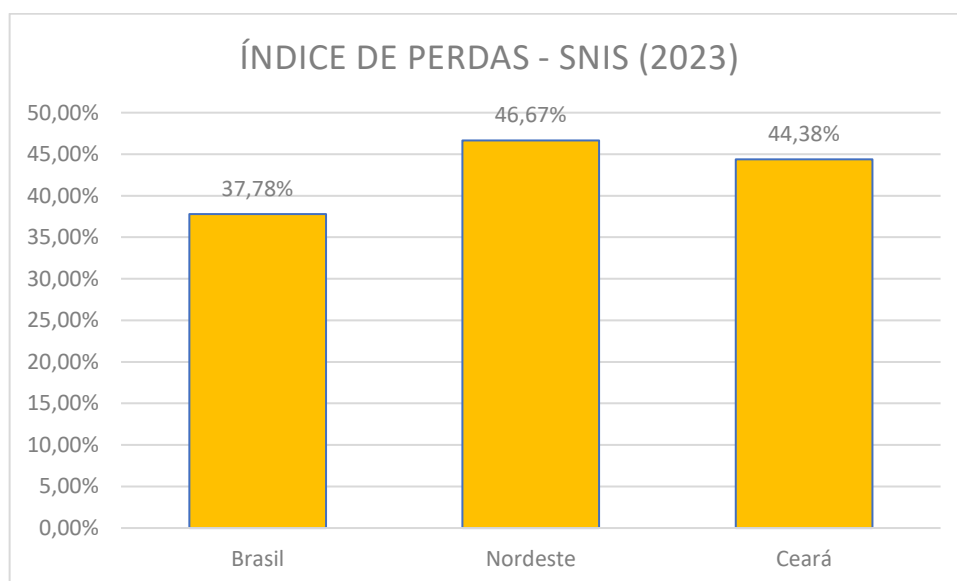
Sob essa ótica, dentre os principais desafios enfrentados pelas companhias de saneamento na gestão do abastecimento, que resultam, sobretudo, em desperdícios de água, reduções nas receitas e comprometimento da qualidade do serviço estão as perdas de água. Divididas pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES (2015) entre perdas reais (físicas) que são relacionadas, sobretudo, a vazamentos, pressões inadequadas, ou tubulações envelhecidas ou mal conservadas e Perdas Aparentes (não físicas) geralmente associadas a fraudes, ligações clandestinas ou falhas na medição, que impedem o correto faturamento da água distribuída, mesmo quando ela é efetivamente utilizada.

Destaca-se, nesse sentido, a relevância da implantação e manutenção dos sistemas de macromedição e micromedição, essenciais para a quantificação precisa das perdas. A

macromedicação controla os volumes produzidos e distribuídos, enquanto a micromedicação registra o consumo individual dos usuários. A comparação entre esses dados permite identificar inconsistências e delimitar áreas com maiores perdas, orientando decisões técnicas mais eficazes e estratégias de controle mais eficientes.

Com o objetivo de dimensionar a magnitude das perdas nos sistemas de distribuição de água, observa-se que, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (2023), o índice de perdas totais, que engloba tanto as perdas reais quanto as aparentes, no Brasil foi de 37,78% em relação ao volume total de água distribuída. Esse cenário torna-se ainda mais preocupante quando se analisa especificamente o estado do Ceará, onde o percentual de perdas reais foi de 44,38% se mostra superior à média nacional, conforme apontado no mesmo levantamento.

Gráfico 1 - Percentual de perdas na distribuição SNIS (2023)



Fonte: SNIS (2023).

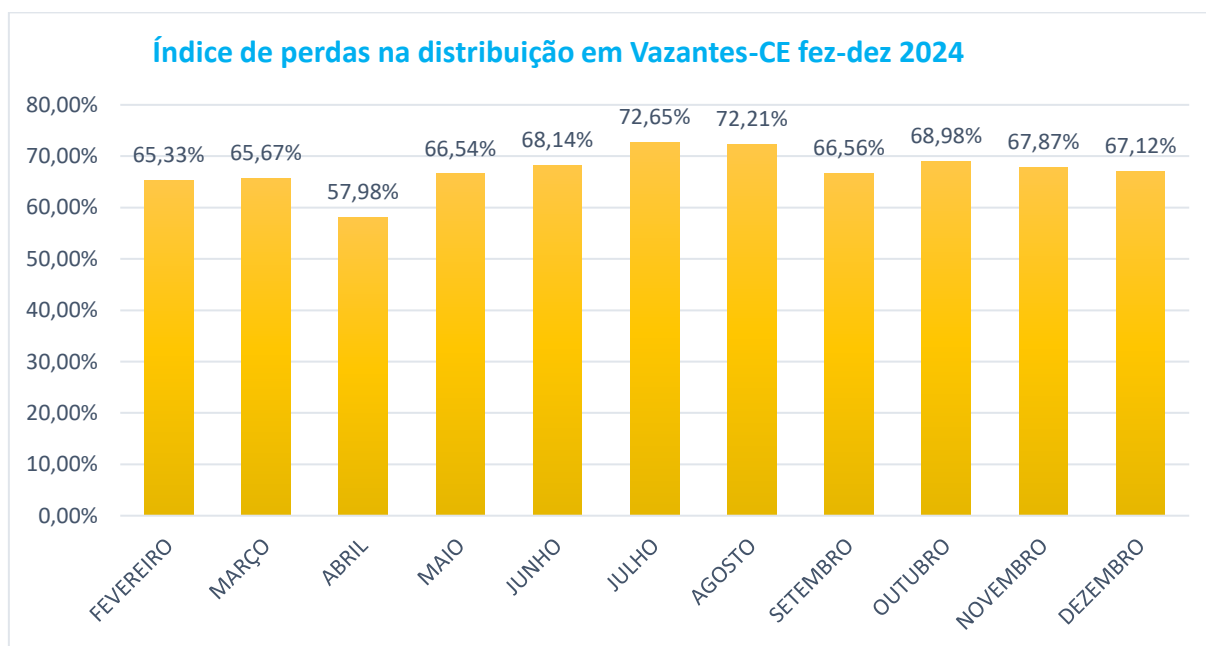
A elevada taxa de perdas nos sistemas de abastecimento de água, tanto em âmbito nacional quanto regional, representa um sério desafio para a sustentabilidade hídrica e para a eficiência da gestão dos recursos. O desperdício de quase 45% da água distribuída no estado evidencia não apenas deficiências estruturais e operacionais, mas também a necessidade de ações estratégicas, um planejamento mais rigoroso e investimentos contínuos em manutenção preventiva e controle operacional.

Nesse cenário, sendo responsável pela prestação dos serviços de abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto para quase 83% dos municípios do estado do Ceará, incluindo a capital Fortaleza, a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) é a principal

empresa de saneamento do estado e responsável direta pelo monitoramento, controle e soluções de perdas em sistemas de abastecimento de seus municípios de atuação.

Entre os municípios sob a gerência da CAGECE, destaca-se o caso do município de Aracoiaba, com ênfase no distrito de Vazantes, onde se observa o seguinte cenário relacionado às perdas no sistema de abastecimento de água.

Gráfico 2 – Índice de perdas mensais na distribuição em Vazantes em 2024



Fonte: Adaptado pelo autor (CAGECE, 2024).

Com média mensal de 67,19% entre fevereiro e dezembro de 2024, o distrito de Vazantes ilustra uma das maiores perdas registradas pela Companhia de Saneamento dentre todos os seus municípios atendidos.

Nesse contexto, Diante do problema apresentado, torna-se essencial a adoção de medidas que envolvam a validação e veracidade dos dados disponíveis, bem como a realização de investigações aprofundadas sobre os padrões de consumo, a idade das tubulações, a ocorrência e localização de vazamentos e a distribuição de pressões ao longo da rede. Para isso, a utilização de ferramentas de modelagem hidráulica, como o software EPANET, é de grande importância, pois permite simular o comportamento do sistema em diferentes condições operacionais. Essa abordagem possibilitará uma compreensão mais clara da origem e do tipo de perdas que estão ocorrendo, contribuindo para a formulação de propostas de otimização mais eficazes e direcionadas à redução dessas perdas e à melhoria do desempenho do sistema de abastecimento de água.

Dessa forma, inserido nesse contexto, este trabalho tem como premissa a compreensão da origem das perdas no sistema de abastecimento de água do distrito de Vazantes, a partir da investigação dos principais fatores e hipóteses que contribuem para o elevado índice de perdas observadas na região. Além disso, a partir dessa análise, propostas de soluções técnicas e operacionais serão recomendadas visando a redução no índice de águas perdidas no distrito.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Identificar e analisar as prováveis causas de perdas de água no distrito de Vazantes, em Aracoiaba, com o auxílio da modelagem e simulação do sistema de distribuição de água, utilizando o software EPANET, com o intuito de realizar um diagnóstico e avaliar possíveis soluções para a redução das perdas na região.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Comprovar por medição in loco o cenário de perdas apresentado pela CAGECE;
- b) Obter os dados cadastrais da rede com inscrições e consumos junto à CAGECE;
- c) Obter a idade das instalações das tubulações e hidrômetros em Vazantes junto à CAGECE;
- d) Obter o número e mapeamento dos vazamentos registrados em Vazantes junto à CAGECE;
- e) Obter informações do relevo e topografia para simulação no EPANET por meio do TOPODATA e QGIS;
- f) Simular o modelo criado para visualização do funcionamento da rede em períodos de tempo distintos;
- g) Diagnosticar problemas de pressão pela comparação dos dados simulados com os limites estabelecidos nas Normas;
- h) Identificar os pontos críticos para a ocorrência de perdas;
- i) Comparar os resultados do modelo com o mapa de ocorrência de vazamentos para validação ou não do método.

- j) Comparar as pressões simuladas com as medidas in loco para validação ou não do modelo.
- k) Propor nova formatação da rede para resolução do problema diagnosticado, caso exista.

1.2 Estrutura do trabalho

No capítulo 1, é feita uma introdução ao tema, contextualizando a importância de um abastecimento de água eficiente, fatores hidráulicos importantes, assim como a problemática das perdas de água, convergindo para o caso particular de Vazantes, onde foi descrita a fundamental importância da simulação e modelagem para auxílio na tomada de decisão e os objetivos do trabalho.

Em seguida, o capítulo 2 traz um completo referencial teórico no estudo da distribuição de água, onde os componentes, perdas, conceitos básicos de hidráulica e o software de simulação são descritos.

No capítulo 3 todas as premissas e desenvolvimento do trabalho estão descritas, assim como o método de estudo, a sequência de informações obtidas e as decisões tomadas na construção da pesquisa.

Os resultados, diagnósticos e recomendações são ilustrados no capítulo 4, onde são mostrados os produtos de toda metodologia e os fatores provados ou não na pesquisa para ocorra uma discussão para soluções da problemática apresentada.

A conclusão é feita no capítulo 5, revisitando os principais resultados e o alcance ou não dos objetivos traçados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

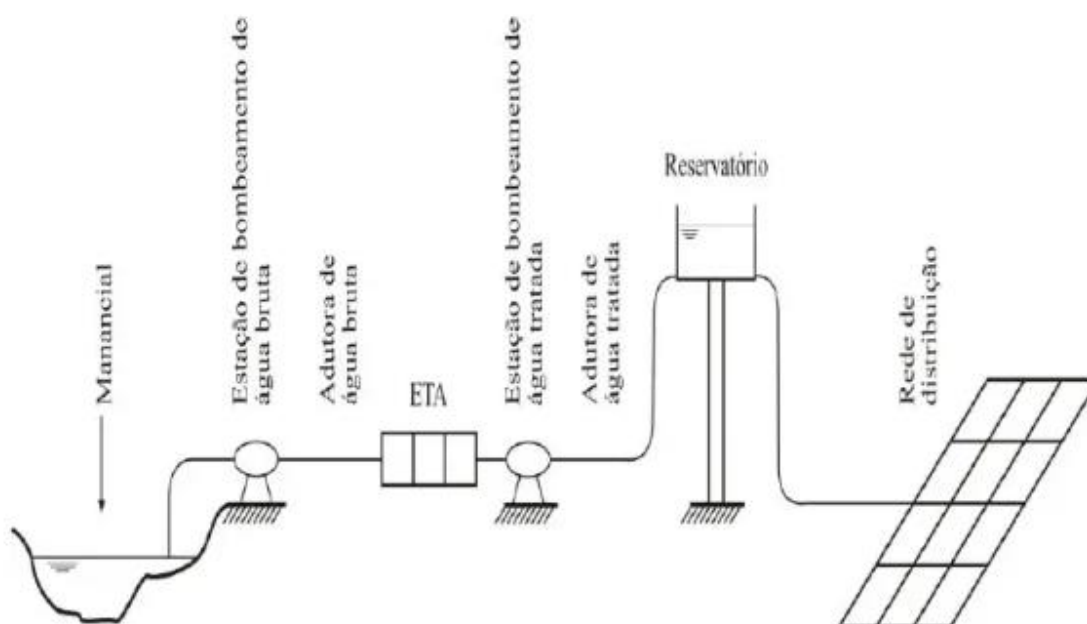
2.1 Componentes do Sistema de abastecimento de água.

Para Gomes (2019, p. 12), “os sistemas de abastecimento de água são estruturas de engenharia necessárias para distribuir água potável para as populações a serem atendidas em zonas urbanas e rurais”. Segundo o autor, em geral, um projeto de distribuição é composto dos seguintes componentes:

- a) Mananciais
- b) Estruturas de captação de água
- c) Estruturas de bombeamento
- d) Adutoras
- e) Estações de tratamento (ETAs)
- f) Reservatórios
- g) Redes de tubulações de distribuição
- h) Ligações prediais.

Os componentes citados, estão ilustrados na figura 1, seguidos por um detalhamento das principais unidades.

Figura 1 – Partes gerais de um sistema de abastecimento de água



Fonte: Gomes (2019).

2.1.1 Manancial

Entende-se como manancial, a fonte de água bruta para posterior distribuição no sistema. Podem ser classificados como superficiais, onde a fonte de água é proveniente de um rio, córrego, açude ou lago, por exemplo, ou subterrâneo, exemplificados por aquíferos subterrâneos.

Para Barreira (2017, p. 21), “a quantidade e qualidade da água presente nos mananciais e sua posição topográfica são de extrema importância para os sistemas de abastecimento, podendo representar custos maiores ou menores de captação, tratamento e transporte”. Dessa forma, o estudo da hidrologia e da bacia hidrográfica da região, para posterior escolha e preservação adequada desses mananciais são fundamentais para garantir a eficiência operacional, a segurança hídrica e a redução de impactos ambientais e econômicos ao longo do tempo.

2.1.2 Estruturas de captação de água

Segundo Heller (2010, p. 74), “consiste em uma estrutura responsável pela extração de água do manancial, a fim de torná-la disponível para seu transporte para os locais de utilização”. Para o autor, um projeto eficiente de uma estrutura de captação necessita, sobretudo, de estudos sobre a possibilidade de variações sazonais de vazão, assim como as possíveis intempéries do curso d’água.

De acordo com norma ABNT NBR 12213 (1992), a definição do local para implantação das obras de captação deve resultar de uma avaliação integrada de todas as informações disponíveis sobre a área destinada a essa finalidade. Essa avaliação deve ser complementada por inspeções no local, levando em consideração principalmente as características hidráulicas do manancial, a geologia da região, a presença de áreas sujeitas a inundação e os possíveis focos de poluição.

Dessa forma, é fundamental que o sistema de captação seja planejado considerando não apenas a disponibilidade imediata da água, mas também as condições hidrológicas ao longo do tempo, garantindo a continuidade do abastecimento mesmo em períodos de estiagem ou cheias, sendo sugerido, comumente em regiões secas, a possibilidade de alternância de mananciais explorados.

2.1.3 Adução

Segundo a norma ABNT NBR 12213 (2017, p. 1), uma adutora consiste em “tubulação destinada a transportar água entre unidades operacionais do sistema, pode funcionar por gravidade, recalque ou ambos, com ou sem derivação para mais de uma unidade operacional”. Nesse contexto, a partir da característica do projeto e de seus demais sistemas, a adução de água, pode ocorrer nas seguintes condições:

- a) Em conduto forçado: em que, de acordo com a NBR 12213 (2017, p. 2), “o fluido ocupa totalmente a seção de escoamento, com pressão diferente da atmosférica”
Após uma estação elevatória, por exemplo;
- b) Em conduto livre: onde o fluido não preenche toda a seção do escoamento e a pressão atuante no seu transporte é a mesma da atmosfera;
- c) No transporte de água bruta: a montante da captação nos mananciais, por exemplo, onde a água transportada ainda não recebeu seu devido tratamento para consumo ou uso humano;
- d) No transporte de água tratada: geralmente, a jusante das estações de tratamento de água, onde a água já recebeu um tratamento para sua posterior distribuição.

2.1.4 Estações elevatórias

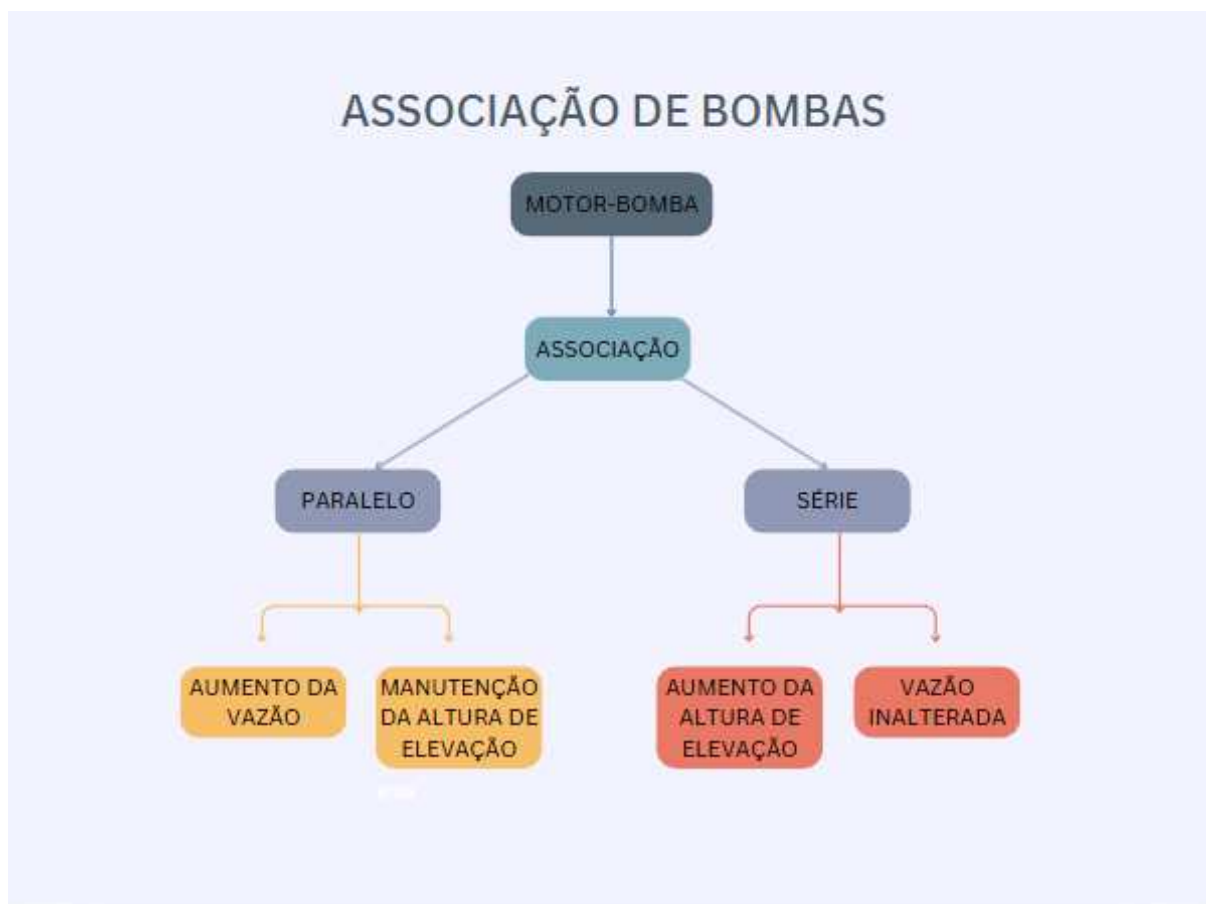
Quando a força da gravidade não é suficiente para permitir o escoamento natural da água, seja por fatores topográficos ou por grandes perdas de carga no sistema e, além disso, há a necessidade de transportar a água para um ponto mais alto ou com maior pressão e vazão, torna-se necessária a instalação de uma estação elevatória, a fim de garantir o escoamento ou o abastecimento adequado.

Para Porto (2006), uma estação elevatória ou sistema de recalque, é composto por três principais componentes:

- a) Tubulação de sucção: que é constituída pela canalização a montante do conjunto motor-bomba, ligando o ponto inferior até o sistema elevatório, em conjunto com seus diversos elementos, como curvas, junções, reduções, por exemplo;
- b) Tubulação de recalque: constituída pela canalização a jusante do conjunto motor-bomba, conduz, em conduto forçado a água bombeada até o ponto de maior altura;

- c) Conjunto elevatório – Constituído por uma ou mais bombas com seus respectivos motores capazes de promover a elevação da água. Segundo o autor, ainda é possível aplicar uma associação de duas ou mais bombas no sistema, no intuito de garantir as seguintes características ao sistema:

Figura 2 – Tipos de associação de bombas



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Para Barreira (2017), as bombas podem ser divididas em três tipos, conforme a posição de seu eixo em relação à água: aquelas com eixo fora da água, localizadas acima do nível do poço; aquelas com eixo abaixo do nível do poço, sem que a bomba esteja totalmente submersa; e as bombas submersas, que operam completamente debaixo d'água.

Nesse contexto, para o correto dimensionamento de um sistema elevatório, as características e necessidades específicas de cada local devem ser estudados para se adotar a correta associação de bombas. Nessa perspectiva, um dos principais fatores para o correto dimensionamento de uma estação elevatória é a altura manométrica, definida pela norma ABNT NBR 12214 (2020, p. 2) como “soma da altura geométrica (diferença de cotas) entre os níveis

de sucção e descarga do fluido com as perdas de carga distribuídas e localizadas ao longo de todo o sistema” que pode ser formulada da seguinte forma:

Equação 1: Altura manométrica total

$$H_m = H_g + \Delta H_s + \Delta H_r$$

Onde:

H_m = Altura manométrica total;

H_g = Diferença entre as cotas do nível de água do recalque e o da sucção;

ΔH_s = Perdas de carga, localizadas e distribuídas, na sucção;

ΔH_r = Perdas de carga, localizadas e distribuídas, no recalque.

Dessa forma, segundo Porto (2006), é possível calcular a potência necessária, gerada pelo motor e recebida pela bomba, para que a mesma trabalhe com sua maior eficiência, a partir da seguinte fórmula:

Equação 2: Potência de bombeamento

$$\text{Potência (CV)} = \frac{10^3 * Q * H_m}{75 * \eta}$$

Onde:

Q = Vazão na entrada da bomba (m^3/s);

H_m = Altura manométrica total (m);

η = Coeficiente de rendimento global da bomba.

2.1.5 Reservatórios

Para a ABNT NBR 12217 (1994, p. 1), o reservatório de distribuição é o “elemento do sistema de abastecimento de água destinado a regularizar as variações entre as vazões de adução e de distribuição e condicionar as pressões na rede de distribuição”. Dessa forma, os reservatórios de distribuição exercem um papel fundamental para garantir o fornecimento contínuo e eficiente de água, assegurando estabilidade tanto na quantidade quanto na pressão, mesmo diante das oscilações na demanda diária da população.

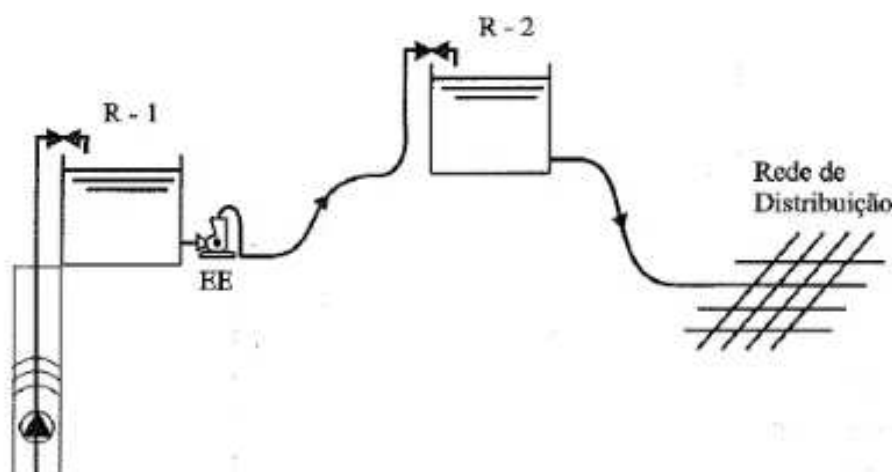
Tsutiya (2006) ainda acrescenta e destaca a importância dos reservatórios no suprimento de vazões extras em caso de incêndio, além da manutenção do abastecimento de água na ocorrência de rupturas ou manutenção de adutoras, por exemplo.

Os reservatórios podem ser classificados em relação a sua posição da seguinte forma:

- a) Reservatório de montante: posicionado a montante da rede, sempre fornece abastecimento de água à distribuição;
- b) Reservatório de jusante: ou reservatório de sobra, recebe água em horas de menor consumo da rede e auxilia o abastecimento em horários de maior consumo. Sua tubulação de entrada e saída são únicas;
- c) Reservatório de posição intermediária: para Tsutiya (2006), trata-se de um reservatório inserido no sistema de adução, cuja função principal é atuar como um elemento de regularização, equilibrando as variações entre o bombeamento e a adução por gravidade.

Na imagem abaixo, é possível visualizar o modelo citado.

Figura 3 – Reservatório de posição intermediária



Fonte: Tsutiya (2006).

Nesse contexto, podemos ainda classificar os reservatórios de distribuição de acordo com a sua posição em relação ao solo e à finalidade operacional, sendo eles, elevados, utilizados principalmente para garantir pressão suficiente na rede de distribuição, enterrados ou semi-enterrados utilizados para armazenar grandes volumes de água, contribuindo para o equilíbrio do sistema e apoiados que atendem demandas específicas de armazenamento.

2.1.6 Estação de Tratamento de água

Uma estação de tratamento de água (ETA) é um conjunto de estruturas e processos destinados a tornar a água captada de mananciais (rios, lagos ou reservatórios) própria para o

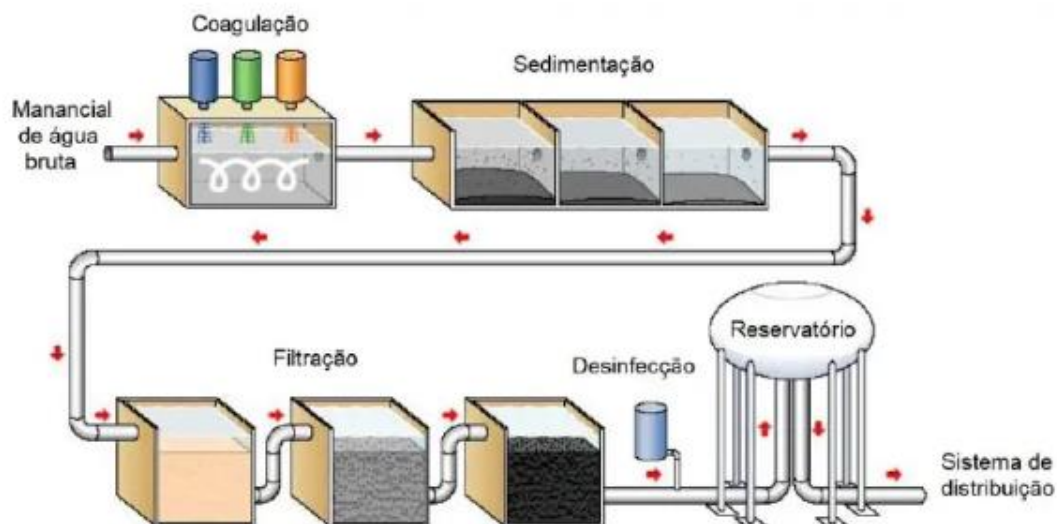
consumo humano. No Brasil, as resoluções CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) sobre tratamento de água estabelecem diretrizes e padrões para a qualidade da água e o lançamento de efluentes em corpos hídricos.

Para Heller (2010), o excesso de impurezas químicas ou biológicas na água pode prejudicar a saúde humana e as atividades econômicas. Por isso, é essencial caracterizar a água física, química, biológica e radiologicamente para avaliar o impacto no manancial, definir sua classe de qualidade, restrições de uso e o tratamento mais adequado.

Nesse contexto, para Gomes (2019), o tratamento da água em uma estação (ETA) começa com a coagulação, onde produtos químicos, como o sulfato de alumínio, aglutinam partículas em suspensão. Essas partículas formam flocos que sedimentam em decantadores. Depois, a água passa por filtros de areia e pedregulho para remoção de impurezas. Por fim, é realizada a desinfecção, geralmente com cloro, para eliminar germes patogênicos.

A Figura 4 mostra um croqui da Estação de Tratamento de Gramame em João Pessoa, onde é possível visualizar os processos descritos acima.

Figura 4 – Croqui da Estação de Tratamento de Gramame em João Pessoa



Fonte: Gomes (2019).

2.1.7 Rede de Distribuição de água

Para Tsutiya (2006), a rede de distribuição de água é a parte do sistema de abastecimento responsável por levar água potável aos consumidores, com quantidade, qualidade e pressão adequadas. Ela representa o maior custo do sistema, entre 50% e 75% do

total. Por estar enterrada, sua vigilância é mais difícil em comparação com outras etapas do abastecimento, exigindo atenção especial quanto à qualidade da água e controle de perdas.

Em geral, as redes de distribuição possuem dois tipos de tubulação: a principal, composta por tubos de maiores diâmetros, que abastecem as tubulações secundárias; e as secundárias, que possuem menores diâmetros e normalmente abastecem os pontos de consumo do sistema.

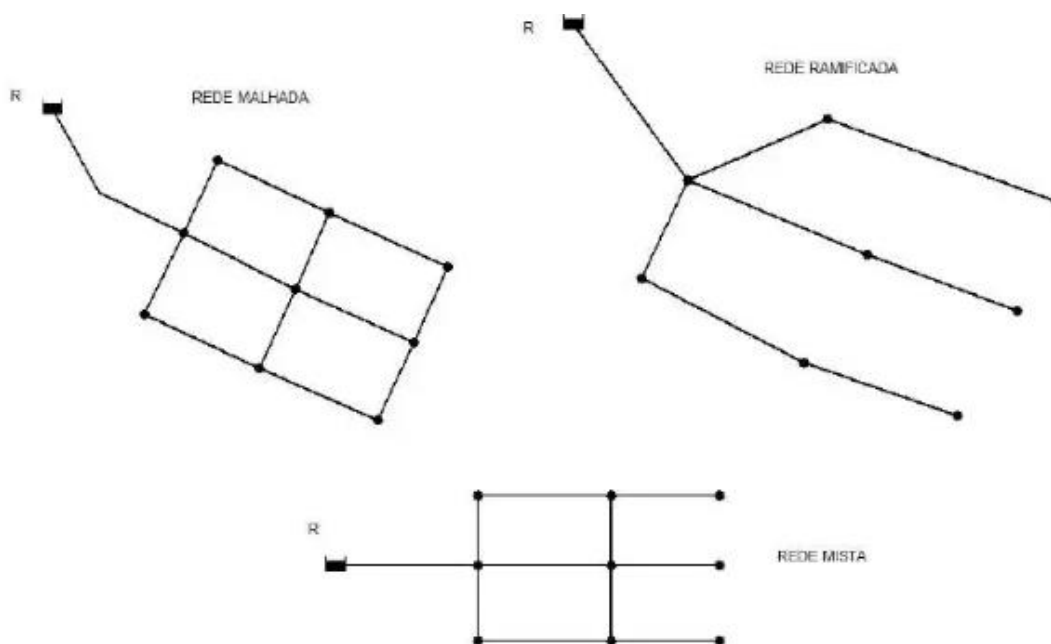
Para Porto (2006), as redes de distribuição podem ser classificadas com base na configuração dos condutos principais e na direção do fluxo nas tubulações secundárias, distinguindo-se entre redes ramificadas e redes malhadas.

As redes ramificadas são formadas por uma tubulação principal (ou tronco), que recebe água de um reservatório ou bomba e a distribui diretamente para as tubulações secundárias. Nelas, o sentido da vazão é único e conhecido em qualquer ponto da rede. Esse tipo de rede é geralmente utilizado em pequenas comunidades, acampamentos e sistemas de irrigação por aspersão.

Já as redes malhadas possuem tubulações tronco interligadas, formando anéis ou malhas. Essa configuração permite que a água tenha mais de um caminho possível, proporcionando maior flexibilidade no abastecimento. Além disso, facilita manutenções na rede, pois reduz a necessidade de interrupções no fornecimento de água. A reversibilidade do fluxo também permite melhor atendimento à demanda.

De forma intuitiva, verifica-se, ainda, a possibilidade de construção de uma rede mista, na qual une as principais características das redes malhadas e ramificadas mostradas na Figura 5.

Figura 5 – Tipos de rede de distribuição



Fonte: Gomes (2019).

Nesse contexto, a norma ABNT NBR 12218 (2017) cita as seguintes recomendações para o traçado de tubulações na rede de distribuição:

Em áreas urbanas, as tubulações devem ser localizadas preferencialmente em áreas ou vias públicas, em passeios, formando circuitos fechados, evitando pontas de rede e água estagnada.

Realizar simulações hidráulicas considerando os principais cenários, com calibração e validação do sistema existente e do sistema proposto. Os resultados das simulações hidráulicas devem apresentar as características operacionais de todas as unidades necessárias do sistema distribuidor (tubulação, elevatória/booster, válvula redutora de pressão).

A pressão estática máxima nas tubulações distribuidoras deve ser de 400 kPa, podendo chegar a 500 kPa em regiões com topografia acidentada, e a pressão dinâmica mínima, de 100 kPa, e ser referenciada ao nível do terreno.

Para Tsutiya (2006), dentre os dispositivos acessórios possivelmente presentes na rede de distribuição, para manutenção, adequação ou proteção por exemplo destacam-se os seguintes componentes:

- a) Válvula de manobra: usada para bloquear o fluxo de água com a finalidade primordial de isolar um trecho da rede, permitindo a operação da tubulação em subtrechos.

- b) Válvula de descarga: colocadas em pontos mais baixos com intuito de esvaziar totalmente a tubulação. Geralmente são colocadas próximas a córregos ou galerias de águas pluviais que permitem o escoamento
- c) Ventosas: peças que permitem entrada e saída de ar colocadas em pontos altos de tubulações.
- d) Válvulas redutoras de pressão (VRP): peças de funcionamento automático que reduzem a pressão à montante para que fique constante à pressão de jusante. Usada nas regiões mais baixas de maneira a garantir que a pressão não ultrapasse o limite máximo.
- e) Válvulas sustentadoras de pressão (VSP): assim como a VRP, regula a pressão, porém, a VSP tem função de sustentar pressões mínimas à montante.
- f) Hidrantes: equipamentos ligados às tubulações que permitem a retirada de água para serem utilizadas, sobretudo no combate a incêndio.

Alternativamente, de acordo com Nasir et al. (2024), as chamadas Pump as Turbines (PAT) surgem como uma solução inovadora e sustentável para o controle de pressão em sistemas de abastecimento de água. Além de regular a pressão, essas bombas, quando operadas em fluxo reverso, aproveitam a energia hidráulica excedente nas tubulações para gerar eletricidade. Nesse sentido, as PATs podem ser aplicadas como alternativa às válvulas redutoras de pressão, desempenhando simultaneamente a função de controle hidráulico e geração de energia, o que as torna uma opção eficiente e vantajosa em termos técnicos, econômicos e ambientais.

2.2 Perdas

2.2.1 Tipologia das Perdas

Para Moura et al. (2004), em sistemas públicos de abastecimento, as perdas de água podem ser classificadas considerando os volumes que não são contabilizados, abrangendo tanto as perdas físicas, correspondentes à água que se perde no sistema, quanto as perdas não físicas, relacionadas ao consumo que não é registrado.

Para a ABES (2015), em síntese, perdas reais (ou físicas) e Perdas Aparentes (ou não físicas) são utilizadas para classificar os tipos de perdas em sistemas de abastecimento de água. As Perdas Reais correspondem aos vazamentos que ocorrem em diferentes pontos do sistema, além dos extravasamentos em reservatórios de água tratada, ou seja, representam as

perdas físicas propriamente ditas. Já as Perdas Aparentes estão relacionadas ao volume de água que é consumido, mas não registrado ou faturado pela companhia de saneamento. Essas perdas geralmente ocorrem por falhas na medição dos hidrômetros ou por fraudes. Além disso, é importante distinguir entre Águas Não Faturadas e Perdas, sendo estas últimas mais ligadas à eficiência operacional da prestadora do serviço, enquanto as Águas Não Faturadas incluem também usos legítimos da água que não geram cobrança, como no combate a incêndios ou no fornecimento de água a áreas urbanas irregulares.

Para melhor ilustrar a tipologia das perdas, o balanço hídrico realizado pela Associação Internacional da Água – IWA (2006 apud Gomes, 2019) está ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Parcelas das perdas de água (reais e aparentes) em relação ao volume que entra no sistema

Volume de entrada no setor	Consumo autorizado	Consumo autorizado faturado	Consumo faturado medido (incluir água exportada)	Água faturada
			Consumo faturado não medido (estimados)	
	Perda de água	Consumo autorizado não faturado	Consumo não faturado medido (usos próprios, caminhão-pipa, etc)	Água não faturada
			Consumo não faturado não medido (combates a incêndios, favelas, etc)	
		Perdas aparentes	Uso não autorizado (fraudes e falhas de cadastro)	
			Erros de medição (macro e micromedição)	
	Perdas reais		Vazamentos nas adutoras e/ou redes de distribuição	
			Vazamento e extravasamentos nos reservatórios de adução e/ou distribuição Vazamentos nos ramais (a montante do ponto de medição)	

Fonte: Gomes (2019).

Nesse contexto, a quantificação volumétrica do cenário apresentado no balanço hídrico torna-se fundamental, sendo imprescindível a realização de medições precisas de volume, a fim de proporcionar uma gestão técnica mais eficiente e eficaz. Para isso, de acordo com a ABES (2015) essa medição se dá em dois níveis:

- a) Macromedicação: é a referência principal de todo o Balanço Hídrico, realizada na apuração dos volumes produzidos nas Estações de Tratamento de Água - ETA, disponibilizados à distribuição ou mesmo apurados em subsetores ou outras compartimentações operacionais das redes de distribuição de água;
- b) Micromedicação: é a apuração dos volumes de água na entrada dos consumidores finais (residências, imóveis comerciais, indústrias), em que são feitas leituras periódicas nos hidrômetros instalados. A totalização dessas leituras, em um intervalo de tempo, é que vai ser confrontada com a macromedicação apurada nesse mesmo intervalo de tempo.

A partir da comparação entre os volumes obtidos pela macromedicação e pela micromedicação, torna-se possível identificar as diferenças entre o volume de água produzido e o volume efetivamente consumido e faturado. Essas comparações permitem quantificar as perdas ao longo do sistema, possibilitando determinar não apenas quanto de água está sendo perdido, mas também onde essas perdas ocorrem.

De acordo com Gomes (2019), para quantificação das perdas reais e aparentes, o índice mais utilizado é o percentual (IP) calculado pela razão entre o volume total de perdas (Rais + aparentes) sobre o volume total aduzido ao sistema:

Equação 3: Indicador percentual de perdas

$$IP (\%) = \frac{\text{Volume perdido}}{\text{Volume produzido}} \times 100$$

Fonte: Gomes (2019).

2.2.2 Perdas Aparentes

Como citado anteriormente, para Moura et al. (2004), as perdas aparentes podem ser atribuídas a diversos fatores, como erros de medição em hidrômetros e outros tipos de medidores, fraudes, ligações clandestinas e falhas no cadastro comercial. Entre os principais fatores relacionados especificamente aos erros de medição nos hidrômetros, destacam-se:

- a) O envelhecimento do hidrômetro;
- b) A qualidade da água distribuída;
- c) A instalação inadequada, como a inclinação lateral do equipamento.

Já para a ocorrência de fraudes, os eventos abaixo são os de maiores frequência a partir da alteração clandestina de estruturas dispostas pelas companhias de abastecimento de água.

- a) Rompimento do lacre e inversão do hidrômetro;
- b) Execução de “by pass” no hidrômetro;
- c) Violação do hidrômetro, através de furona cúpula, e colocação de arame para travar os dispositivos internos do hidrômetro;
- d) Acesso por torneira ou registro após o hidrômetro e inserção de um arame, ou outro obstáculos, para impedir a rotação da turbina do hidrômetro.

Além disso, existem fraudes decorrentes de falha no cadastro comercial, exemplificadas por ligações clandestinas que nunca foram devidamente cadastrados pela concessionária. Nessas situações, o consumo de água acontece sem que haja controle, medição ou faturamento adequado, o que caracteriza uma perda aparente dentro do sistema.

2.2.3 Perdas físicas

Associadas a, sobretudo, vazamentos rompimentos ou extravasamentos em tubulações, conexões, válvulas e reservatórios, Moura et al. (2004) apresenta na imagem abaixo as seguintes origens e magnitudes das perdas físicas por subsistema:

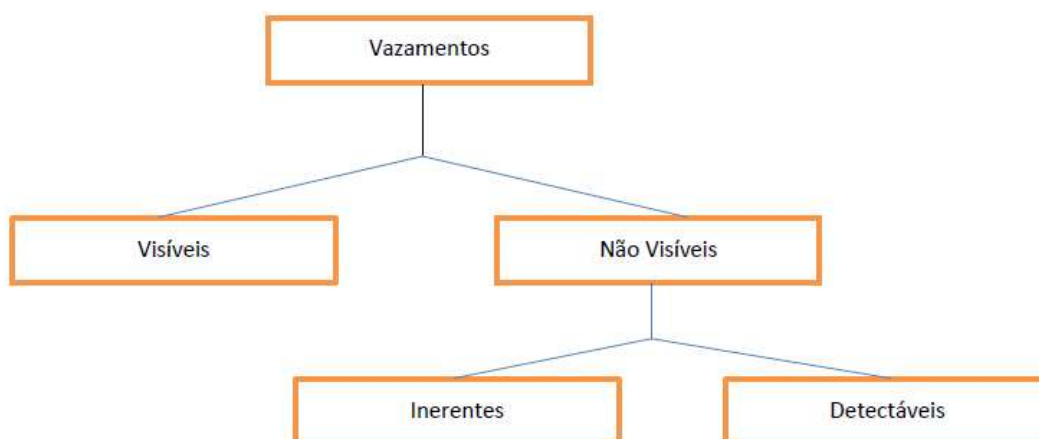
Figura 7 - Origens e magnitudes das perdas físicas

	SUBSISTEMA	ORIGEM	MAGNITUDE
PERDAS FÍSICAS	Adução de Água Bruta	Vazamentos nas tubulações Limpeza do poço de sucção*	Variável, função do estado das tubulações e da eficiência operacional
	Tratamento	Vazamentos estruturais Lavagem de filtros* Descarga de lodo*	Significativa, função do estado das instalações e da eficiência operacional
	Reservação	Vazamentos estruturais Extravasamentos Limpeza*	Variável, função do estado das instalações e da eficiência operacional
	Adução de Água Tratada	Vazamentos nas tubulações Limpeza do poço de sucção* Descargas	Variável, função do estado das tubulações e da eficiência operacional
	Distribuição	Vazamentos na rede Vazamentos em ramais Descargas	Significativa, função do estado das tubulações e principalmente das pressões

Fonte: Moura et al. (2004)

Nesse contexto, para Souza (2016), os vazamentos descritos na imagem acima podem ser classificados em visíveis e não visíveis. Os visíveis são facilmente identificados pela população e rapidamente reparados. Já os não visíveis permanecem ocultos, infiltrando-se no solo, o que dificulta sua detecção e demanda o uso de equipamentos especializados. No entanto, nem todos esses vazamentos ocultos podem ser identificados, especialmente aqueles de vazão muito baixa, conhecidos como vazamentos inerentes, que ocorrem, por exemplo, em juntas e nos estágios iniciais de corrosão das tubulações. Na imagem abaixo, o fluxograma representa de forma didática a distinção dos tipos de vazamentos.

Figura 8 – Tipologia dos vazamentos



Fonte: Souza (2016).

Para a ABES (2015), ensaios ou avaliações realizadas demonstram que os volumes perdidos através dos Vazamentos Visíveis representam pequena parcela dos volumes totais perdidos nos vazamentos; assim, a maior parte das Perdas Reais é devida a Vazamentos Não Visíveis, não aflorantes à superfície do terreno.

Dentre as causas mais frequentes e prováveis das falhas e ruptura nas tubulações, Moura et al. (2004) ilustra por meio da figura abaixo as principais causas de falha e ruptura causadoras das perdas físicas no sistema de distribuição de água.

Figura 9 - Causas Prováveis de Falhas e Rupturas em Tubulações

FASE DA FALHA	CAUSA DA FALHA	CAUSA DA RUPTURA
Planejamento e Projeto	▪ Subdimensionamento ▪ ausência de ventosas ▪ cálculo transientes ▪ regras de operação ▪ setorização ▪ treinamento	▪ sobrepressão ▪ subpressão ▪ sub e sobrepressão ▪ sub e sobrepressão ▪ sobrepressão ▪ sub e sobrepressão
Construção	▪ construtivas ▪ materiais ▪ peças ▪ equipamentos ▪ treinamento	
Operação	▪ enchimento ▪ esvaziamento ▪ manobras ▪ ausência de regras ▪ treinamento	▪ sub e sobrepressão ▪ subpressão ▪ sub e sobrepressão ▪ sub e sobrepressão ▪ sub e sobrepressão
Manutenção	▪ sem prevenção ▪ mal-feita ▪ treinamento ▪ interação operação/usuário ▪ tempo de resposta	
Expansão	▪ sem projeto ▪ sem visão conjunta	▪ sub e sobrepressão ▪ sub e sobrepressão

Fonte: Moura et al. (2004).

Nessa perspectiva, percebe-se a importância de um planejamento integrado e criterioso em todas as etapas do sistema de abastecimento. A análise das falhas e rupturas demonstra que muitas deficiências operacionais e estruturais podem ser evitadas por meio de medidas preventivas, treinamentos adequados, aplicação de normas técnicas e acompanhamento contínuo. Vale destacar, que a pressão no sistema de abastecimento de água, normatizada pela ABNT NBR 12218:2017, é um fator essencial para garantir a integridade e a eficiência operacional da rede. Pressões inadequadas, sejam elas elevadas (sobrepressão) ou muito baixas (subpressão), estão diretamente relacionadas ao aumento do risco de falhas e rupturas nas tubulações, como evidenciado na tabela apresentada. A adoção dessas práticas contribui diretamente para a redução de perdas, aumento da eficiência operacional e garantia da qualidade no fornecimento de água à população.

2.2.4 Boas práticas para redução de perdas

A ABES (2015) destaca a necessidade de adoção de medidas específicas para a melhoria da eficiência dos sistemas de abastecimento. Essas recomendações visam minimizar

as perdas totais, contribuindo para maior sustentabilidade operacional das companhias de saneamento. A seguir, apresentam-se as principais estratégias indicadas pela ABES:

- a) Gerenciamento da Hidrometria: consiste no acompanhamento contínuo dos hidrômetros instalados, com a realização de trocas preventivas em equipamentos antigos ou inadequados ao perfil de consumo, além da substituição corretiva dos aparelhos danificados. Essa medida visa garantir medições mais precisas e confiáveis.
- b) Combate às Fraudes e Irregularidades: envolve o monitoramento sistemático do consumo dos usuários, a identificação de possíveis fraudes, como ligações clandestinas e reativações irregulares, além da realização de inspeções em campo, recebimento de denúncias e posterior regularização das ocorrências detectadas.
- c) Modernização do Sistema Comercial: refere-se à implantação e constante atualização de sistemas informatizados responsáveis pelo processamento dos dados de consumo, integração com os setores operacionais e comerciais, leitura, faturamento e controle de inconsistências.
- d) Atualização do Cadastro Comercial: visa manter o cadastro de consumidores permanentemente atualizado, corrigindo irregularidades, eliminando ligações não cadastradas e agilizando o registro de novas conexões, o que melhora o controle e a eficiência no faturamento.
- e) Controle Ativo de Vazamentos: foca na detecção e reparo de vazamentos visíveis ou não visíveis por meio de métodos especializados, como a pesquisa acústica. A eficácia dessa ação depende de um planejamento adequado, estudo do histórico, da capacitação da equipe envolvida e da utilização de equipamentos apropriados.
- f) Gerenciamento de Pressões: em que através do zoneamento piezométrico e adoção de equipamentos para aumentar (apenas para atingir uma região mais alta) ou reduzir as pressões, consegue-se trabalhar com pressões adequadas às normas estabelecidas e devidamente estabilizadas.
- g) Agilidade e Qualidade no Reparo dos Vazamentos: trata-se da organização de uma logística eficiente e da qualificação da mão de obra para executar reparos com rapidez e qualidade. Essa abordagem evita retrabalhos e desperdícios, garantindo maior durabilidade às intervenções realizadas.

- h) Gerenciamento da Infraestrutura - Compreende a implantação adequada de novas tubulações, assegurando a qualidade dos projetos, materiais e execução, além da substituição de trechos antigos ou problemáticos. Essa é uma das ações mais eficazes no combate às perdas reais, proporcionando resultados permanentes, apesar dos custos mais elevados.

2.3 Hidráulica de redes

2.3.1 *População de projeto.*

O planejamento adequado de um sistema de abastecimento de água exige uma análise criteriosa da demanda futura. Para isso, é fundamental conhecer a projeção da população ao final do período de planejamento, bem como sua evolução ao longo dos anos. Essas informações são essenciais para orientar o dimensionamento e a implantação gradual das etapas do sistema, garantindo que ele atenda de forma eficiente às necessidades da comunidade atendida, tanto no presente quanto no futuro. Nesse contexto, Heller (2010) apresenta diferentes metodologias e cálculos para a projeção populacional para posterior projeto de abastecimento de água, dentre eles a projeção geométrica, aritmética.

Método aritmético – Considerando um crescimento linear da população:

Equação 4: População no tempo t aritmética

$$P = P_0 + K (T - T_0)$$

Em que:

P = População correspondente à data futura;

P₀ = População inicial de referência;

T = Ano final de referência;

T₀ = Ano da população inicial de referência;

K = Taxa de crescimento.

Onde:

Equação 5: População no tempo t aritmética

$$K = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1}$$

Em que:

P₂ = População no ano final da análise;

P1 = População no ano inicial da análise;

t2 = Ano final da análise;

t1 = Ano inicial da análise.

Método geométrico – Considerando um crescimento em progressão geométrica da população:

Equação 6: População no tempo t geométrica

$$P = P_0 e^{k(t-t_0)}$$

Em que:

P = População no tempo t;

P0 = População inicial;

e = Número de Euler (aproximadamente 2,718);

t = Tempo em anos;

t0 = Ano inicial da análise;

K = Taxa de crescimento.

Onde:

Equação 7: Taxa de crescimento geométrico

$$K = \frac{\ln p_2 - \ln p_1}{t_2 - t_1}$$

Em que:

P2 = População no segundo ano da análise;

P1 = População no ano inicial da análise;

t2 = Segundo Ano da análise;

t1 = Ano inicial da análise.

Nessa perspectiva, antes de realizar o cálculo da projeção populacional, é fundamental consultar os dados geográficos e sociais do município, a fim de compreender suas tendências de crescimento e garantir que a projeção seja elaborada de forma precisa e adequada.

2.3.2 Consumo

O consumo de água está diretamente relacionado a uma variedade de fatores específicos de cada localidade. Esses fatores incluem características geográficas, climáticas, sociais e econômicas, que influenciam diretamente a quantidade de água demandada pela população. Nesse contexto, Netto (1998) ilustra os diferentes destinos e tipos de consumos requeridos, como para o uso doméstico, comercial, industrial ou público, assim como a previsão de perdas no sistema. Nessa perspectiva, diante das diversas variações possíveis e impossibilidade de quantificar um valor exato de consumo, para execução de um correto dimensionamento de uma rede de abastecimento a Fundação Nacional de Saúde (2016) estabelece limites de consumo per capita, isto é, o consumo médio de cada habitante por dia a partir dos seguintes critérios:

- a) Municípios com população acima de 50.000 habitantes: 200 a 300 L/hab.dia;
- b) Municípios com população inferior a 50.000 habitantes: 150 a 200 L/hab.dia.

Além disso, como citado anteriormente, o consumo de água em uma cidade não é constante, sofrendo variações tanto ao longo do ano quanto durante o dia. Em épocas mais quentes e secas, o consumo tende a ser maior, assim como nos horários de pico diários, geralmente pela manhã e à noite, quando a população realiza atividades como banho, preparo de refeições e limpeza.

Nessa perspectiva, para Netto (2018), verifica-se a necessidade de se estabelecerem coeficientes que traduzam essas variações de consumo para o dimensionamento das diversas unidades de um sistema público de abastecimento de água. Sendo eles:

- a) Coeficiente do dia de maior consumo (K1): obtido pela relação entre o valor do consumo máximo diário ocorrido em um ano e o consumo médio diário relativo a esse ano
- b) Coeficiente da hora de maior consumo (K2): obtido pela relação entre a maior vazão horária e a vazão média do dia de maior consumo.

A norma ABNT NBR 12218 (2017), especifica que os valores de k1 e k2 devem ser obtidos em cada local a partir de registros históricos de consumo. Entretanto, em casos de inexistência de histórico, o valor de K1 deve ser de 1,2 e o de K2 igual a 1,5.

2.3.3 Vazão de distribuição

Após explicação dos parâmetros anteriores, conforme Tisutiya (2006), é possível calcular a vazão de dimensionamento para a rede de distribuição, considerando as variações diárias e horárias pela seguinte fórmula:

Equação 8: Vazão de distribuição

$$Q = \frac{k1 \times k2 \times pop \times q}{86400}$$

Em que:

Q = Vazão de distribuição (l/s);

K1 = Coeficiente do dia de maior consumo;

K2 = Coeficiente da hora de maior consumo;

Pop = População de projeto no final de plano;

q = Consumo per capita (l/hab*dia).

2.3.4 Princípios de conservação de massa e energia.

Para Barreira (2017), o estudo e o dimensionamento de sistemas hidráulicos fundamentam-se em dois princípios físicos fundamentais: a conservação de massa e a conservação de energia. Esses conceitos são essenciais para a análise do comportamento dos escoamentos em sistemas de abastecimento de água

O princípio da conservação de massa estabelece que, em um sistema hidráulico em regime permanente, a quantidade de água que entra deve ser igual à quantidade que sai, desde que não haja acúmulo ou perdas no percurso. Essa condição garante o equilíbrio e a continuidade do escoamento, sendo expressa matematicamente por:

Equação 9: Conservação de massa

$$\sum Q_{entrada} + \sum Q_{saida} = 0$$

Onde:

Qentrada = Vazão de entrada no sistema;

Qsaida = Vazão de saída do sistema.

Esse princípio é aplicado em todas as unidades do sistema de abastecimento de água, desde as captações até a distribuição.

Já o princípio da conservação de energia estabelece que a diferença de energia entre dois pontos de uma tubulação é resultante das perdas de carga (resistências impostas ao escoamento pelo atrito e por singularidades) e eventuais ganhos ou perdas devido à presença de bombas ou turbinas. Esse balanço pode ser expresso pela equação:

Equação 10: Conservação de energia

$$H_1 \pm H_B = H_2 \pm \Delta H_{1-2}$$

Em que:

H_1 = Energia total no ponto inicial;

H_2 = Energia total no ponto final;

H_B = Energia fornecida por uma bomba ou retirada por uma turbina;

ΔH_{1-2} = Perda de carga entre os dois pontos.

Nos casos em que dois pontos são ligados por mais de um caminho hidráulico, todos esses percursos devem apresentar a mesma perda de carga, considerando que partem e chegam aos mesmos pontos.

Nessa conjuntura, complementando o princípio da conservação de energia, utiliza-se a equação de Bernoulli, proposta por Daniel Bernoulli. Essa equação permite determinar a energia total em um ponto do escoamento, expressa em metros de coluna d'água (mca), sendo composta pelas parcelas de pressão, altura e velocidade (Porto, 2006 apud Barreira, 2017).

Sua formulação é dada por:

Equação 11: Equação de Bernoulli

$$H = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g}$$

Onde;

p = Pressão, em kN/m²;

γ = Peso específico do fluido (10 kN/m³ para água);

z = Altura em relação a um plano de referência, em m;

V = Velocidade do fluido, em m/s;

g = Aceleração da gravidade, em m/s².

Considerando o sentido do escoamento entre dois pontos e incorporando a influência de bombas e perdas de carga, a equação completa é expressa por:

Equação 12: Equação de Bernoulli com conservação de energia

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} \pm H_B = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{1-2}$$

2.3.5 Perdas de carga

As perdas de carga ocorrem durante o escoamento de um fluido em tubulações, representando a perda de energia ou pressão causada pelo atrito e por obstáculos ao longo do percurso. Essas perdas podem ser divididas em dois tipos principais:

- a) Perdas distribuídas;
- b) Perdas localizadas.

As perdas de carga distribuídas são influenciadas por um parâmetro conhecido como fator de atrito, que é um número adimensional. Esse fator depende de características do escoamento, como a rugosidade interna do tubo, diâmetro da tubulação e propriedades do fluido, como velocidade, densidade e viscosidade do fluido, expressas por meio do número de Reynolds (Porto, 2006).

Segundo Netto (2010), estudos experimentais conduzidos por Nikuradse, em 1933, demonstraram que a influência da rugosidade e do número de Reynolds sobre o fator de atrito varia conforme o regime de escoamento. Em escoamentos com baixos valores de Reynolds (escoamento laminar), o efeito da rugosidade é praticamente irrelevante. No entanto, à medida que o número de Reynolds aumenta, ocorre uma transição entre um escoamento hidraulicamente liso e um escoamento rugoso, tornando o fator de atrito dependente tanto da rugosidade quanto do número de Reynolds. Em condições de escoamento totalmente rugoso, ou seja, com valores muito altos de Reynolds, o fator de atrito passa a depender apenas da rugosidade da tubulação.

Além do Uma das equações mais utilizadas para estimar o fator de atrito em escoamentos turbulentos em tubulações comerciais é a equação de Swamee-Jain, expressa por:

Equação 13: Equação de Swamee Jain

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Para: $10^{-6} \leq \frac{\varepsilon}{D} \leq 10^{-2}$ e $5 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$

Em que:

f = Fator de atrito;

ε = Rugosidade absoluta equivalente do tubo, em m;

D = Diâmetro do tubo, em m;

Re = Número de Reynolds.

A partir do cálculo do fator de atrito, pode-se calcular a perda distribuída pela fórmula universal da perda de carga, também conhecida como fórmula de Darcy-Weisbach:

Equação 14: Fórmula de Darcy-Weisbach

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Onde:

H_f = perda de carga distribuída (m);

f = fator de atrito (adimensional);

L = comprimento da tubulação (m);

D = diâmetro interno da tubulação (m);

V = velocidade média do fluido (m/s);

G = aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

Alternativamente, muito aplicada em projetos civis, sobretudo para dimensionamento de tubulações para água, por desconsiderar viscosidade e densidade, utiliza-se a fórmula de Hazen-Williams para cálculo da perda de carga distribuída.

Equação 15: Fórmula de Hazen-Williams

$$h_f = 10,67 \cdot \frac{L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \cdot Q^{1,85}$$

Em que:

H_f = Perda de carga distribuída (m);

L = comprimento da tubulação (m);

D = diâmetro do tubo (m);

Q = vazão (m³/s);

C = Coeficiente de rugosidade (depende do material).

Apesar da divergência entre autores, em geral, Netto (2010) apresenta no quadro abaixo os valores médios adotados para C a depender do material da tubulação

Figura 10 – Valores usuais de C

QUADRO 20.13 – Valores médios de C:	
Ferro dúctil	C = 100
Ferro dúctil revestido de cimento	C = 120
Alumínio	C = 130
Aço zincado	C = 130
PVC rígido e poliéster	C = 150
Fibrocimento	C = 140

Fonte: Netto (2010).

Diferentemente das perdas distribuídas, que ocorrem ao longo dos trechos retilíneos da tubulação, as perdas localizadas se manifestam pontualmente e devem ser consideradas no dimensionamento dos sistemas de distribuição de água. Para Porto (2006), as perdas de carga localizadas, também chamadas de perdas singulares, ocorrem em pontos específicos de uma instalação hidráulica, geralmente associadas à presença de acessórios e conexões. Esses elementos, como válvulas, registros, curvas, derivações e outros dispositivos, provocam alterações no escoamento da água, seja por mudanças na direção, seja por variações na velocidade do fluido. Essas alterações geram turbulências e redemoinhos, resultando em perda de energia localizada.

Nesse contexto, a fórmula da perda de carga localizada é expressa pela seguinte equação:

Equação 16: Perda de carga localizada

$$h_L = K \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Onde:

h_L = perda de carga localizada (m);

v = velocidade média do escoamento;

g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

k = Coeficiente de perda localizada (depende do acessório).

Em geral, de acordo com Porto (2006), para os principais acessórios e conexões utilizados em tubulações, temos os seguintes valores de K:

Quadro 1 – Valores de K para cada acessório

ACESSÓRIO	K	ACESSÓRIO	K
Cotovelo de 90° raio curto	0,9	Válvula de gaveta aberta	0,2
Cotovelo de 90° raio longo	0,6	Válvula de ângulo aberta	5
Cotovelo de 45°	0,4	válvula de globo aberta	10
Curva 90°, r/d = 1	0,4	válvula de pé com crivo	10
Curva de 45°	0,2	válvula de retenção	3
Tê, passagem direta	0,9	curva de retorno, $\alpha = 180^\circ$	2,2
Tê, saída lateral	2	válvula de bóia	6

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

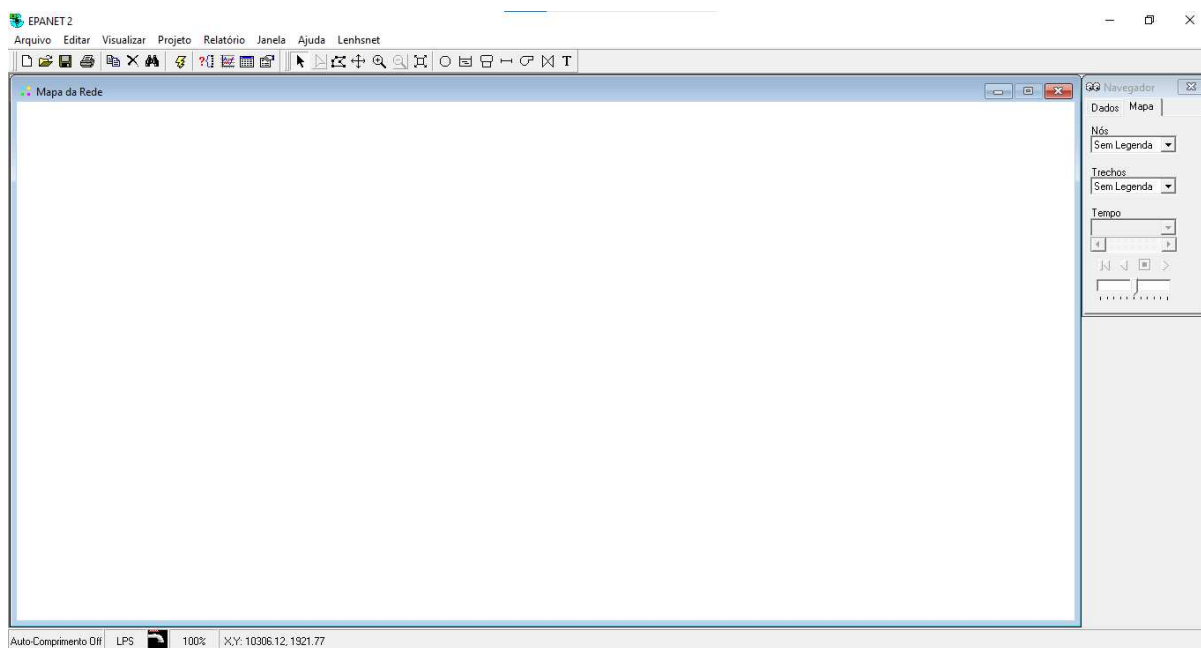
2.3.6 Epanet

Para Rossman (2000), o EPANET é um software desenvolvido para a realização de simulações hidráulicas e de qualidade da água em sistemas de distribuição pressurizados. A ferramenta possibilita análises tanto estáticas quanto dinâmicas do comportamento de redes de abastecimento, permitindo uma compreensão detalhada do funcionamento do sistema ao longo do tempo. Essas redes podem ser compostas por tubulações, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e variado, além de dispositivos acessórios.

Por meio do EPANET, é possível determinar a vazão em cada trecho de tubulação, as pressões em cada nó, o nível de água nos reservatórios de nível variável, bem como a concentração de espécies químicas transportadas pela rede durante o período de simulação. O programa também permite simular a idade da água e rastrear a sua origem em qualquer ponto do sistema, o que o torna uma ferramenta essencial para o planejamento e controle da qualidade da água destinada ao consumo humano.

No que se refere ao cálculo hidráulico, o EPANET oferece flexibilidade na escolha das equações utilizadas, incluindo Hazen-Williams, Darcy-Weisbach e Chezy-Manning para o cálculo das perdas de carga distribuídas. Contudo, é importante destacar que o software não considera, em suas simulações, as perdas de carga localizadas decorrentes de acessórios como curvas, válvulas e conexões. Além disso, o programa possibilita o detalhamento da geometria de reservatórios por meio de curvas de volume em função da altura da água.

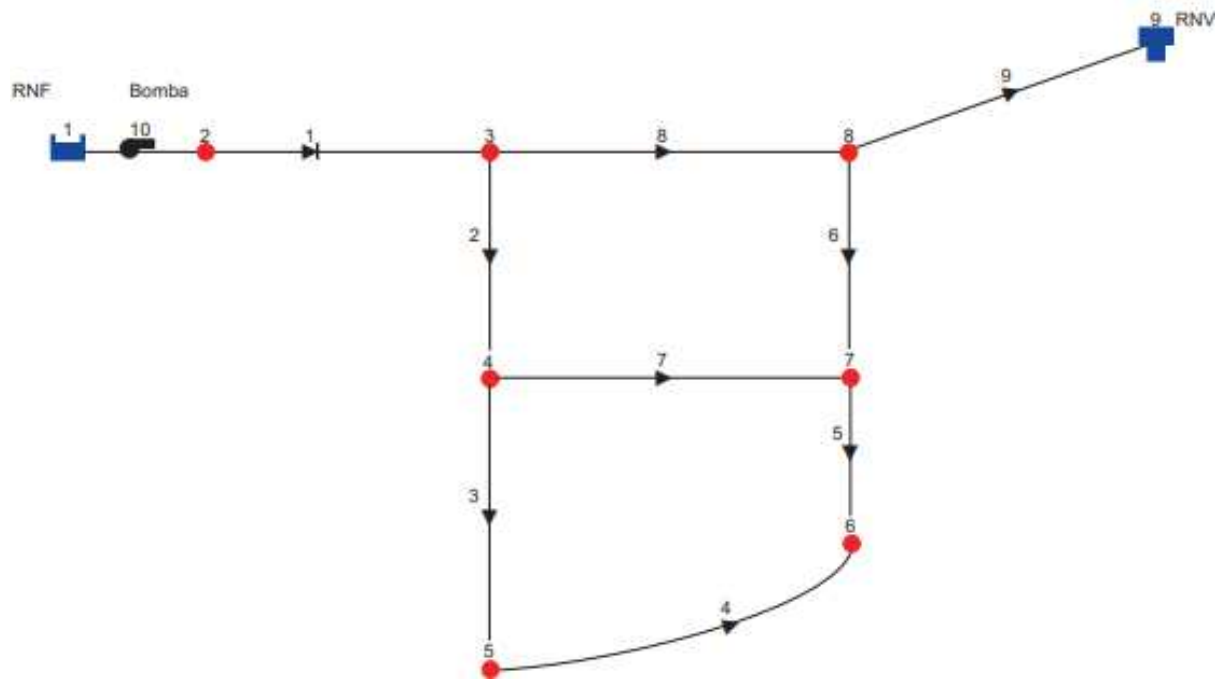
Figura 11 – Interface inicial do programa



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nessa perspectiva, diante de sua grande acessibilidade e fácil manuseio, o EPANET é amplamente utilizado pela Cagece (Companhia de Água e Esgoto do Ceará), especialmente pela Unidade de Negócios da Bacia Metropolitana Oeste (UN-BMO). Nessa unidade, o software é a principal ferramenta empregada na modelagem de redes de distribuição de água, sendo fundamental tanto no desenvolvimento de projetos de ampliação das redes quanto na realização de diagnósticos operacionais. Entre as principais aplicações, destacam-se a análise de problemas de pressão, o cálculo de perdas de carga e a avaliação das vazões em diferentes trechos da rede.

Figura 12 – exemplo de traçado de rede



Fonte: Rossman (2000).

3 METODOLOGIA

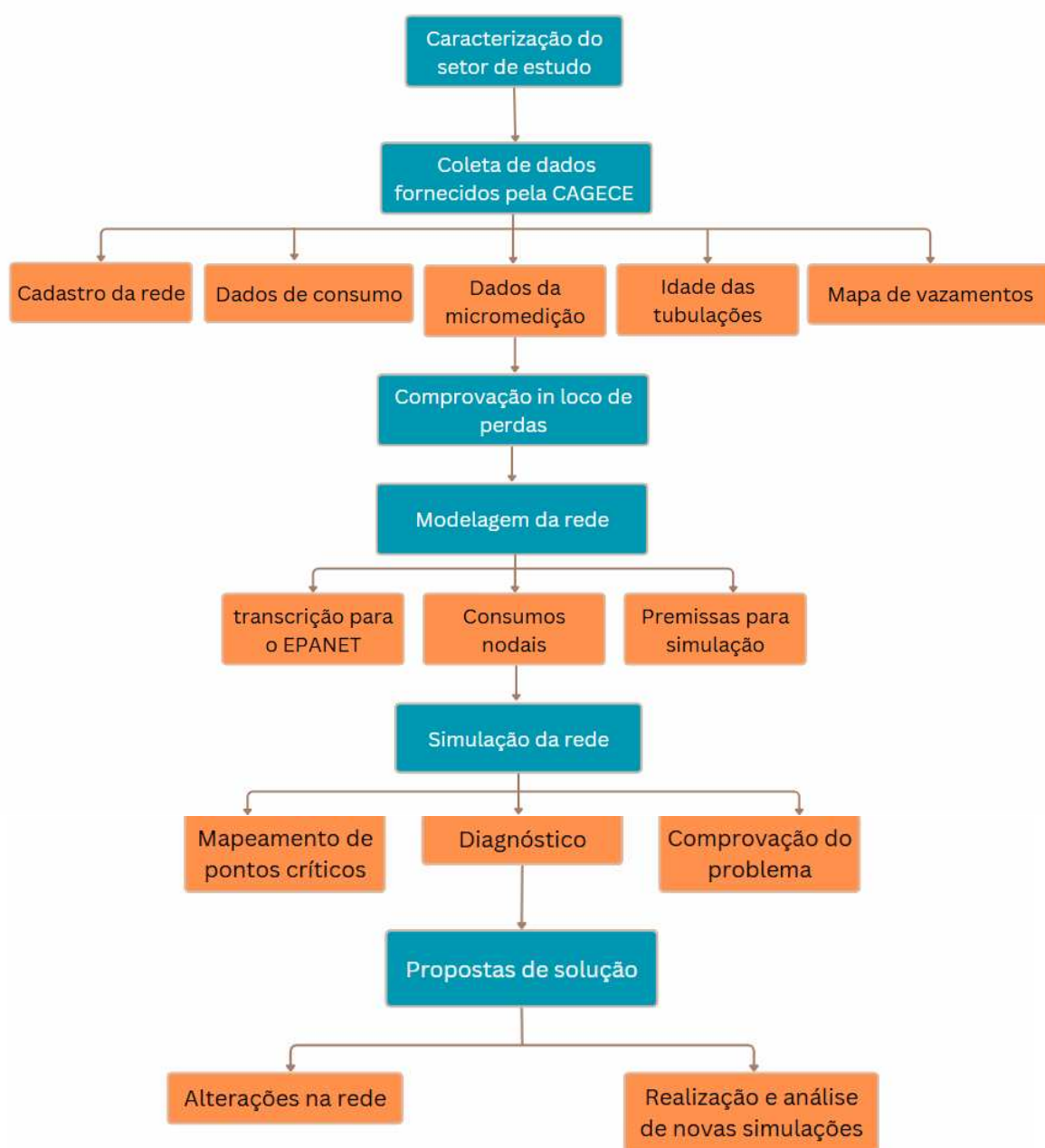
Este trabalho tem como ponto de partida uma análise inicial dos principais fundamentos e abordagens utilizados na modelagem e simulação de sistemas hidráulicos, os quais são explorados com maior profundidade ao longo da revisão bibliográfica. Neste capítulo, a metodologia adotada é exposta descrevendo de forma estruturada as etapas percorridas para o desenvolvimento do estudo, detalhando, em seguida, as hipóteses formuladas, as premissas consideradas, os critérios técnicos estabelecidos e os métodos empregados em cada fase do processo.

Nesse contexto, adotou-se as seguintes etapas para realização deste estudo:

- a) Etapa 1: Caracterização do setor, com auxílio de mapas para melhor compreensão;
- b) Etapa 2: Coleta de dados junto à CAGECE: Cadastro da rede, dados de consumo, dados da macromedição, idade das tubulações e mapa de registro de vazamentos;
- c) Etapa 3: Medições de vazão in loco para a comprovação das perdas;
- d) Etapa 4: Modelagem da rede incluindo o cálculo de demandas nodais e as demais configurações necessárias para a simulação;
- e) Etapa 5: Simulação da rede e realização de diagnóstico geral em relação à necessidade ou não de intervenções;
- f) Etapa 6: Sugestões de alterações na rede a partir de novas simulações.

Para melhor visualização da metodologia aplicada, as etapas descritas estão ilustradas no fluxograma da figura 13.

Figura 13 - Fluxograma de etapas



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

3.1 Caracterização do setor

Localizado a aproximadamente 89 km da capital Fortaleza, Vazantes é um distrito do município de Aracoiaba, distante 24 km do seu centro, pertencente a microrregião de Baturité, com população estimada em 2022 de 1754 habitantes. O distrito possui 861 ligações de abastecimento de água registradas pela CAGECE, responsável pelo sistema local.

Na figura 14, é ilustrada a localização do município de Aracoiaba-CE

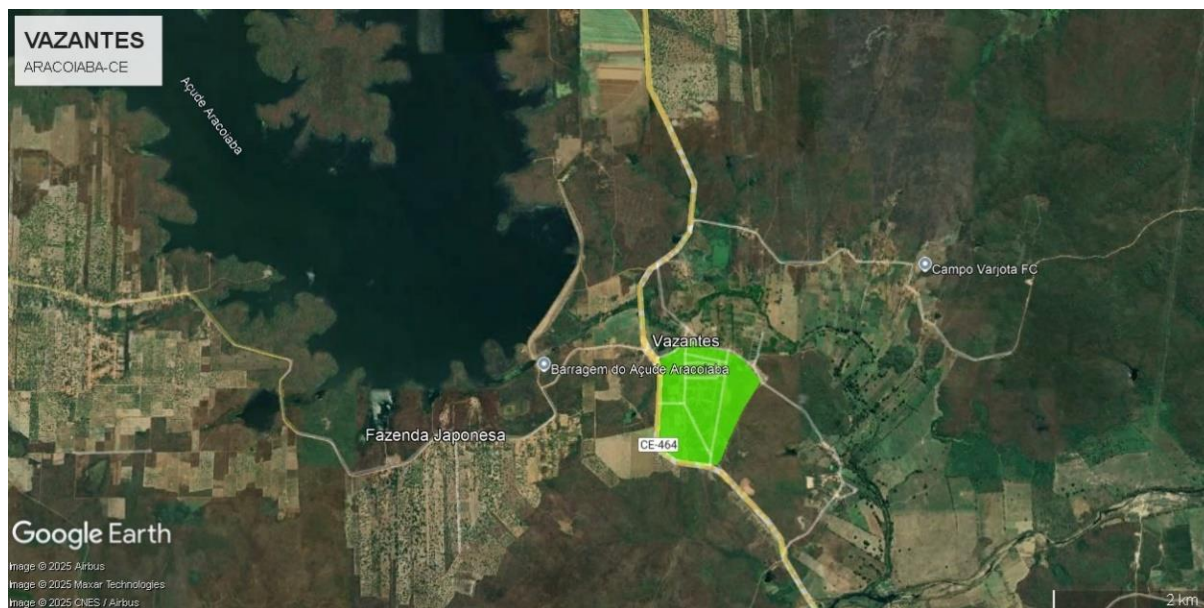
Figura 14 – Aracoiaba - CE (cor laranja)



Fonte: IPECE (2022).

Na figura 15, a localização do distrito de Vazantes é ilustrada, assim como sua posição no município de Aracoiaba.

Figura 15 – localização do distrito de Vazantes

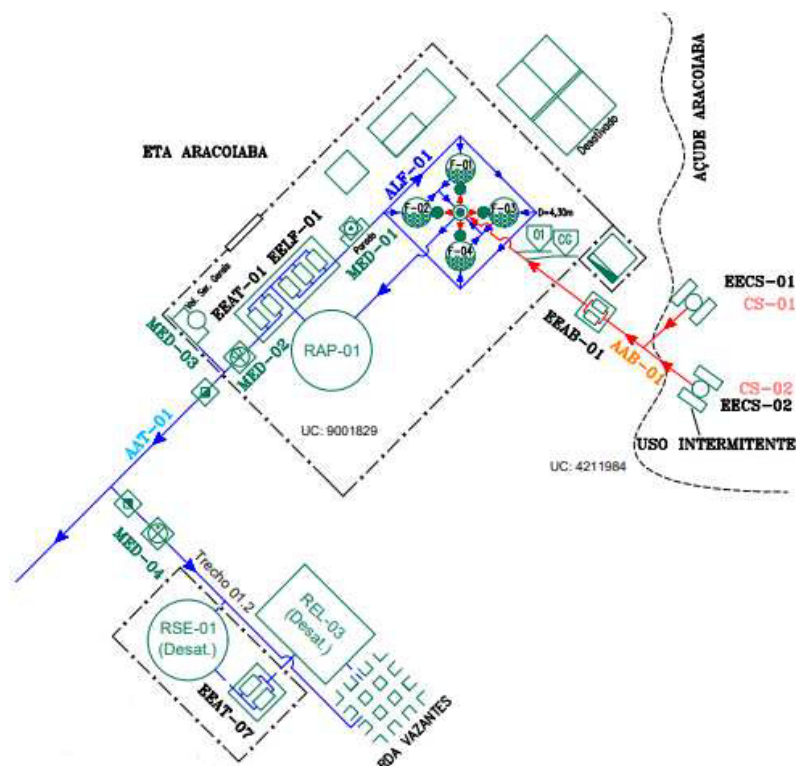


Fonte: Google Earth (2025).

Em sua estrutura organizacional, a CAGECE administra as diferentes regiões do estado do Ceará por meio da divisão do território em unidades de negócios. Com seu abastecimento de água gerenciado pela Unidade de Negócios da Bacia Metropolitana Oeste (UN-BMO), a água distribuída no distrito de Vazantes é captada no Açude de Aracoiaba, seguindo para tratamento na Estação de Tratamento de Água (ETA) Aracoiaba. Após o processo de tratamento, a água é conduzida por meio de bombeamento por meio de uma adutora de ferro fundido com diâmetro de 150 mm até a rede de distribuição do distrito, compondo o sistema de abastecimento responsável por atender a população local.

À luz dessas considerações, inicialmente, foi projetado e implantado um reservatório elevado e um reservatório semienterrado seguido por uma estação elevatória para operar entre a estação de tratamento e a rede de distribuição em Vazantes. No entanto, devido a problemas estruturais, esses reservatórios encontram-se atualmente desativados, sendo contornado por um by-pass realizado nas tubulações de entrada e saída. Posteriormente, na modelagem da rede, essa premissa será ilustrada com mais detalhes. Na figura 16 abaixo, o esquema de distribuição de água em Vazantes é ilustrado com a captação de água no Açude Aracoiaba, seguindo para tratamento na ETA Aracoiaba e posterior distribuição com os reservatórios desativados.

Figura 16 – Esquema de distribuição de água em Vazantes



Fonte: Cagece (2025).

3.2 Coleta de dados

Como etapa inicial da pesquisa, foi solicitado à CAGECE, responsável pelo sistema de abastecimento, o fornecimento de dados referentes ao cadastro técnico-operacional do distrito de Vazantes. As informações solicitadas incluíram especificações sobre os materiais das tubulações, diâmetros, componentes hidráulicos e demais elementos da rede de distribuição.

Os dados foram disponibilizados em um arquivo no formato .qgs, compatível com o software QGIS, permitindo a visualização georreferenciada da infraestrutura. No ambiente do QGIS, as tubulações e os componentes do sistema são representados graficamente em um mapa, estruturado por três setores e quadras, cada uma contendo suas respectivas informações técnicas e cadastrais. Esse levantamento foi fundamental para a caracterização da rede e posterior modelagem. Além disso, foram solicitados à CAGECE os dados de consumo micromedido e o número de ligações ativas referentes aos meses de outubro de 2024, janeiro de 2025 e março de 2025. A seleção desses períodos teve como critério a distribuição das informações ao longo de um semestre, contemplando o início, o meio e o final do intervalo analisado, com o objetivo de representar variações sazonais e obter uma média mais representativa dos consumos. Essas informações foram disponibilizadas em planilhas do Excel,

organizadas por quadras, seguindo a mesma divisão espacial adotada no mapa georreferenciado do QGIS, facilitando a análise espacial do consumo e contribuindo para a futura inserção dos dados no EPANET.

Com o objetivo de subsidiar a análise das perdas de água na região, foi solicitado à Unidade de Negócios da Bacia Metropolitana Oeste (UN-BMO) um levantamento da idade das tubulações, com base nas datas de instalação registradas no cadastro técnico até o ano de 2025 e a idade dos hidrômetros, assim como o período ideal de troca utilizado pela CAGECE. Além disso, foi requisitado um mapa termal contendo os registros de vazamentos ocorridos ao longo do ano de 2024. A primeira informação tem como finalidade identificar uma possível relação entre a antiguidade das tubulações e a ocorrência de perdas reais, enquanto o mapa termal busca localizar áreas críticas, contribuindo para a compreensão da distribuição espacial das perdas reais no distrito de Vazantes.

3.3 Comprovação de perdas

De posse dos dados de consumo micromedido, foram realizadas medições de vazão simultâneas em três pontos distintos ao longo da adutora que atende o distrito de Vazantes. O objetivo dessa etapa foi quantificar, in loco, o volume de água efetivamente distribuído no sistema e, a partir da diferença entre esse volume e o total consumido (micromedido), estimar a magnitude das perdas totais no Sistema de Abastecimento de Água (SAA).

A medição das vazões foi realizada no dia 24 de abril de 2025, no intervalo entre 11h30 e 15h00, utilizando três equipamentos Datalogger. A escolha desse período se baseou no histórico de consumo da região, o qual indica que esse intervalo corresponde aos momentos de maior demanda no sistema de distribuição. Essa informação foi confirmada pela CAGECE, por meio do padrão de consumo diário da população local, que será apresentado posteriormente na etapa de modelagem hidráulica do sistema.

O primeiro ponto de medição foi instalado imediatamente após a saída da Estação de Tratamento de Água (ETA), com o objetivo de registrar a vazão total distribuída pela adutora. O segundo medidor foi posicionado a montante dos primeiros pontos de consumo, em uma área onde já poderiam ocorrer perdas iniciais. Por fim, o terceiro medidor foi instalado próximo à entrada da rede de distribuição do distrito de Vazantes, logo antes das principais concentrações de consumo, permitindo aferir a vazão que efetivamente chega à área urbana atendida. Após essa aferição, os consumos micromedidos, disponibilizados pela CAGECE,

serão divididos em áreas urbanizadas e subtraídos de acordo com sua região para obtenção da quantidade de vazões perdidas no sistema.

3.4 Modelagem da rede

De posse do arquivo no formato *.qgs*, contendo o cadastro e o traçado do SAA do distrito de Vazantes, disponibilizado pela CAGECE, procedeu-se à transposição do sistema para o software EPANET. O desenho foi realizado manualmente, em escala, com o auxílio da plataforma Google Earth, respeitando o traçado original. Durante essa etapa, os nós foram inseridos ao longo da rede, conforme a evolução do traçado, buscando evitar longos trechos sem a presença de nós, o que favorece a precisão da modelagem hidráulica. Após a inserção dos nós do modelo hidráulico, foi adicionado um reservatório de nível fixo (RNF) no ponto inicial do sistema de distribuição, localizado imediatamente após a saída da Estação de Tratamento de Água (ETA) de Aracoíaba. Esse reservatório tem como função simular a energia disponível da água tratada no início da rede de distribuição, sendo representado no EPANET pelo valor do somatório entre a cota altimétrica do ponto e a pressão hidráulica medida no local. Nesta etapa, também, foi realizado o by-pass no reservatório desativado do SAA.

Na sequência, com base nos dados de consumo micromedido por quadra referentes aos três meses analisados (outubro de 2024, janeiro e março de 2025), foi calculada a média aritmética simples dos consumos mensais, expressa inicialmente em m³/mês. Para inserção desses valores no EPANET, os dados foram convertidos para litros por segundo (L/s). Em seguida, foi realizado o mapeamento da quantidade de nós inseridos em cada quadra, permitindo o cálculo da vazão média por nó, obtida pela divisão da vazão total da quadra pelo número de nós nela inseridos. Dessa forma, os consumos foram distribuídos de maneira uniforme entre os nós de cada quadra no modelo hidráulico. Por meio da equação 17, pode-se entender de forma mais didática a metodologia adotada:

Equação 17: Consumo por nó

$$\text{Consumo em cada nó} = \frac{\text{vazão média medida na quadra}}{\text{número de nós da quadra}}$$

Para configurar as cotas altimétricas dos nós no modelo hidráulico desenvolvido no EPANET, foi necessário realizar um procedimento utilizando dados do relevo da região de Vazantes. Inicialmente, a rede desenhada no EPANET foi exportada no formato de texto (.INP),

por meio da sequência: *Arquivo > Rede > Salvar como > arquivo .INP*. Em seguida, esse arquivo foi aberto no Bloco de Notas, e dele foram extraídas apenas as coordenadas X e Y de cada nó, salvando-se um novo arquivo no formato *.txt* contendo exclusivamente essas informações.

Na etapa seguinte, foi acessado o site TOPODATA, onde foi identificada e baixada a quadrícula correspondente à localização geográfica do distrito de Vazantes. No software QGIS, essa quadrícula foi adicionada como uma camada raster (*Camada > Adicionar Camada > Adicionar Camada Raster*). Para garantir a correta compatibilidade dos dados espaciais, o Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) do projeto foi ajustado para WGS 84, padrão utilizado pelo TOPODATA, enquanto o SRC da camada raster foi definido como SIRGAS 2000 / UTM Zona 24S.

Em seguida, o arquivo *.txt* com as coordenadas dos nós foi inserido como uma camada de texto delimitado no QGIS, sendo então convertido e salvo no formato shapefile. Com o complemento “Point Sampling Tool” disponível no QGIS (*Análises > Point Sampling Tool*), foi realizada a amostragem de dados altimétricos. Para isso, foram carregadas simultaneamente a camada de coordenadas dos nós (shapefile) e a camada raster de elevação. O resultado foi salvo como arquivo *.csv*, contendo, para cada ponto, a respectiva elevação do terreno.

Por fim, no software Excel, foi realizada a correspondência entre cada nó e sua cota altimétrica. Esses valores foram inseridos como uma nova coluna no arquivo de texto original do EPANET, associando cada elevação ao nó correspondente. O arquivo foi então salvo novamente no formato *.INP* e importado para o EPANET utilizando o comando *Arquivo > Importar > Rede*, concluindo assim a etapa de atribuição das cotas topográficas aos nós do modelo.

Para a obtenção do valor da pressão, foi realizado um ensaio de campo com o uso de um Datalogger, instalado no local durante um período contínuo de 24 horas, no dia 24 de abril de 2025. A partir dos dados coletados, foi calculada a pressão média registrada nesse intervalo. Em seguida, no EPANET, o valor da pressão média foi somado à cota altimétrica do nó correspondente, definindo assim o nível do reservatório de forma a representar adequadamente a condição real de operação no ponto de saída da ETA. Na figura 17, está ilustrado o modelo do Datalogger utilizado na aferição da pressão hidráulica.

Figura 17 – Modelo de Datalogger utilizado na aferição da pressão.



Fonte: Sanesoluti (2025).

Considerando que os consumos variam ao longo do dia, de acordo com os hábitos e necessidades da população, tornou-se necessária a realização de uma simulação dinâmica no EPANET, capaz de representar os picos e reduções de demanda durante um ciclo de 24 horas. Para isso, foi solicitado à CAGECE o padrão horário de consumo da região de Aracoiaba, fornecido em um arquivo no formato *.pat*, compatível com o software EPANET. Esse padrão foi incorporado ao modelo por meio da interface do programa, seguindo a sequência: *Dados > Padrões > Adicionar*. A inserção desse parâmetro permitiu que o modelo considerasse a variação temporal das vazões demandadas.

Por fim, entre as premissas adotadas no modelo hidráulico, destaca-se a utilização da fórmula Universal (Darcy-Weisbach) para o cálculo da perda de carga ao longo das tubulações, conforme configurado no ambiente do EPANET. Essa equação foi selecionada por sua ampla aplicação em sistemas de abastecimento de água pressurizados. Adicionalmente, para a simulação inicial, foi atribuída uma rugosidade uniforme a todos os trechos de tubulação, adotando-se o valor de 130 como coeficiente de rugosidade, a fim de padronizar a análise e facilitar a calibração posterior do modelo. Ressalta-se que, embora o sistema seja composto por tubulações em PVC Defofo e PVC convencional, optou-se pela adoção de um coeficiente único de rugosidade igual a 130 para todos os trechos, como premissa simplificadora da modelagem hidráulica.

Apesar de na Revisão Bibliográfica deste trabalho ter sido apresentada a fórmula para o cálculo das perdas de carga localizadas, é importante destacar que o software EPANET, utilizado como ferramenta de modelagem neste trabalho, não considera esse efeito de forma explícita em sua rotina de simulação. Apesar da existência do fenômeno, o modelo desenvolvido baseia-se apenas nas perdas de carga distribuídas ao longo das tubulações, calculadas a partir da equação de Darcy-Weisbach, não sendo incorporados ao sistema os efeitos adicionais gerados por conexões, válvulas e singularidades hidráulicas.

3.5 Simulação da rede

Com a finalização da transcrição do sistema de abastecimento de água, conforme o cadastro fornecido pela CAGECE, e após a inserção dos consumos nodais, cotas altimétricas, padrões de consumo horários e demais premissas operacionais no modelo, foi iniciada a simulação hidráulica no software EPANET. O principal objetivo dessa simulação foi identificar condições que favoreçam a ocorrência de perdas reais, como os vazamentos ao longo da rede. Para isso, a análise das pressões nos diferentes trechos do sistema foi adotada como parâmetro central na avaliação dos resultados, servindo de base para a identificação de áreas críticas suscetíveis a ocorrência de vazamentos.

Para facilitar a visualização e interpretação dos resultados da simulação, foi realizada uma configuração gráfica no EPANET, permitindo a identificação imediata de pontos com pressões fora dos limites normativos. Conforme os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 12218 (2017), as pressões mínimas e máximas admissíveis em sistemas de abastecimento são, respectivamente, 10 mca (metros de coluna de água) e 50 mca. Dessa forma, foram atribuídas cores específicas no modelo: os nós com pressões inferiores a 10 mca ou superiores a 50 mca foram configurados para serem exibidos na cor vermelha, indicando condições críticas, enquanto aqueles que se mantêm dentro da faixa normativa foram representados na cor azul, sinalizando condições adequadas de operação.

Além da simulação inicial utilizando apenas os dados de consumo micromedido fornecidos pela CAGECE, foi realizada uma segunda simulação, desta vez com a inclusão das vazões perdidas, previamente mensuradas por meio do ensaio realizado *in loco*. Essa etapa teve como objetivo ajustar o modelo para que as condições simuladas se aproximem da realidade operacional do sistema, representando com maior fidelidade o comportamento hidráulico observado na prática. Para representar as vazões perdidas no sistema dentro da simulação hidráulica, foi adotada a abordagem proposta por Rossman (2000), que prevê o uso de

dispositivos emissores no modelo para simular perdas em trechos da tubulação. No EPANET, esse recurso é incorporado por meio da atribuição de um coeficiente de emissor nos nós onde foram realizadas as medições *in loco* das vazões. Esse coeficiente foi utilizado para simular vazamentos localizados e distribuídos, sendo inserido diretamente na aba "Coeficiente do Emissor" de cada nó selecionado. O valor desse coeficiente foi calculado conforme a metodologia apresentada a seguir, de forma a refletir as vazões de perdas mensuradas no ensaio de campo.

Equação 18: Coeficiente do emissor

$$C = \frac{q}{p^y}$$

Onde:

C = Coeficiente do emissor;

q = Vazão perdida ou desconhecida entre trechos;

y = 0,5 para orifícios e bocais;

p = Pressão no local.

Para a validação do modelo hidráulico, foram instalados três dataloggers nos mesmos pontos utilizados anteriormente para a medição *in loco* das vazões. Os equipamentos permaneceram em operação por um período contínuo de 24 horas, com o objetivo de monitorar as pressões reais do sistema e, assim, permitir a comparação entre os valores simulados no EPANET e os dados observados em campo. Essa etapa foi essencial para verificar a confiabilidade e a representatividade do modelo em relação ao comportamento hidráulico real da rede.

Por fim, foi realizada a comparação entre o mapa termal de vazamentos, disponibilizado pela CAGECE com base nos registros do ano de 2024, e os resultados da simulação hidráulica no EPANET. O foco dessa análise foi identificar a correspondência entre os pontos da rede que apresentaram pressões superiores aos limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 12218:2017 (50 mca) e as áreas com maior incidência de vazamentos. Essa comparação teve como objetivo investigar a relação entre os elevados valores de pressão na rede e a ocorrência de perdas reais, contribuindo para a identificação de áreas críticas e para o embasamento técnico de ações de controle de pressão como estratégia de redução de perdas.

3.6 Soluções

Com base nos diagnósticos realizados no Sistema de Abastecimento de Água (SAA) e na identificação de fatores que contribuem para as perdas de água na região, serão propostas recomendações técnicas voltadas à mitigação da problemática. No caso das inconformidades observadas na simulação hidráulica, sobretudo os valores de pressão superiores aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 12218, serão realizadas novas simulações no modelo EPANET, com a inclusão de elementos de controle ou a modificação de parâmetros operacionais. O objetivo é ajustar o traçado da rede para que esteja em conformidade com os limites normativos, tornando-o menos suscetível à ocorrência de perdas reais, especialmente aquelas causadas por vazamentos.

Além das intervenções estruturais voltadas à redução das perdas físicas, serão também consideradas ações para mitigar as perdas aparentes, desde que identificadas e comprovadas ao longo da análise. Nesse sentido, serão propostas alternativas viáveis e adaptadas ao contexto local, visando a melhoria do cenário geral do sistema. Todas as recomendações levarão em conta critérios de viabilidade técnica e econômica, priorizando soluções sustentáveis, que exijam o mínimo possível de escavações e modificações de grande porte na rede existente, e que não comprometam o fornecimento regular de água à população durante sua implementação.

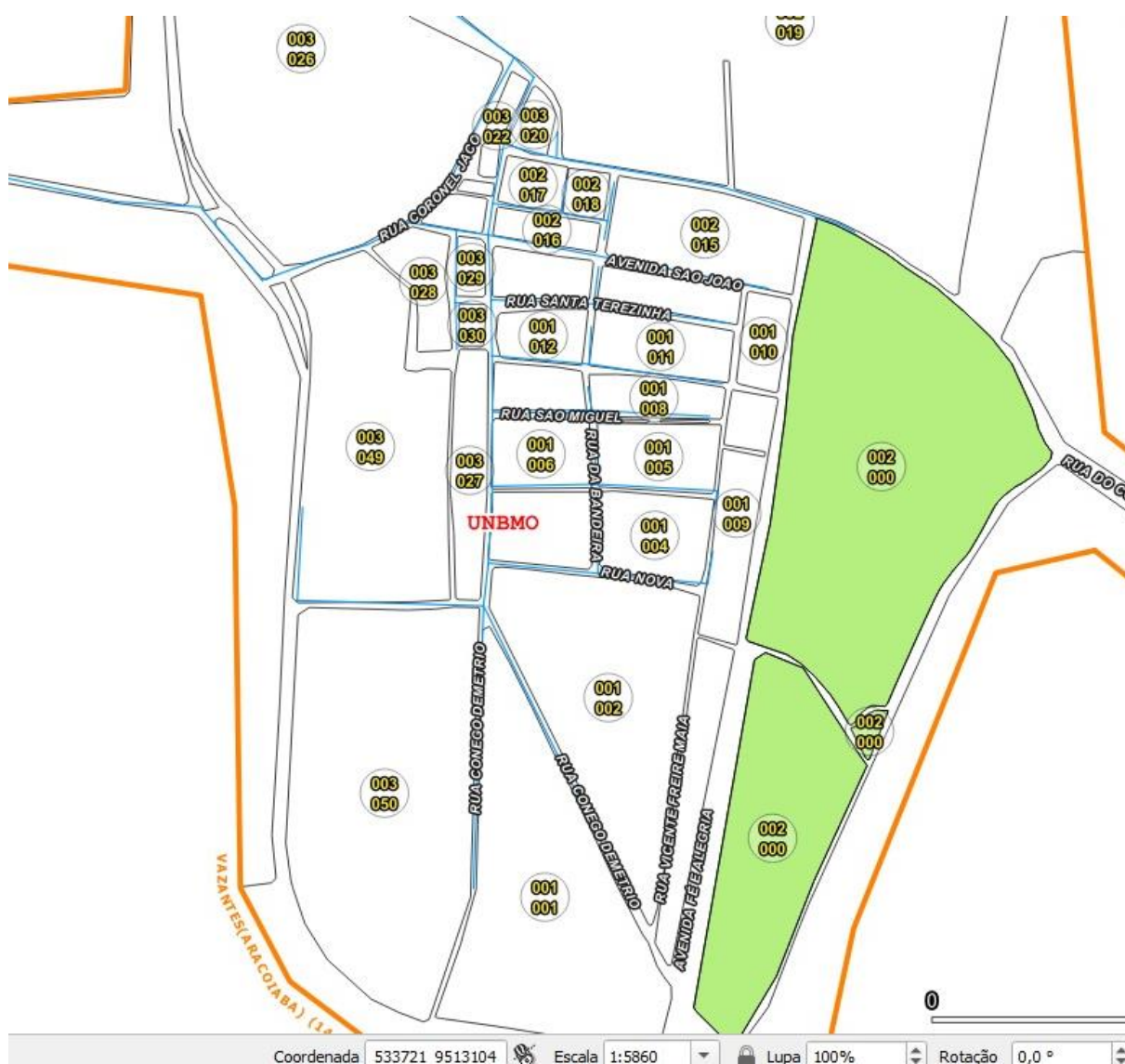
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise dos dados obtidos

4.1.1 Cadastro e consumos

Inicialmente, todo o cadastro técnico-operacional do sistema de abastecimento foi disponibilizado pela CAGECE no formato .qgs. Na Figura 18, observa-se a visualização do sistema dentro da interface do QGIS, com destaque para a zona urbana do distrito de Vazantes. É possível identificar a divisão da área por quadras e a representação das tubulações, exibidas como linhas azuis sobre o mapa.

Figura 18 – Cadastro operacional da CAGECE em Vazantes-CE



Fonte: CAGECE (2025).

De acordo com as informações do cadastro técnico do sistema, foi possível identificar os materiais e os diâmetros das tubulações que compõem a rede de abastecimento. O trecho que interliga a Estação de Tratamento de Água (ETA) de Aracoiaba à zona urbana de Vazantes é formado por uma adutora em PVC Defofo com diâmetro de 150 mm. Já dentro da área urbana do distrito, a rede de distribuição é composta exclusivamente por tubulações em PVC, cujos diâmetros variam entre 100 mm, 75 mm e 50 mm, dependendo da localização e da demanda atendida em cada setor.

Com base nas divisões por quadra, a Unidade de Negócios da Bacia Metropolitana Oeste (UN-BMO) disponibilizou os dados de consumo micromedido e o número de economias por quadra, referentes a um período de seis meses a partir da data de solicitação. As informações foram fornecidas em formato de planilha eletrônica (Excel), contendo os registros de consumo dos meses de outubro de 2024, janeiro de 2025 e março de 2025.

Para fins de modelagem, os valores mensais de consumo foram somados e divididos por três, resultando na média de consumo por quadra em m³/mês. Em seguida, essas médias foram convertidas para a unidade de litros por segundo (L/s), conforme exigido para inserção no modelo hidráulico no software EPANET.

Na Tabela 1, estão apresentadas as médias de vazão por quadra, já convertidas para L/s e prontas para aplicação na simulação do modelo.

Tabela 1 – Número de economias e consumos registrados em Vazantes entre outubro de 2024 e março de 2025

(continua)

Quadra	Economias	Média de Vazões medidas (m³/mês)	Médias de Vazões medidas (L/s)
1	106	586,66	0,2263
2	69	433,000	0,1671
3	37	211,667	0,0817
4	24	56,00	0,0216
5	24	161,33	0,0622
6	38	328,00	0,1265
7	27	98,667	0,0381
8	42	149,333	0,0576
9	16	113,333	0,0437

Tabela 1 – número de economias e consumos registrados em Vazantes entre outubro de 2024 e março de 2025

(continuação)

Quadra	Economias	Média de Vazões medidas (m³/mês)	Médias de Vazões medidas (L/s)
10	21	151,000	0,0583
11	39	181,667	0,0701
12	37	186,667	0,0720
13	42	204,667	0,0790
14	35	213,00	0,0822
15	39	313,667	0,1210
16	25	137	0,0529
17	24	148,667	0,0574
18	20	107,00	0,0413
19	54	296	0,1142
20	13	52,33	0,0202
21	4	6,333	0,0024
22	2	70,667	0,0273
23	1	0,00	0
24	2	0,00	0
25	1	12,667	0,0049
26	33	144,33	0,0557
27	91	512,33	0,1977
28	14	99	0,0382
29	10	68,33	0,0264
30	4	10,33	0,0040
31	3	0	0
32	31	164,667	0,0635
33	22	177,00	0,0683
34	8	49,00	0,0189
35	22	57,667	0,0222
36	1	0	0
37	0	0	0

Tabela 1 – número de economias e consumos registrados em Vazantes entre outubro de 2024 e março de 2025

(conclusão)

Quadra	Economias	Média de Vazões medidas (m³/mês)	Médias de Vazões medidas (L/s)
38	11	7,667	0,0030
39	2	0	0
40	64	446,667	0,1723
41	27	141,667	0,0547
42	74	417,667	0,1611
43	10	83,667	0,0323
44	25	146,667	0,0566
45	0	0	0
46	0	0	0
47	27	74,33	0,0287
48	29	141,333	0,0545
49	7	101,333	0,0391
50	2	26,000	0,0100

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

4.1.2 Idade das tubulações e hidrômetros

Como parte fundamental para a análise e gestão do controle de perdas, foi solicitado à CAGECE um levantamento da idade das tubulações instaladas e dos hidrômetros no sistema de abastecimento do distrito de Vazantes. Em diálogo com o gestor local da companhia, foi informado que, até o ano de 2008, a responsabilidade pela distribuição de água era da Prefeitura Municipal de Aracoiaba. A partir desse ano, a CAGECE assumiu a operação do sistema, realizando a substituição completa e gradativa das tubulações existentes.

O levantamento foi fornecido em formato de planilha eletrônica (Excel), contendo os anos de instalação de cada trecho da rede. A partir dessa base de dados, foi calculada uma idade média das tubulações de 13,9 anos, sendo o trecho mais antigo datado de 08 de janeiro de 2008.

Segundo o Instituto Brasileiro do PVC, “os produtos de PVC utilizados em construções ou obras públicas têm durabilidade média superior a 60 anos, podendo chegar a

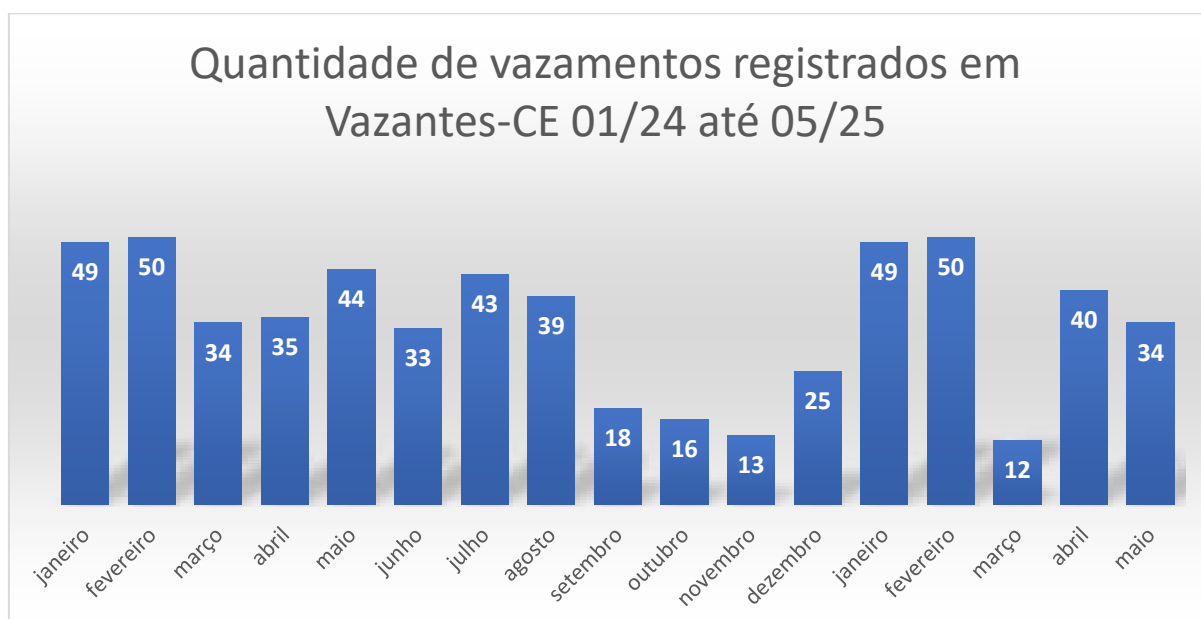
100 anos de utilização”. Diante disso, conclui-se que as tubulações em operação no distrito de Vazantes apresentam baixa idade e estão dentro da faixa considerada normal de vida útil, não sendo, portanto, um fator crítico isolado para a ocorrência de perdas relacionadas à deterioração por envelhecimento.

A partir da análise do relatório fornecido pela CAGECE, verificou-se que os hidrômetros instalados no distrito de Vazantes apresentam uma idade média de 4,5 anos. Esse valor está acima do limite recomendado pela própria companhia, que adota como referência o prazo de 3,8 anos para substituição dos medidores, período considerado crítico para a manutenção da precisão e confiabilidade das medições. A superação desse limite indica um risco elevado de submedição, uma vez que hidrômetros envelhecidos tendem a apresentar falhas na aferição dos volumes consumidos. Nesse cenário, embora haja efetivo consumo de água, parte dele pode não estar sendo registrado adequadamente, caracterizando perdas aparentes.

4.1.3 Vazamentos

Inicialmente, foram disponibilizados pela CAGECE os registros de vazamentos confirmados e reparados no Sistema de Abastecimento de Água de Vazantes, no período compreendido entre janeiro de 2024 e maio de 2025. As informações foram fornecidas em formato PDF. Esses registros foram organizados e resumidos graficamente para melhor visualização e interpretação, conforme apresentado no Gráfico 3.

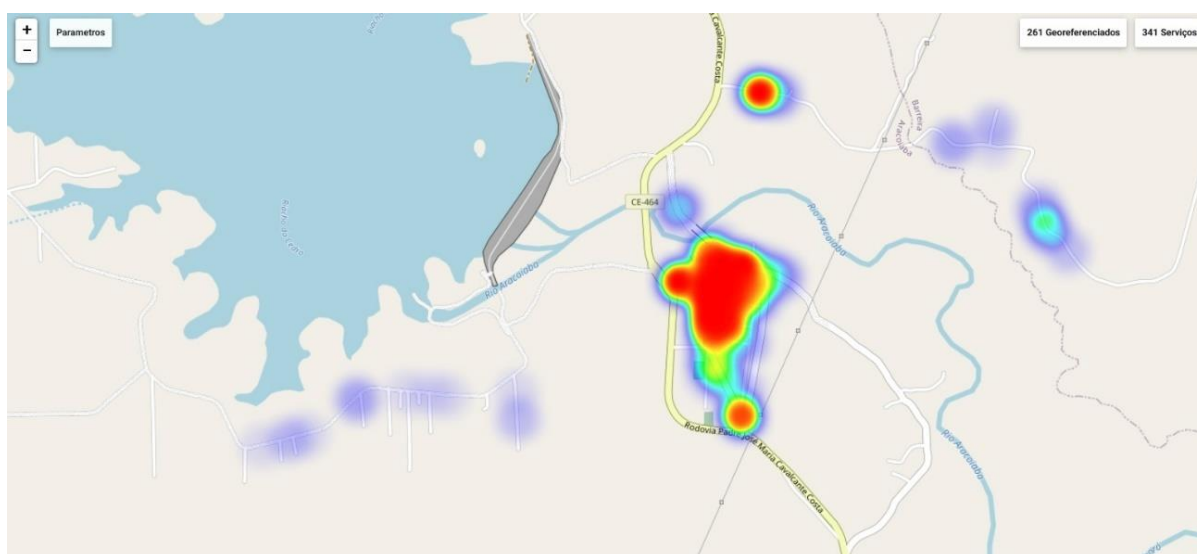
Gráfico 3 – Quantidade de Vazamentos em Vazantes



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

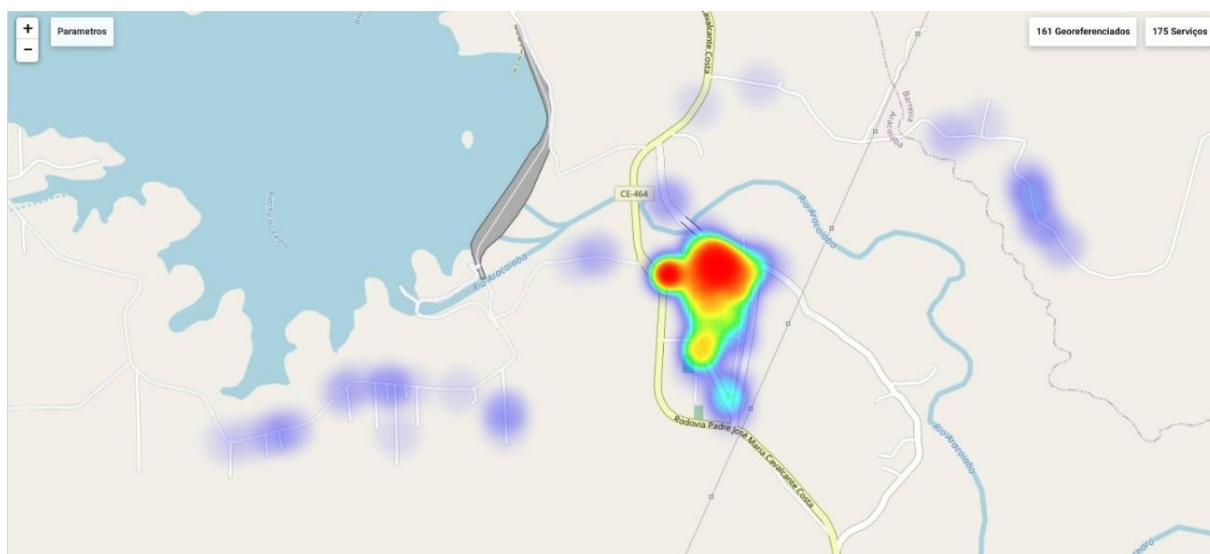
Com uma média mensal superior a 34 vazamentos, o que representa mais de um registro por dia, os dados se destacam pela magnitude do problema, principalmente quando considerados em relação ao número de economias e à população atendida no distrito de Vazantes. Para além da quantidade absoluta de vazamentos, torna-se essencial a análise da distribuição espacial e da frequência dos casos registrados, a fim de identificar áreas críticas com maior propensão à ocorrência de perdas reais. Para isso, dois mapas temais com a incidência dos vazamentos no mesmo período do estudo acima foram disponibilizados e ilustrados na imagem 19 imagem 20 e imagem 21.

Figura 19 – Mapa temal de vazamentos registrados entre janeiro de 2024 e outubro de 2024



Fonte: CAGECE (2025).

Figura 20 – Mapa temal de vazamentos registrados entre outubro de 2024 e maio de 2025



Fonte: CAGECE (2025).

Figura 21 – Ampliação do mapa termal de vazamentos registrados entre outubro de 2024 e maio de 2025



Fonte: CAGECE (2025).

Embora os vazamentos estejam distribuídos em diversos pontos da rede de abastecimento, observa-se uma concentração mais significativa na porção norte da zona urbana de Vazantes. Essa tendência pode ser visualizada na Figura 21, que evidencia uma área crítica quanto à ocorrência de perdas reais. Diante desse cenário, essa região será objeto de análise específica no modelo hidráulico, com o objetivo de identificar possíveis fatores que possam estar contribuindo para a elevada incidência de vazamentos.

4.2 Comprovação das perdas in loco

Com a instalação dos três dataloggers (conforme ilustrado na Figura 22) para a medição simultânea de vazões, e considerando a divisão física entre as quadras urbanizadas da

área de estudo, todos os consumos micromedidos foram agrupados em duas regiões distintas. Na área azul, a soma dos consumos médios das quadras resultou em um total de 2,309 m³/h, enquanto na área verde, esse valor foi de 7,555 m³/h. A Figura 23 apresenta a delimitação dessas áreas e seus respectivos consumos registrados em hidrômetros residenciais. Observa-se ainda que os dataloggers 2 e 3 foram instalados imediatamente a montante das regiões azul e verde, respectivamente, permitindo uma análise precisa da água efetivamente distribuída para cada setor.

Figura 22 – Pontos de instalação para medição de vazão



Fonte: Google Earth (2025).

Figura 23 – Divisão de áreas de consumos micromedidos



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Nesse contexto, a medição simultânea das vazões, realizada no dia 24 de abril de 2025, no intervalo entre 11h30 e 15h00, por meio dos três dataloggers instalados, resultou nos valores médios apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Média de vazões aferidas nos três medidores

Ponto de aferição	Q(m³/h)
1	27,32
2	26,46
3	19,03

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

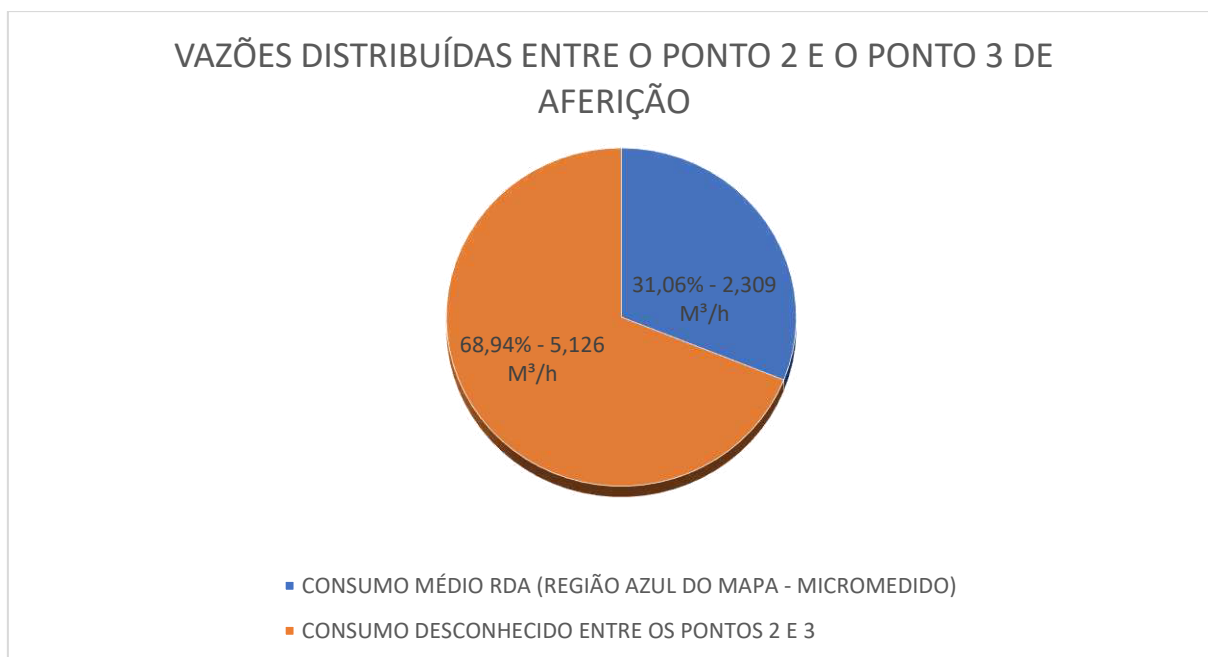
Diante desse cenário, a soma dos consumos médios micromedidos nas áreas azul e verde resultou em uma vazão total de 9,864 m³/h. Considerando que a vazão média medida na saída da ETA Aracoiaba (ponto de aferição 1) foi de 27,32 m³/h, valor que representa o volume total de água distribuído ao sistema, ao subtrair os consumos micromedidos desse total, obtém-se um volume de 17,458 m³/h de água sem destino conhecido. Esse valor indica um índice de perdas no sistema de 63,90%, comprovando a alta taxa de perdas apresentadas nos relatórios da CAGECE.

Ao realizar a análise segmentada por trechos, observa-se que entre os pontos de medição 2 e 3, correspondente à área azul, foi registrada uma diferença de vazão de 7,435 m³/h. Considerando o consumo micromedido de 2,309 m³/h nessa área, tem-se um consumo não identificado de 5,126 m³/h, o que representa um índice de perdas de 68,94% nesse trecho.

Na área verde, ou seja, após o ponto de medição 3, a vazão aferida foi de 19,03 m³/h, enquanto o consumo micromedido totalizou 7,555 m³/h, resultando em uma diferença de 11,470 m³/h. Embora o índice de perdas nessa região seja de 60,29%, inferior ao da área azul, o volume absoluto de perdas é consideravelmente maior, caracterizando a área verde como a região mais crítica do sistema e, portanto, prioritária para a implementação de medidas corretivas e intervenções estruturais.

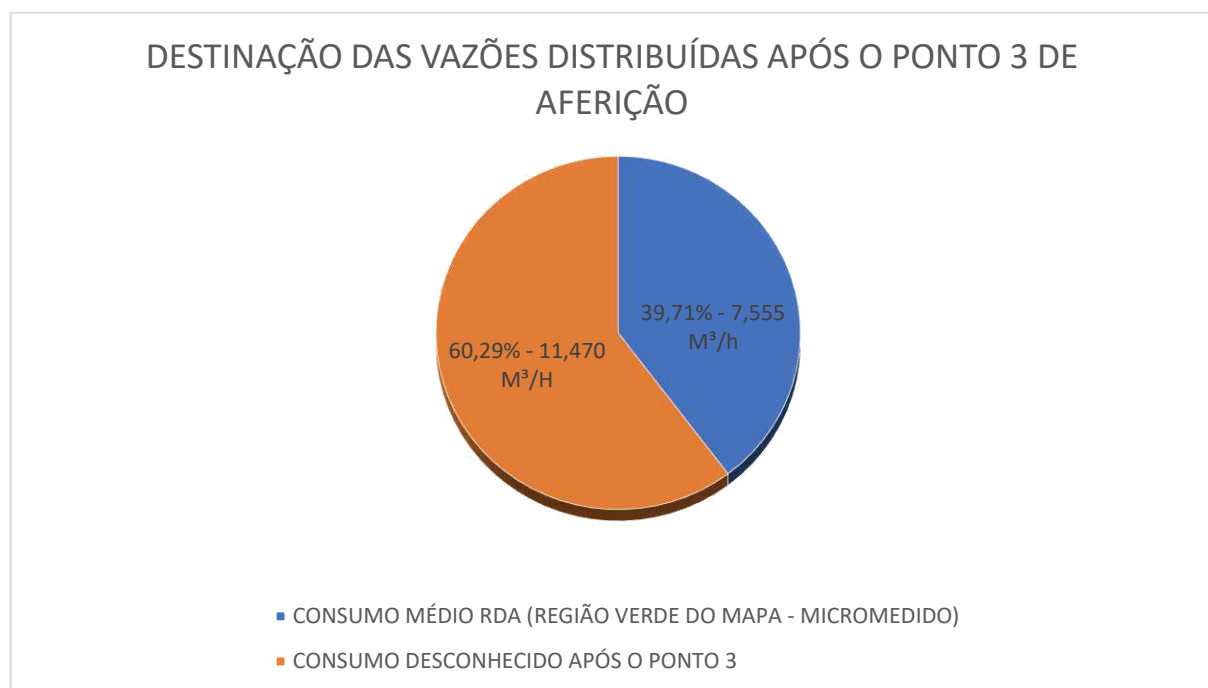
Por meio dos gráficos 4 e gráfico 5, as vazões e o índice de perdas nos dois trechos são ilustrados:

Gráfico 4 – Vazões distribuídas entre o ponto 2 e o ponto 3 de aferição



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Gráfico 5 – Vazões distribuídas após o ponto 3 de aferição



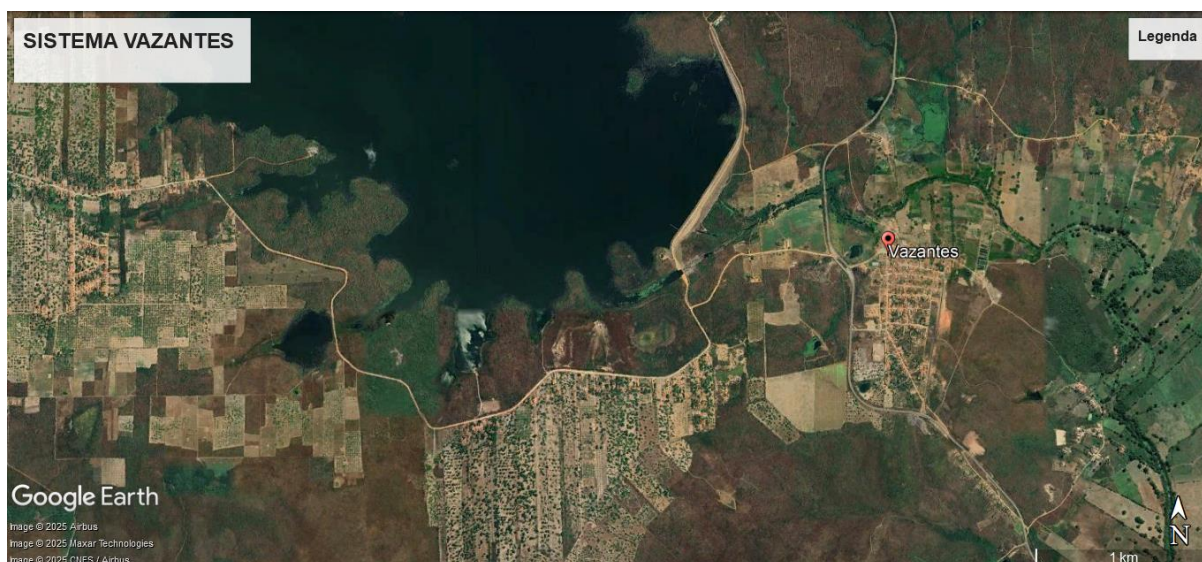
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3 Modelagem da rede

4.3.1 Desenho do sistema no EPANET

Para viabilizar a transcrição do sistema de abastecimento de Vazantes, conforme registrado no cadastro técnico da CAGECE, para o ambiente do software EPANET, inicialmente foi realizada a extração da imagem do mapa da área de interesse, contendo toda a rede de tubulações. A imagem foi obtida a partir do Google Earth e salva no formato .BMP, servindo como base georreferenciada para o redesenho do sistema no modelo hidráulico.

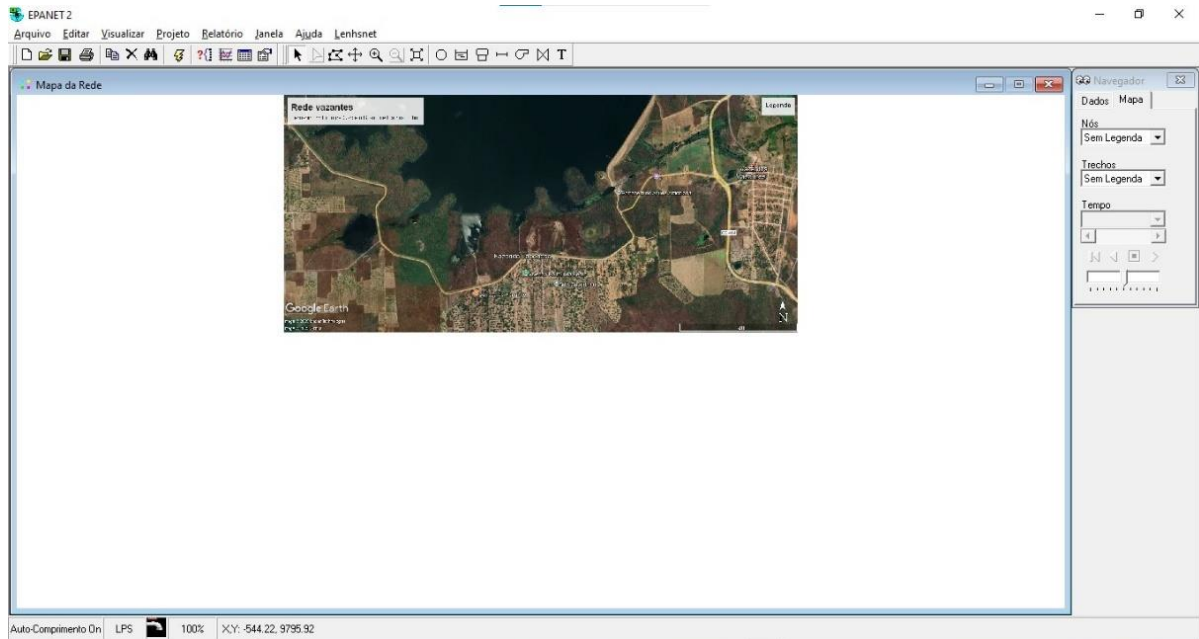
Figura 24 – Mapa de auxílio para transcrição no EPANET



Fonte: Google Earth (2025).

Em seguida, a imagem obtida foi importada para o EPANET como base de fundo para o modelo. Nesse momento, a imagem ainda não se encontrava em escala

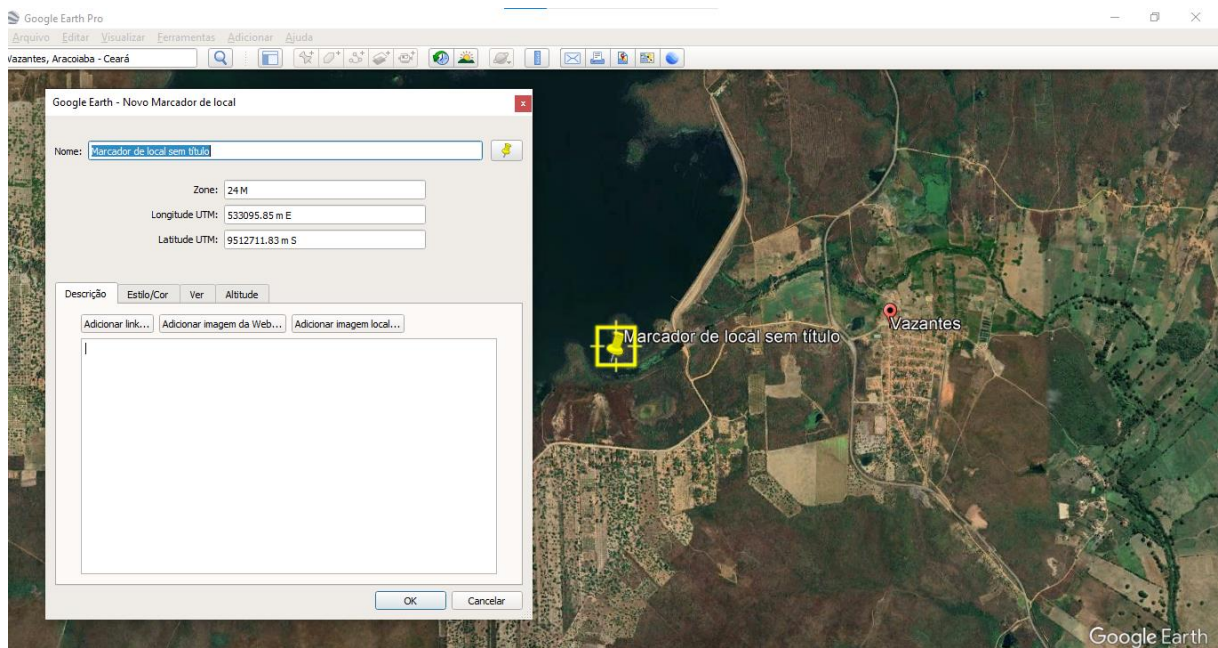
Figura 25 – Mapa do sistema no EPANET fora de escala



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para o ajuste de escala da imagem no EPANET, é necessário inserir as coordenadas reais nas quatro extremidades da área representada. Essas coordenadas foram obtidas por meio do Google Earth, onde se adicionou inicialmente um marcador no centro da imagem. A partir dessa inserção, o software fornece automaticamente o par de coordenadas geográficas (latitude e longitude) correspondentes ao ponto marcado

Figura 26 – Coordenadas do marcador central



Fonte: Google Earth (2025).

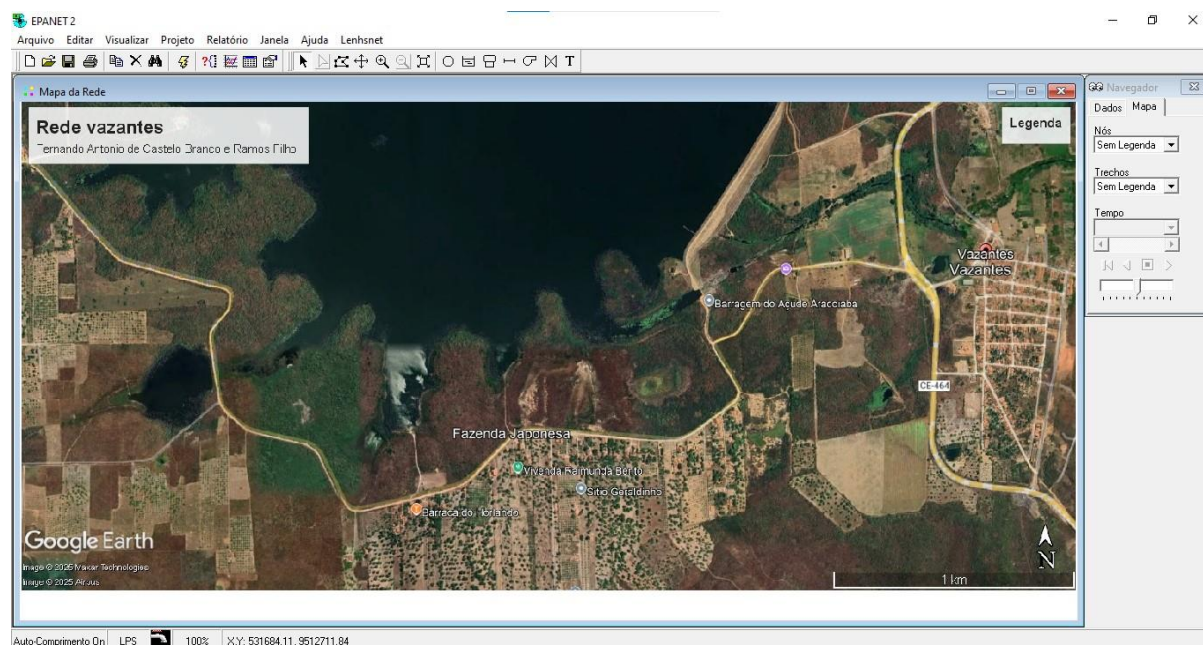
A partir dos valores de latitude e longitude do ponto central, foi possível estimar as coordenadas das extremidades da imagem. Para isso, somaram-se as distâncias nas direções horizontal (X) e vertical (Y), expressas em metros, até os quatro limites da imagem, permitindo assim a determinação das coordenadas aproximadas dos vértices. Essas informações foram utilizadas para ajustar corretamente a escala da imagem de fundo no ambiente do EPANET ilustradas na figura 27.

Figura 27 – Inserção das coordenadas das extremidades da imagem de fundo no EPANET

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A partir do ajuste, pode-se visualizar a imagem de fundo em escala, da seguinte forma:

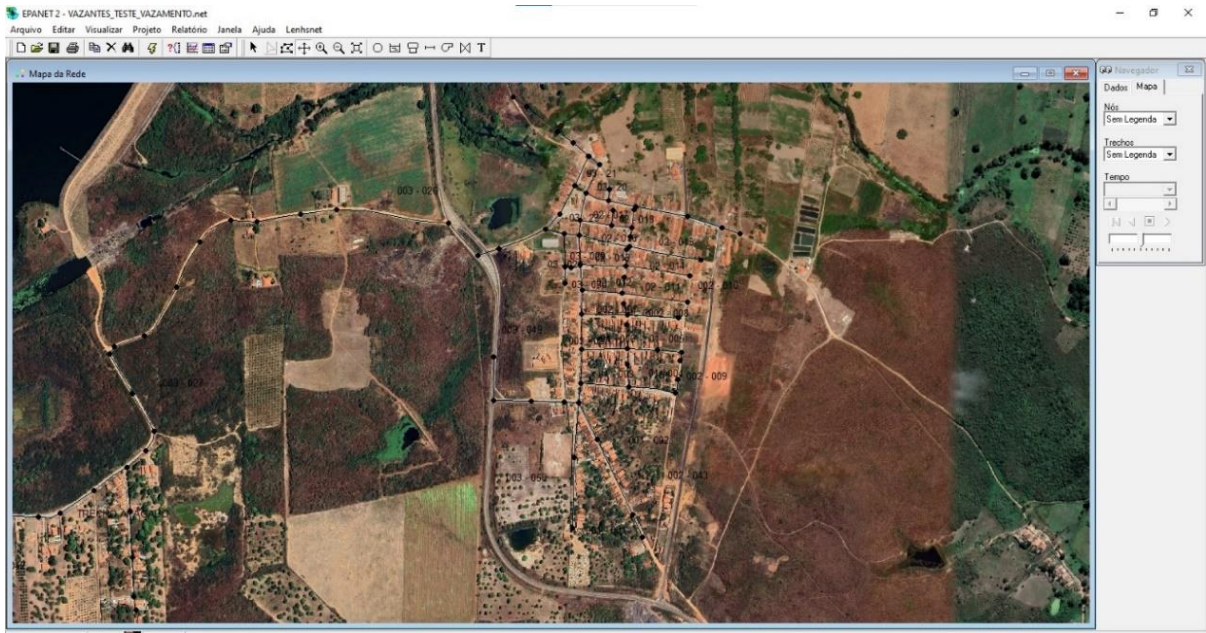
Figura 28 – Imagem de fundo em escala



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com base na imagem de fundo e na visualização do cadastro técnico, foi realizada a inserção dos nós da rede de distribuição no EPANET. Os nós foram posicionados de forma estrategicamente distribuída, acompanhando o traçado das tubulações, marcando as mudanças de direção e evitando longos trechos contínuos sem pontos de controle. Em seguida, foram traçados os trechos de ligação entre os nós, representando toda a extensão das tubulações do sistema. Também foram inseridos os elementos complementares: o reservatório de nível fixo (RNF) no início da adutora, que simula a saída da ETA Aracoiaba, e o reservatório elevado desativado, incluído para representar sua localização e função original no sistema.

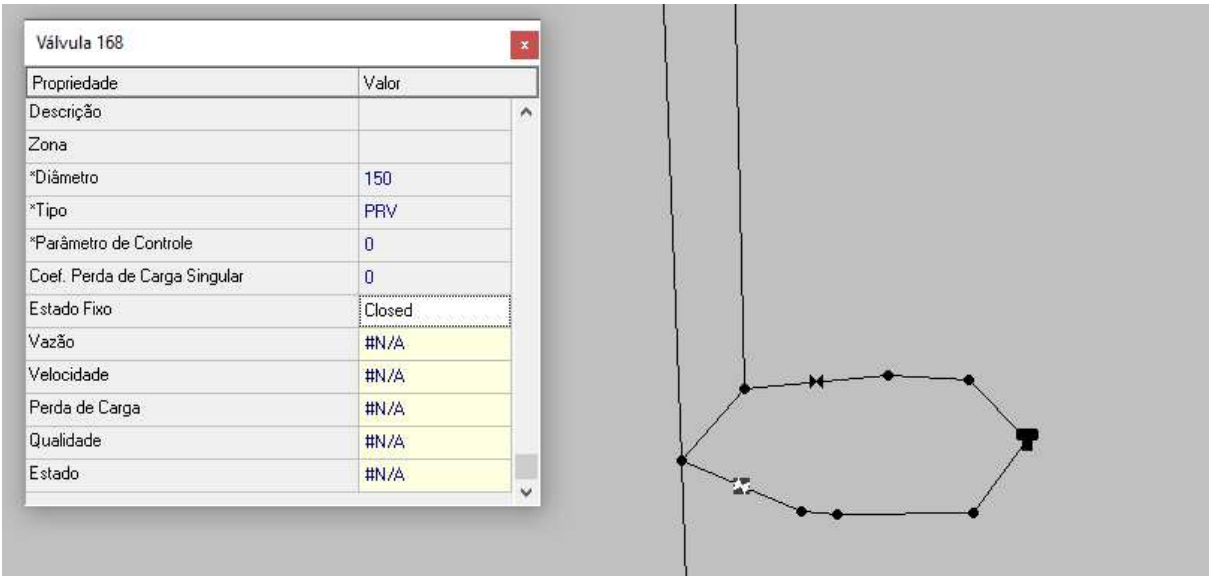
Figura 29 – Transcrição do sistema com auxílio da imagem de fundo



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Para representar adequadamente o reservatório desativado no modelo hidráulico, foi adotada a simulação de um by-pass. Essa configuração foi implementada com a inserção de duas válvulas fechadas nas conexões de entrada e saída do reservatório, impedindo o fluxo de água por esse caminho. A tubulação principal, por sua vez, foi modelada de forma contínua, contornando o reservatório sem adentrá-lo, o que garante a manutenção do trajeto real da distribuição, conforme observado na figura 30.

Figura 30 – By pass no reservatório desativado



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3.2 Inserção dos consumos

Para atribuir os consumos micromedidos aos nós do modelo hidráulico, utilizou-se como base os dados fornecidos pela CAGECE, organizados por quadra. A distribuição desses consumos foi feita de maneira proporcional, dividindo-se o volume total de consumo de cada quadra pelo número de nós inseridos naquela quadra, conforme representado na Equação 17. Dessa forma, os consumos dos 191 nós desenhados no sistema estão inseridos na Tabela 3.

Tabela 3 – Consumos nodais

(continua)

NÓS	CONSUMO (L/S)
1	0,01723
2 AO 32	0
33 AO 37	0,00683
38 AO 40	0
41 AO 45	0,01611
46 AO 48	0
49 AO 52	0,01611
53 AO 71	0,01333
72 AO 85	0,00761
86 AO 94	0,00033
95 AO 115	0,00824
117 AO 118	0,01485
119 AO 123	0,02666
124 AO 134	0
135	0,02064
136	0,00244
137	0,01012
138	0,02643
139	0,12101
140	0,14043
141	0,03948
142	0,01012
143 E 144	0,01910

Tabela 3 – Consumos nodais

(conclusão)

NÓS	CONSUMO (L/S)
145	0
146	0,00977
147	0
148 AO 150	0,00977
151	0
152	0,03601
153	0,07009
154	0,05761
155	0,01903
156 E 157	0
158	0,06327
159	0,06224
160	0,01457
161 E 162	0,01080
163	0
164 AO 167	0,10642
168 E 169	0,00502
170	0,06327
171	0,08166
172 E 173	0,01457
174 AO 182	0
183 E 184	0,01723
185	0,00683
186	0
187	0,00683
188	0,01723
189	0,00683
190	0,01611
191	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com o objetivo de otimizar o processo de inserção dos valores de consumo base nos nós do modelo hidráulico, evitou-se a alimentação manual ponto a ponto. Para isso, após salvar o projeto no EPANET, foi gerado automaticamente um arquivo no formato .INP, acessível por meio de um editor de texto como o Bloco de Notas. Nesse arquivo, localiza-se a seção correspondente às demandas (campo “Demand”) de cada nó. Assim, os valores calculados de consumo nodal, conforme apresentados na Tabela anterior, foram copiados e inseridos diretamente nessa coluna, respeitando a correspondência entre os nós e seus respectivos consumos. Ao salvar o arquivo, automaticamente o modelo é atualizado.

Figura 31 – Inserção dos consumos no Bloco de Notas

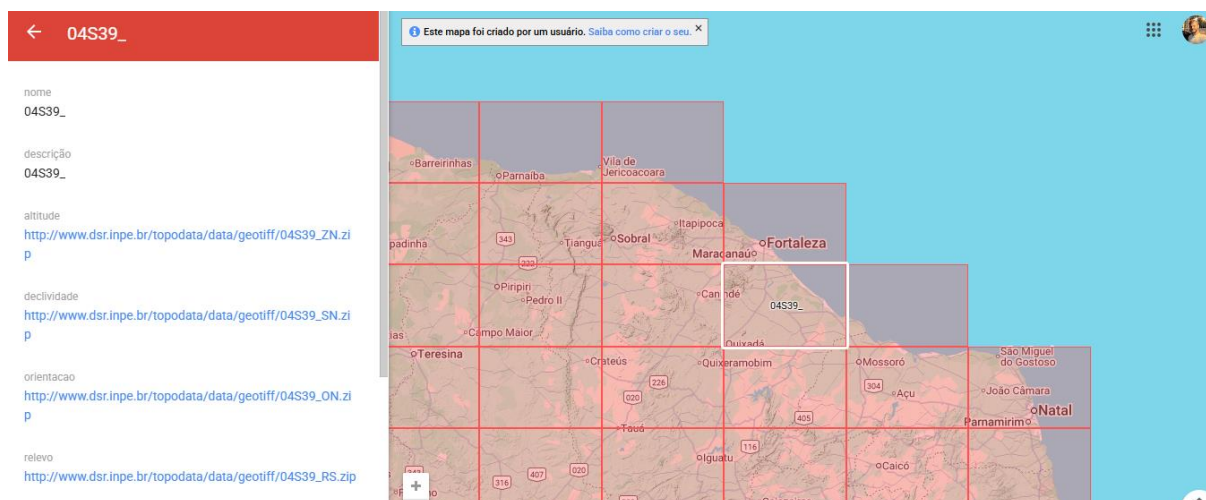
ID	Elev	Demand	Pattern
2	106.146	0.00000	
3	109.967	0.00000	
4	108.756	0.00000	
5	109.783	0.00000	
6	110.271	0.00000	
7	113.614	0.00000	
8	106.19	0.00000	
9	108.37	0.00000	
10	109.73	0.00000	
11	112.054	0.00000	
12	114.203	0.00000	
13	110.314	0.00000	
14	109.904	0.00000	
15	112.237	0.00000	
16	110.089	0.00000	
17	106.67	0.00000	
18	104.168	0.00000	
19	107.019	0.00000	
20	108.775	0.00000	
21	112.734	0.00000	
22	112.662	0.00000	
23	108.947	0.00000	
24	113.824	0.00000	
25	105.429	0.00000	
26	107.787	0.00000	
27	108.021	0.00000	
28	108.634	0.00000	
29	105.405	0.00000	
30	108.878	0.00000	
31	110.564	0.00000	
32	113.311	0.00000	
33	112.224	0.00683	
34	111.462	0.00683	
35	112.203	0.00683	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3.3 Cotas topográficas

Para a atribuição das cotas altimétricas a cada nó da rede modelada no EPANET, foi necessário sobrepor as curvas de nível às coordenadas planas do sistema. Para isso, inicialmente utilizou-se o site Topodata, onde foi identificada e selecionada a zona geográfica correspondente ao distrito de Vazantes. Em seguida, foi feito o download do quadrante raster no formato .tif contendo as informações de relevo e altimetria da área para posterior inserção no QGIS.

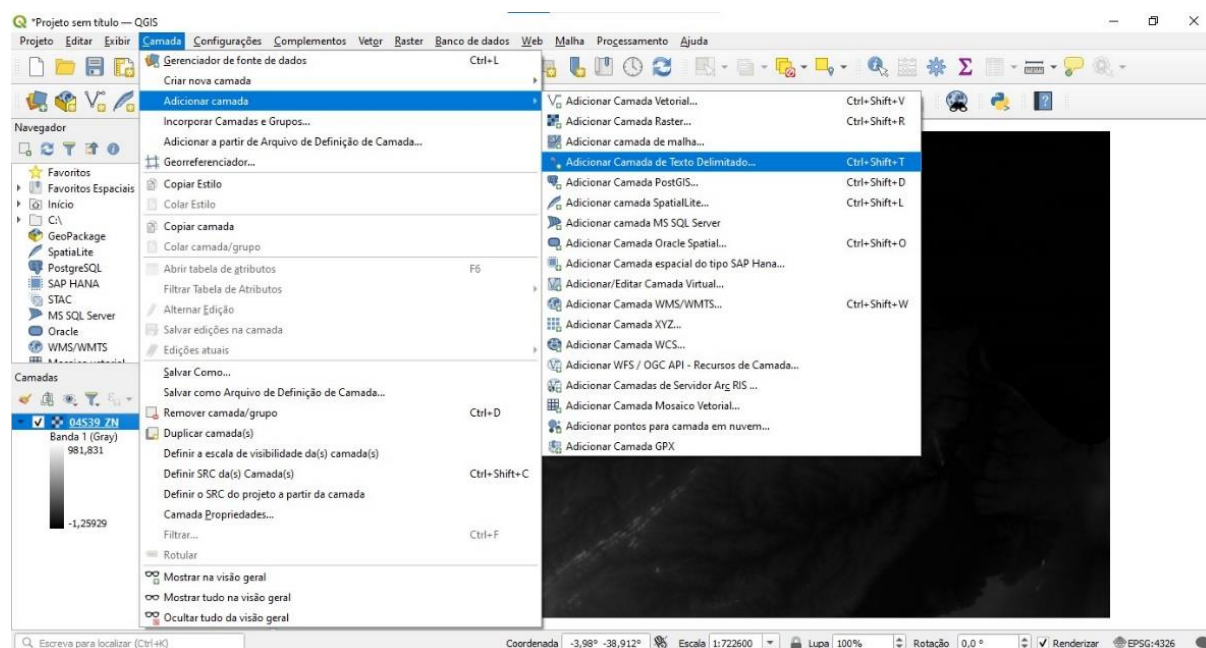
Figura 32 – Quadrante com as informações altimétricas no TOPODATA



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No software QGIS, a camada raster contendo as informações altimétricas, obtida no site TOPODATA, foi carregada no ambiente de trabalho. Em seguida, foi inserido o arquivo de texto exportado do EPANET, contendo exclusivamente as coordenadas X e Y dos nós do sistema de abastecimento. A sobreposição dessas informações permitiu a associação das cotas topográficas a cada ponto da rede, conforme ilustrado na Figura 33.

Figura 33 – Inserção das coordenadas do EPANET sobre a camada raster no Qgis

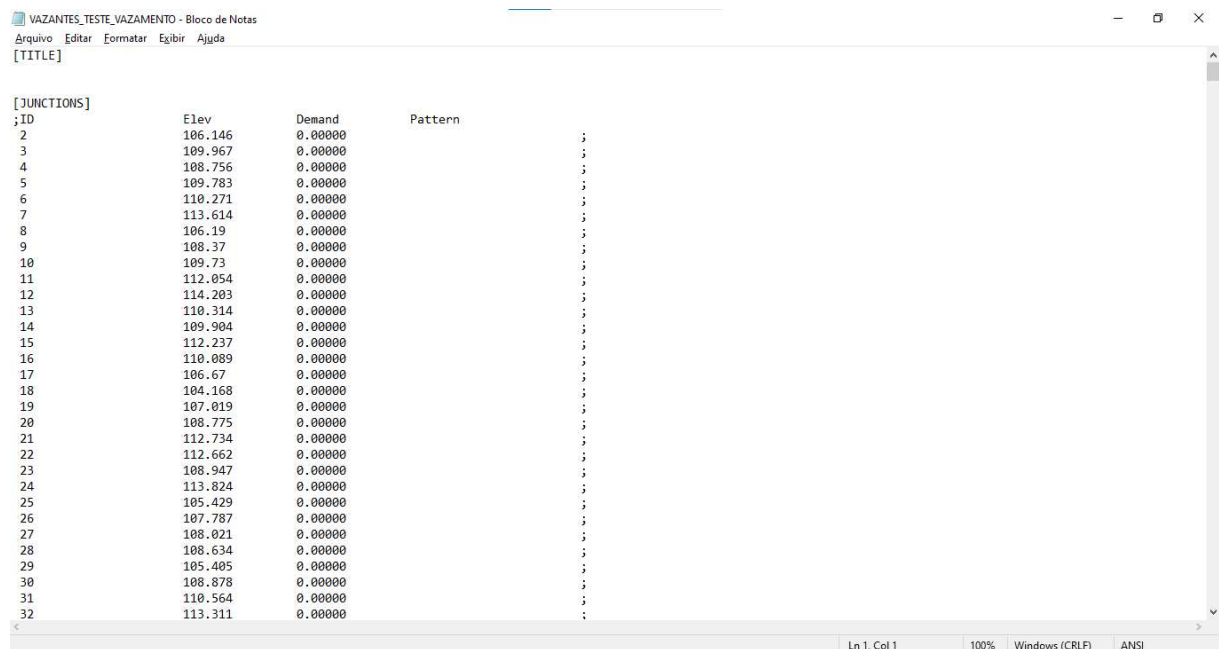


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Após a sobreposição das camadas no QGIS, os valores de elevação foram extraídos na mesma ordem das coordenadas xx e yy do arquivo gerado pelo EPANET. Esses dados foram

exportados em formato .csv e visualizados no Excel. Em seguida, os valores de altimetria foram copiados e inseridos como uma terceira coluna, denominada 'elev', no arquivo de texto do EPANET. Após essa edição, o arquivo foi salvo com a extensão .inp e reaberto no software. Como resultado, todos os nós do modelo passaram a conter suas respectivas cotas topográficas de forma automática. Na Figura 33, é possível visualizar a coluna de elevação inserida no arquivo de texto do EPANET, contendo os dados altimétricos obtidos por meio do QGIS. Já na Figura 34, observa-se a representação de um nó no ambiente do EPANET com sua respectiva cota topográfica corretamente atribuída, resultado da importação do arquivo no formato .INP.

Figura 34 – Coluna com os dados de elevação no arquivo texto do EPANET.



ID	Elev	Demand	Pattern
2	106.146	0.00000	;
3	109.967	0.00000	;
4	108.756	0.00000	;
5	109.783	0.00000	;
6	110.271	0.00000	;
7	113.614	0.00000	;
8	106.19	0.00000	;
9	108.37	0.00000	;
10	109.73	0.00000	;
11	112.054	0.00000	;
12	114.203	0.00000	;
13	110.314	0.00000	;
14	109.904	0.00000	;
15	112.237	0.00000	;
16	110.089	0.00000	;
17	106.67	0.00000	;
18	104.168	0.00000	;
19	107.019	0.00000	;
20	108.775	0.00000	;
21	112.734	0.00000	;
22	112.662	0.00000	;
23	108.947	0.00000	;
24	113.824	0.00000	;
25	105.429	0.00000	;
26	107.787	0.00000	;
27	108.021	0.00000	;
28	108.634	0.00000	;
29	105.405	0.00000	;
30	108.878	0.00000	;
31	110.564	0.00000	;
32	113.311	0.00000	;

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 35 – Exemplo de nó com sua respectiva informação altimétrica

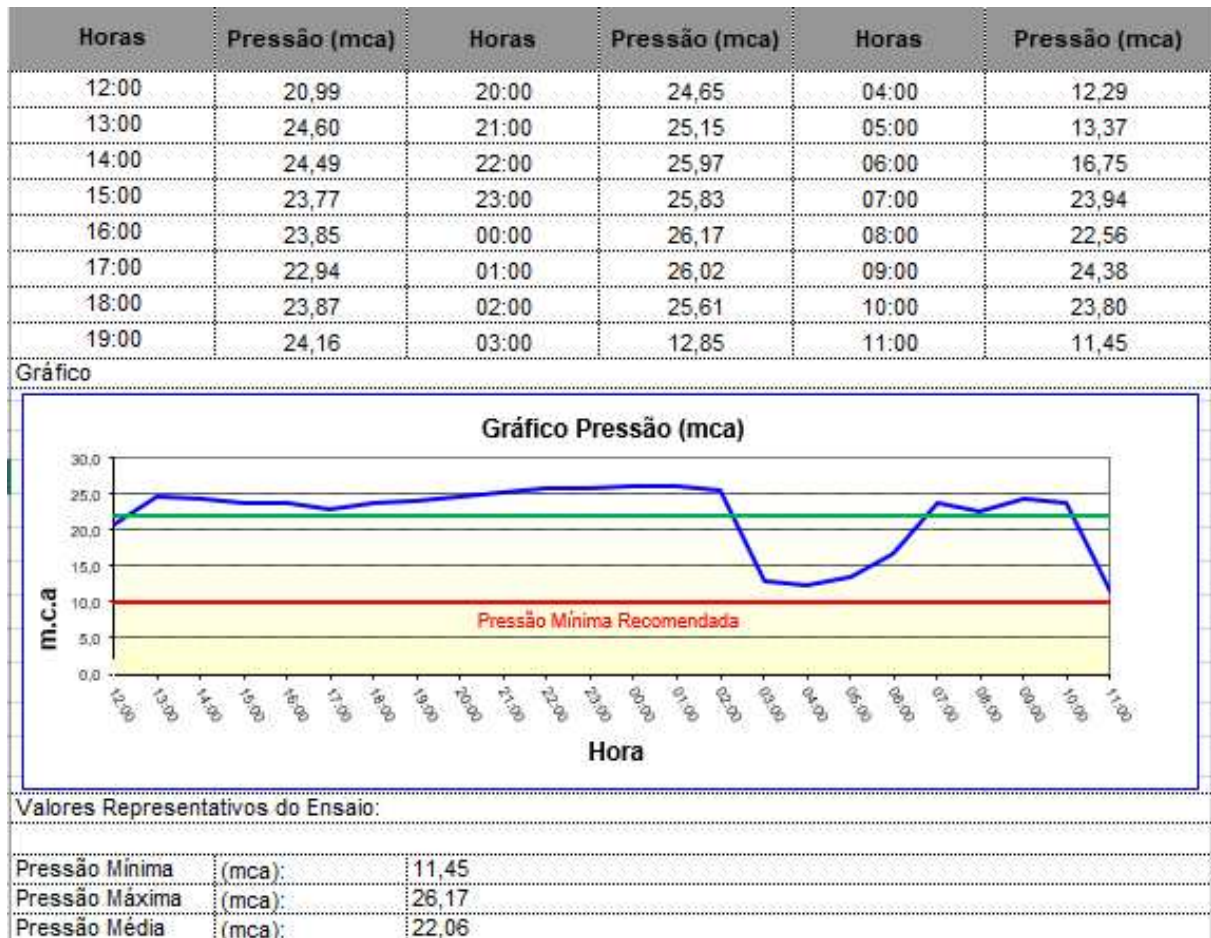
Nó 23	
Propriedade	Valor
*Identificador do Nó	23
Coordenada X	531887.81
Coordenada Y	9512176.96
Descrição	
Zona	
*Cota	108.947
Consumo Base	0.00000
Padrão de Consumo	
Categorias de Consumo	1
Coef. do Emissor	
Qualidade Inicial	
Origem de Qualidade	
Consumo Constante	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3.4 Ajuste do nível d'água no reservatório fictício.

Após a inserção das cotas altimétricas em cada nó do modelo, foi adicionado um reservatório de nível fixo (RNF) na entrada da adutora de Vazantes, com o objetivo de representar com precisão a carga hidráulica disponível nesse ponto. Para isso, somou-se a cota topográfica do local à pressão média registrada por um datalogger instalado no ponto de entrada. A medição foi realizada ao longo de 24 horas, no dia 24 de abril de 2025. Os resultados do ensaio estão apresentados na Figura 35.

Figura 36 – Ensaio de pressão realizado na entrada da adutora de Vazantes



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A partir da imagem, observa-se uma pressão média de 22,06 metros de coluna d'água (mca) registrada no ponto de entrada da adutora. Esse valor foi somado à cota altimétrica local, de 113,614 metros, resultando em um nível de água equivalente a 135,674 metros para o reservatório de nível fixo. Esse nível foi utilizado no modelo hidráulico para representar com precisão a energia disponível na entrada do sistema, conforme ilustrado na Figura 36

Figura 37 – Cota do nível d'água no reservatório do modelo



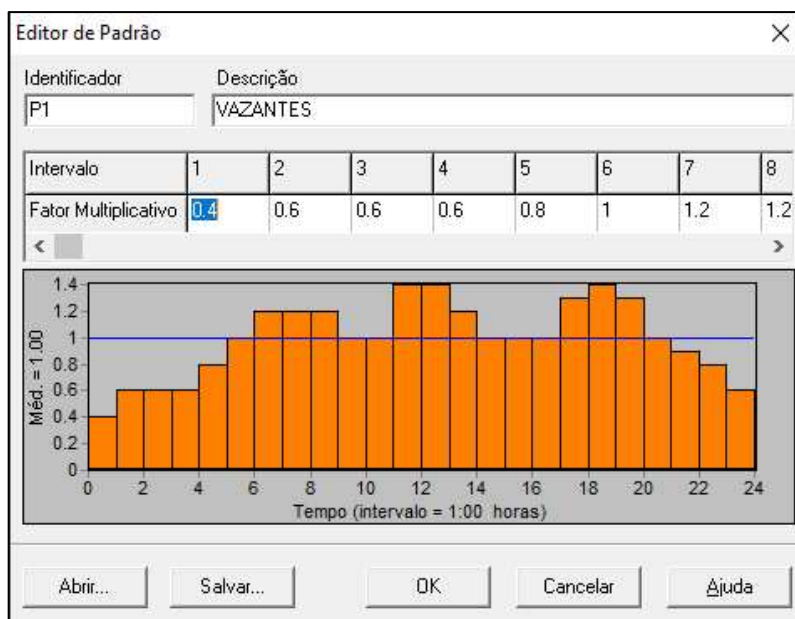
Propriedade	Valor
*Identificador do RNF	175
Coordenada X	530760,79
Coordenada Y	9513408,25
Descrição	COTA 113.614
Zona	
*Nível de Água	135.674
Padrão de Nível	
Qualidade Inicial	
Origem de Qualidade	
Balanco de Vazão	-5,92
Nível de Água	135,67
Pressão	0,00
Qualidade	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.3.5 Padrão de consumo

Para que a simulação hidráulica representasse de forma mais realista o comportamento do sistema ao longo do dia, considerando as variações no consumo de água, foi solicitado à CAGECE o padrão histórico de consumo horário da população de Vazantes. Como resposta, foi fornecido um arquivo no formato .pat, contendo as variações horárias de demanda do sistema. Esse arquivo foi inserido no modelo hidráulico por meio da aba 'Padrões' do EPANET, permitindo assim que os consumos dos nós variem conforme o comportamento real de uso ao longo das 24 horas do dia. As informações contidas no arquivo estão apresentadas na Figura 37.

Figura 38 – Padrão de consumo do modelo



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

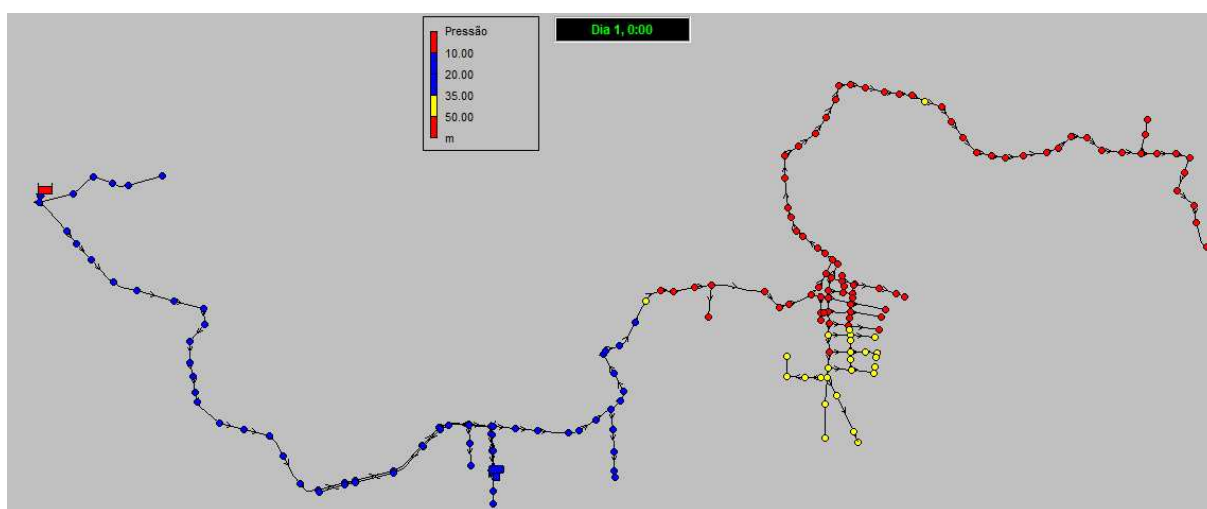
Cada barra do gráfico representa uma hora do dia, iniciando à meia-noite (00:00) e seguindo com intervalos de uma hora até completar as 24 horas. O gráfico apresenta os fatores multiplicativos aplicados aos consumos nodais durante a simulação dinâmica no EPANET. Esses fatores são utilizados para ajustar os valores de demanda ao longo do dia, com base no padrão de variação de consumo da população. Observa-se que os maiores consumos ocorrem entre 11h e 13h, e entre 18h e 19h, quando o fator atinge o valor máximo de 1,4. Por outro lado, durante a madrugada, entre 21h e 5h, os consumos diminuem significativamente, chegando ao valor mínimo de 0,4 à meia-noite. Essa variação reflete fielmente os horários de pico e de menor demanda do sistema de abastecimento.

4.4 Simulação da rede

Após a transcrição completa do sistema de abastecimento de água de Vazantes para o software EPANET, e a configuração do modelo com os dados topográficos, consumos nodais medidos, padrão de variação horária de consumo e pressão média na entrada do sistema, realizou-se a simulação hidráulica, com a visualização das pressões em cada nó da rede. Para facilitar a análise dos resultados, foi aplicada uma escala de cores baseada na norma ABNT NBR 12218, a qual estabelece os limites recomendados de pressão em sistemas de abastecimento. Dessa forma, inicialmente os nós com pressões inferiores a 10 metros de coluna d'água (mca) ou superiores a 50 mca foram destacados na cor vermelha, sinalizando situações

fora da faixa ideal de operação. As pressões compreendidas entre 35 e 50 mca foram representadas na cor amarela, indicando condições de operação elevadas, porém ainda dentro dos limites normativos. Já as pressões situadas entre 10 e 35 mca foram indicadas na cor azul, correspondendo à faixa considerada adequada para o funcionamento do sistema. Para a identificação dos momentos mais críticos na simulação dinâmica, foi considerado o padrão de consumo inserido no modelo, no qual o menor pico de consumo ocorre 0h e 1h, que resultaria em uma maior pressão no sistema. Com base nesses intervalos de maior demanda, selecionou-se a representação gráfica das condições hidráulicas do sistema inseridas nesse período. Nesse contexto, na figura 38, pode-se visualizar a simulação às 0 horas.

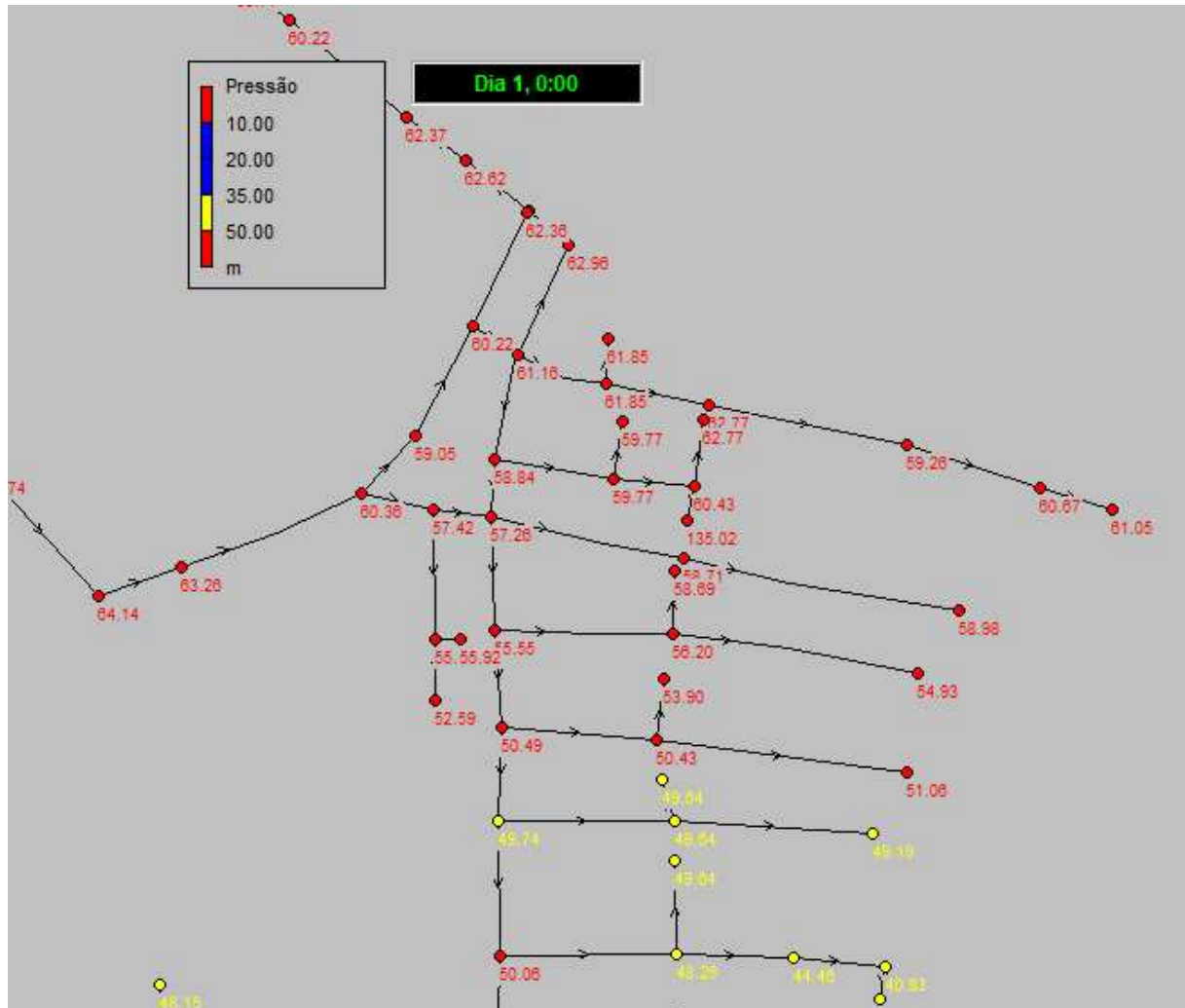
Figura 39 – Simulação Hidráulica às 0 horas com os consumos micromedidos



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

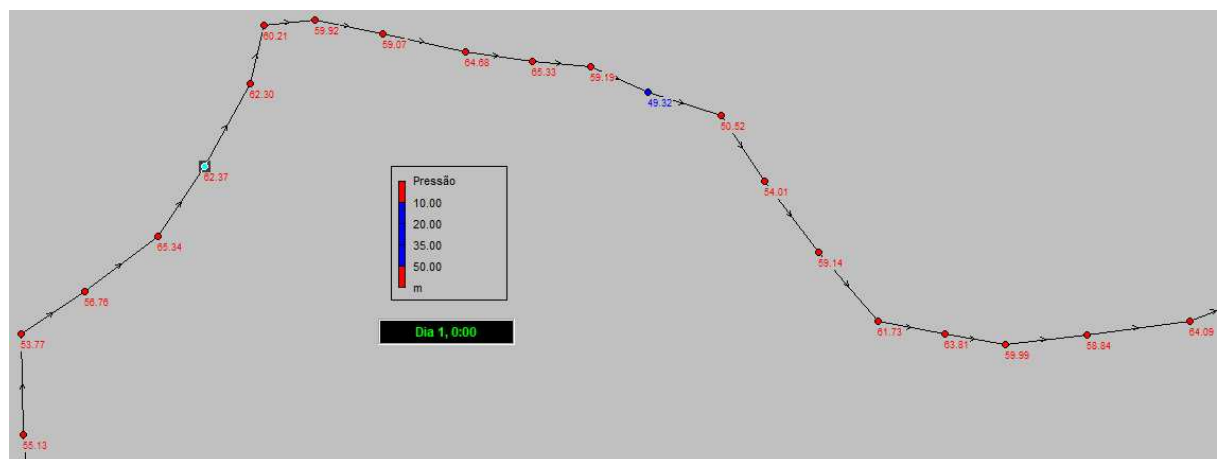
Na imagem apresentada, observa-se que o trecho entre a Estação de Tratamento de Água de Aracoiaba e o início da rede de distribuição em Vazantes apresenta, em geral, pressões dentro dos limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 12218. Da mesma forma, a região inferior da zona urbana também demonstra conformidade com a faixa recomendada de pressões. No entanto, ao analisar a entrada da área urbana e, sobretudo, sua porção mais elevada, verificam-se pressões fora dos limites normativos, indicando desconformidade com a regulamentação vigente. Nas figuras 39 e 40, a região crítica é ampliada e, assim, é possível visualizar os valores de pressões simulados.

Figura 40 – Simulação Hidráulica às 12 horas com os consumos micromedidos ampliada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 41 – Simulação Hidráulica às 12 horas com os consumos micromedidos ampliada, região superior



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Percebe-se, nas imagens, que os valores de pressão em diversos pontos na região estão acima do limite de 50 mca, indicando uma forte tendência a ocorrência de vazamentos e consequentemente de perdas de água.

Como as vazões medidas em campo apresentaram divergências em relação aos dados de consumo disponibilizados pela CAGECE, conforme identificado por meio das medições realizadas nos pontos de distribuição, essas diferenças foram incorporadas ao modelo utilizando a ferramenta de ‘coeficiente do emissor’. Para representar os consumos não contabilizados, foram selecionados dois nós no modelo hidráulico, localizados próximos aos pontos de medição 2 e 3. Em cada um desses nós, foi atribuído um coeficiente de emissor calculado a partir da equação 19. Assim, determinou-se o coeficiente do emissor 1, que representa as perdas não mensuradas entre os pontos de medição 2 e 3, e o coeficiente do emissor 2, correspondente aos consumos não identificados a jusante do ponto de medição 3

Equação 19: Coeficiente do emissor 1

$$C = \frac{q}{p^y}$$

$$C = \frac{1,424}{25,56^{0,5}} = 0,28166$$

Onde:

C = Coeficiente do emissor;

q = Vazão desconhecida entre trechos em l/s;

y = 0,5 para orifícios e bocais;

p = Pressão simulada no ponto.

Equação 20: Coeficiente do emissor 2

$$C = \frac{q}{p^y}$$

$$C = \frac{3,186}{58,40^{0,5}} = 0,4169$$

Onde:

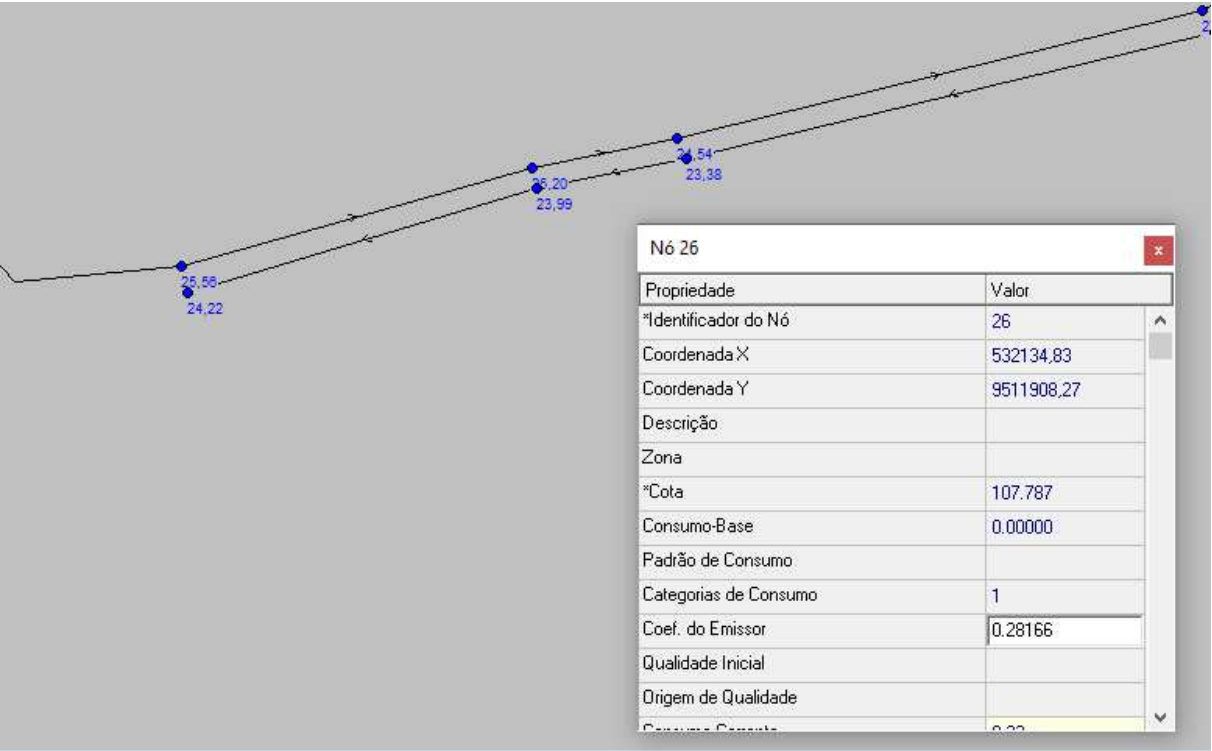
C = Coeficiente do emissor;

q = Vazão desconhecida entre trechos em l/s;

y = 0,5 para orifícios e bocais;

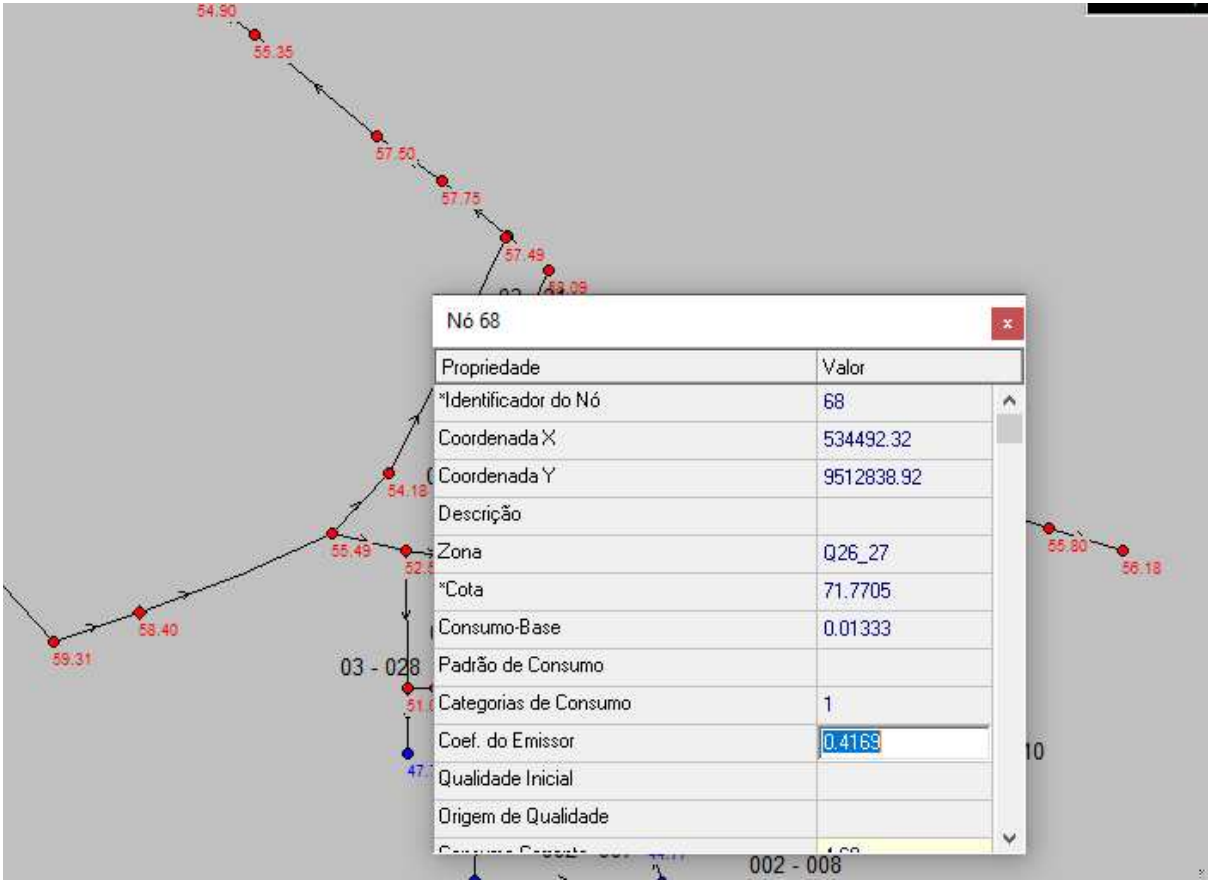
p = Pressão simulada no ponto.

Figura 42 – Inserção do Coeficiente do emissor 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

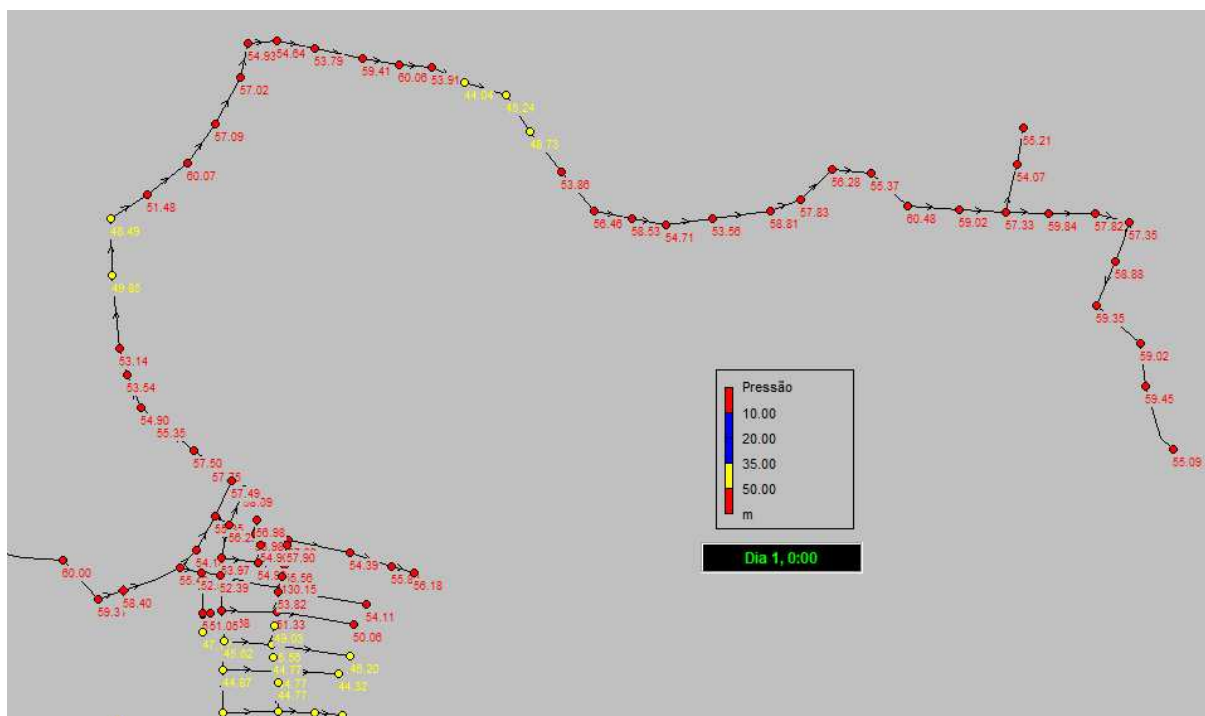
Figura 43 – Inserção do Coeficiente do emissor 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Ao simularmos novamente, chegamos aos seguintes resultados:

Figura 44 – Simulação com os consumos desconhecidos adicionados



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Apesar da redução geral das pressões na maioria dos nós do sistema, a inserção dos consumos desconhecidos, que refletem de forma mais fiel a demanda real da localidade, não foi suficiente para alterar significativamente o cenário de pressões elevadas nas mesmas regiões previamente identificadas como críticas. Dessa forma, essas áreas continuam apresentando valores fora dos limites estabelecidos pela norma.

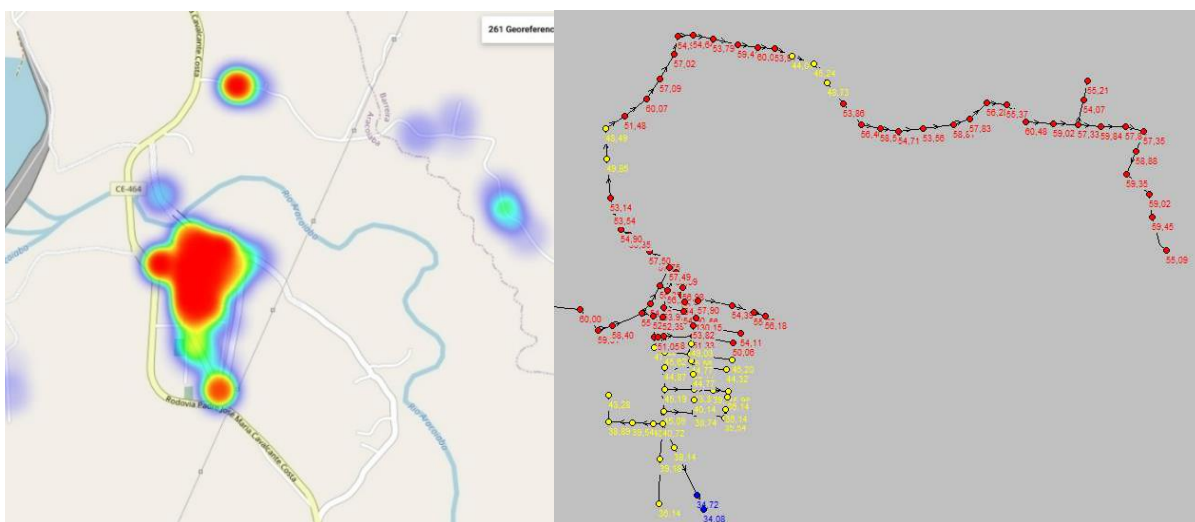
Para validar a aderência do modelo à realidade do sistema, os dados registrados pelos três dataloggers instalados em campo, com medições contínuas durante 24 horas, foram comparados aos resultados da simulação. O primeiro datalogger, posicionado na saída da ETA, como já abordado anteriormente, foi utilizado para estimar o nível d'água do reservatório fictício inserido no modelo. O segundo ponto de medição, correspondente ao local onde foi aplicado o coeficiente do emissor 1, apresentou pressão média de 25,02 mca, com pico de 29,60 mca. Na simulação, no horário de maior pressão (0h), o valor obtido foi de 25,56 mca, mostrando boa concordância com os dados reais.

Já no ponto de medição 3, onde foi inserido o coeficiente do emissor 2, a pressão máxima registrada em campo foi de 50,28 mca. No modelo, a pressão simulada às 0h foi de

58,40 mca, com pequenas variações ao longo do dia. Apesar da diferença entre as médias observadas e simuladas nesse ponto, os valores máximos, bem como a boa correspondência no ponto 2, indicam que o modelo apresenta resultados razoavelmente próximos da realidade, validando sua confiabilidade para análise do sistema.

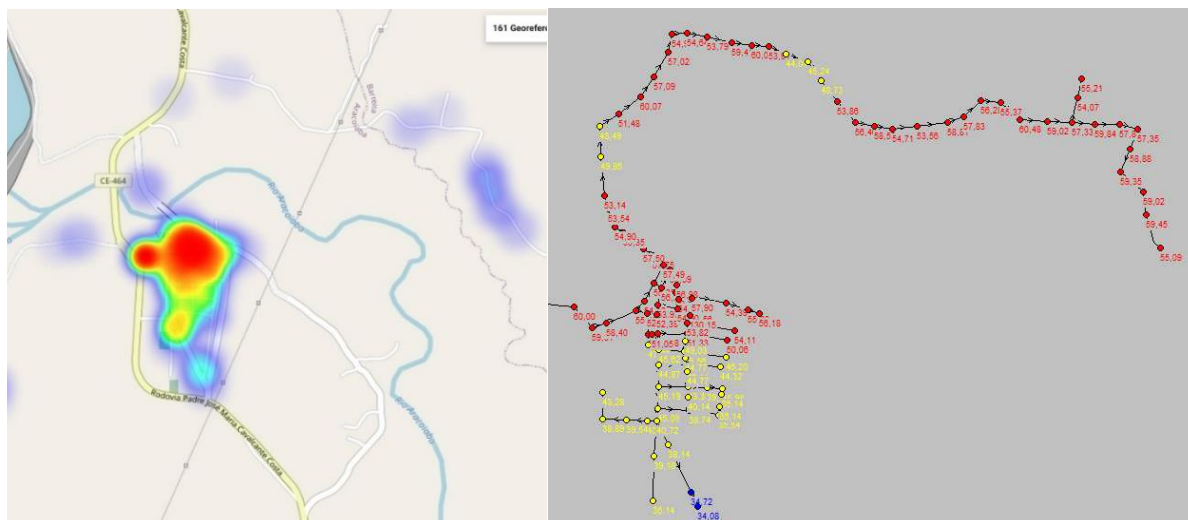
Ao comparar os resultados do modelo hidráulico com os mapas termais de vazamentos disponibilizados pela CAGECE, observou-se uma semelhança relevante entre as áreas com pressões acima dos limites estabelecidos pela norma e os locais com registros confirmados de vazamentos. Essa similaridade se destaca principalmente na região superior da área urbana de Vazantes, onde há maior concentração populacional e número de economias. Apesar de a saída de Vazantes, localizada na parte superior do modelo, também apresentar pressões elevadas na maioria dos nós, essa região possui baixa densidade populacional e menor concentração de economias. Por esse motivo, os registros de vazamentos, embora existentes, apresentam intensidade significativamente menor quando comparados ao setor mais adensado da zona urbana. Essa análise reforça a influência direta das pressões elevadas na ocorrência de vazamentos e perdas, especialmente em áreas com maior demanda.

Figura 45 – Comparação entre o mapa de vazamentos entre janeiro e outubro de 2024 com a simulação da rede



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 46 – Comparação entre o mapa de vazamentos entre outubro de 2024 e maio de 2025 com a simulação da rede



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.5 Propostas de solução

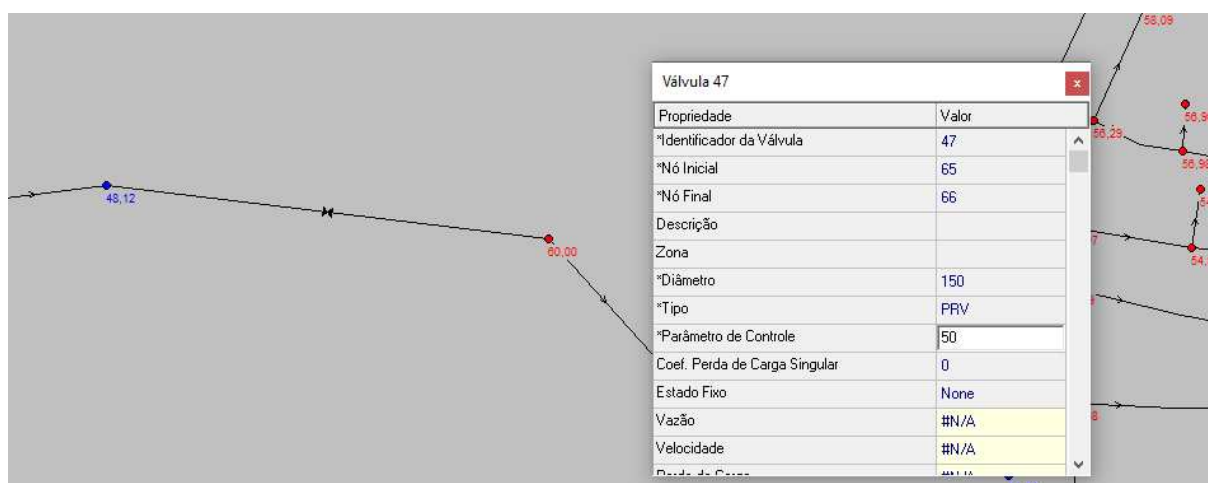
Com base nas medições realizadas de vazões distribuídas no sistema, identificou-se um volume significativamente superior ao registrado como consumo efetivo. Esse descompasso, de acordo com Gomes, 2019, é um forte indicativo da presença de perdas aparentes, ou seja, situações em que há consumo real de água, mas que não é devidamente faturado, seja por fraudes, ligações clandestinas ou falhas no cadastro técnico. Diante desse cenário, recomenda-se a realização de ações de campo voltadas à investigação e identificação de ligações irregulares, seguidas da sua desativação. Paralelamente, é essencial a revisão e atualização cadastral de todos os imóveis do distrito, de forma que os dados de consumo registrados e faturados pela CAGECE estejam em conformidade com a realidade. Adicionalmente, campanhas de conscientização e comunicação devem ser promovidas, incentivando a população a denunciar, de forma anônima, possíveis ligações clandestinas. Essas ações são fundamentais para reduzir perdas aparentes e aumentar a eficiência do sistema de abastecimento.

Além das evidências de perdas aparentes ligadas a ligações irregulares, destaca-se também a elevada idade média dos hidrômetros instalados no distrito, que atualmente é de 4,5 anos — acima do limite recomendado para substituição, que é de 3,8 anos. Apesar das tubulações da rede apresentarem idade relativamente recente, o envelhecimento dos hidrômetros compromete a precisão das medições, favorecendo erros, submedições ou até mesmo a ausência de registro de consumo. Esse fator contribui diretamente para o aumento das

perdas aparentes, uma vez que o consumo real pode estar sendo inferiormente registrado, impactando negativamente o faturamento da concessionária. Diante disso, torna-se urgente a implementação de um plano de substituição dos hidrômetros mais antigos, priorizando aqueles com maior tempo de uso. A renovação sistemática desses aparelhos permitirá maior fidelidade na medição dos consumos, reduzindo as perdas por falhas de medição e promovendo maior equilíbrio entre o volume distribuído e o volume faturado.

Além dos problemas na medição dos consumos e a presença de perdas aparentes no sistema, os registros operacionais indicam uma média superior a um vazamento por dia no distrito de Vazantes, revelando um quadro alarmante de perdas reais. A análise da simulação hidráulica realizada no EPANET confirmou esse cenário, ao evidenciar regiões da rede com pressões significativamente acima do limite de 50 mca estabelecido pela ABNT NBR 12218, condição que favorece o surgimento e agravamento de vazamentos. Ao sobrepor os resultados da modelagem ao mapa termal de vazamentos disponibilizado pela CAGECE, observou-se uma semelhança direta entre os pontos com maior número de ocorrências e as áreas com pressões elevadas. Essa associação reforça a hipótese de que o excesso de pressão tem contribuído de forma decisiva para o aumento das perdas reais. Como proposta de mitigação, adotando as boas práticas na redução de perdas, idealizadas pela ABES (2015), realizou-se uma nova simulação hidráulica com a introdução de uma válvula redutora de pressão (VRP) posicionada estrategicamente na adutora, na entrada da zona urbana de Vazantes. A válvula foi ajustada para limitar a pressão a 50 mca a jusante, conforme os parâmetros normativos.

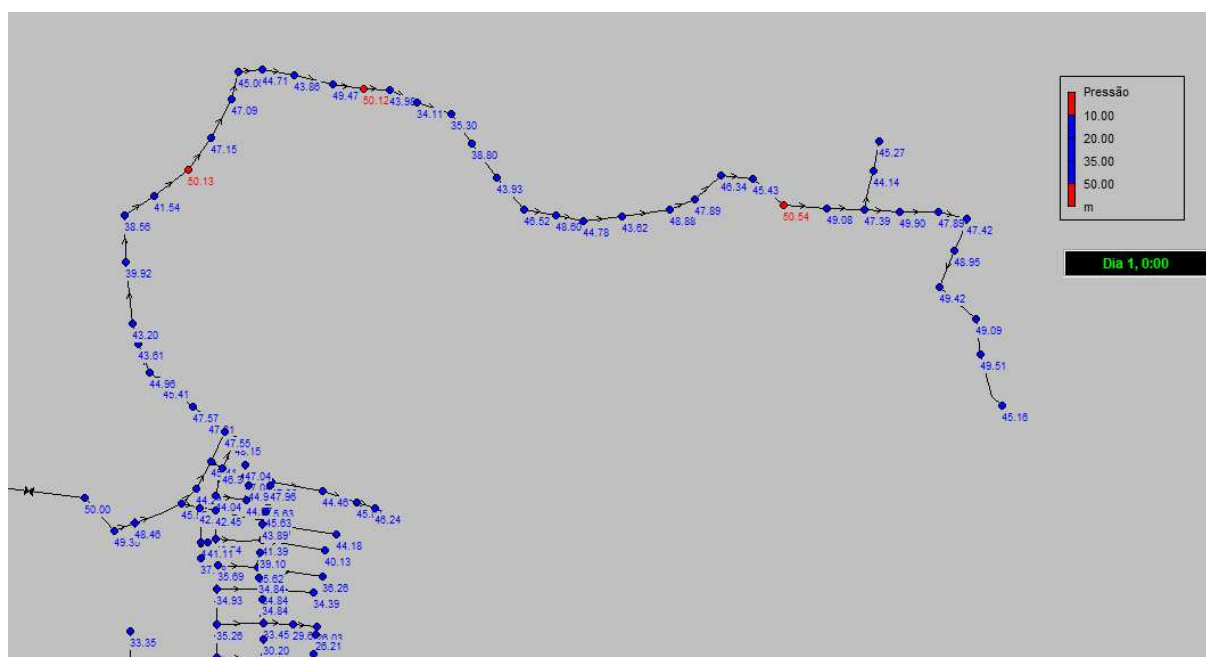
Figura 47 – Instalação de uma válvula redutora de pressão na entrada da área urbana de Vazantes



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise dos resultados após a inserção da válvula redutora de pressão (VRP) evidencia uma mudança significativa no comportamento hidráulico da rede. A maioria dos trechos que, anteriormente, apresentavam pressões superiores a 50 mca e, portanto, em desacordo com a norma ABNT NBR 12218 passaram a operar dentro dos limites recomendados. Na simulação, essas áreas são predominantemente representadas pela coloração azul, indicando valores de pressão mais baixos e, consequentemente, menos propensos à ocorrência de vazamentos. Nessa etapa, as simulações passaram a ser ilustradas com a cor vermelha para pressões superiores a 50 mca e inferiores a 10 mca, enquanto a cor azul representa os valores compreendidos dentro dos limites estabelecidos pela norma. Essa redução controlada de pressão contribui diretamente para a mitigação das perdas reais, demonstrando a efetividade da intervenção proposta.

Figura 48 – Simulação com a instalação da Válvula redutora de pressão



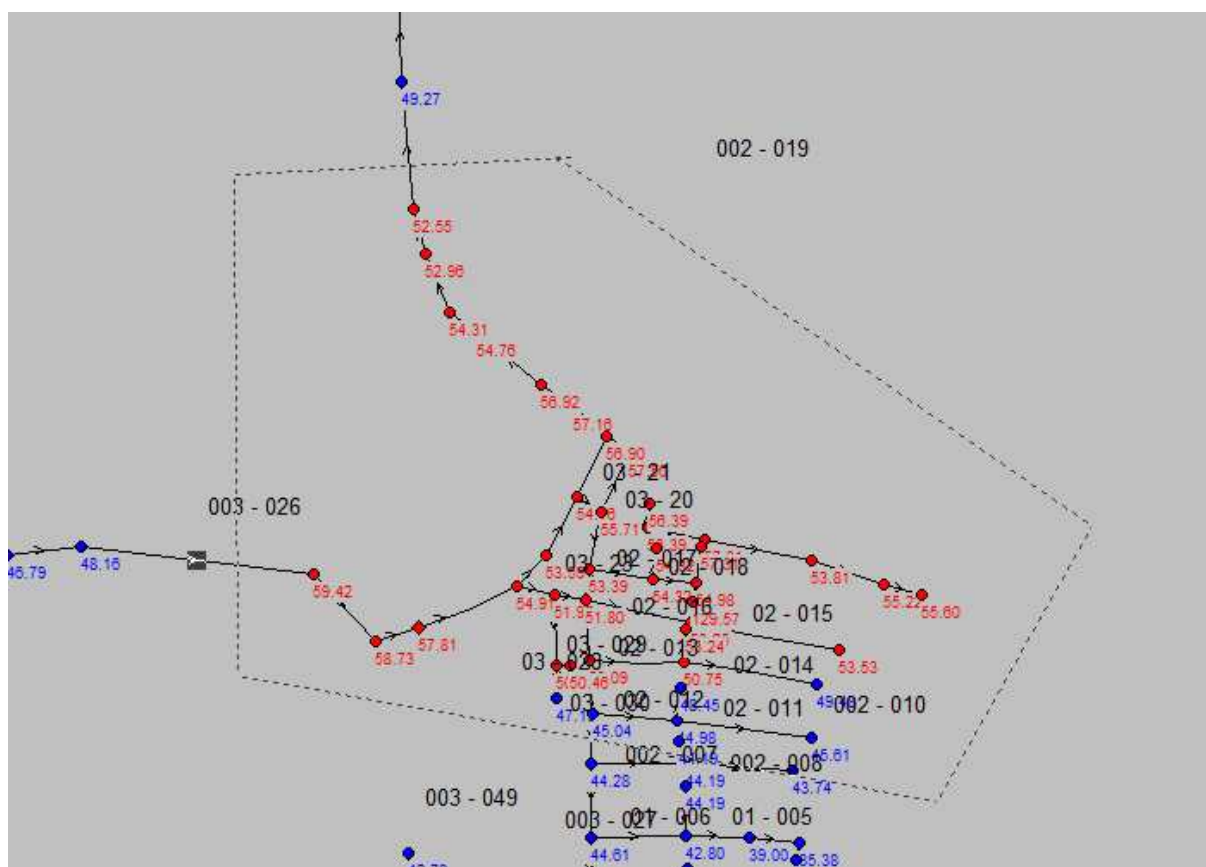
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

De forma alternativa, a adoção de uma Pump as Turbine (PAT) tenderia a produzir resultados semelhantes aos obtidos com a instalação da válvula redutora de pressão (VRP). Contudo, devido às limitações do modelo e do software utilizado, não foi possível simular de maneira precisa a eficiência hidráulica nem a capacidade de geração de energia elétrica desse dispositivo. Para superar essas barreiras, recomenda-se a utilização de ferramentas com maior robustez computacional, como o WaterGEMS, que oferece funcionalidades específicas para modelagens energéticas complexas. Ainda assim, considerando o desempenho verificado com a VRP, pode-se inferir que a PAT apresentaria comportamento equivalente no controle das

pressões do sistema, com o diferencial de possibilitar, simultaneamente, a produção de energia, configurando-se como uma solução inovadora e sustentável.

Além da instalação da válvula redutora de pressão, outra alternativa considerada foi a aplicação do princípio de Bernoulli, segundo o qual a redução do diâmetro das tubulações tende a ocasionar a diminuição da pressão. Nesse contexto, o trecho simulado e identificado como crítico devido às elevadas pressões foi selecionado para receber a alteração, reduzindo-se os diâmetros das tubulações da região de 150mm, 100mm, 75mm e 50mm para 40 mm. O objetivo dessa intervenção é verificar, por meio da simulação, se a redução dos diâmetros seria eficaz no controle das pressões excessivas observadas na rede. Ressalta-se, entretanto, que o diâmetro de 40 mm não é usualmente adotado nem amplamente disponível de forma comercial em sistemas de abastecimento de água, tendo sido considerado neste estudo exclusivamente como uma premissa de simulação, com a finalidade de analisar o comportamento hidráulico do sistema frente à redução de diâmetro.

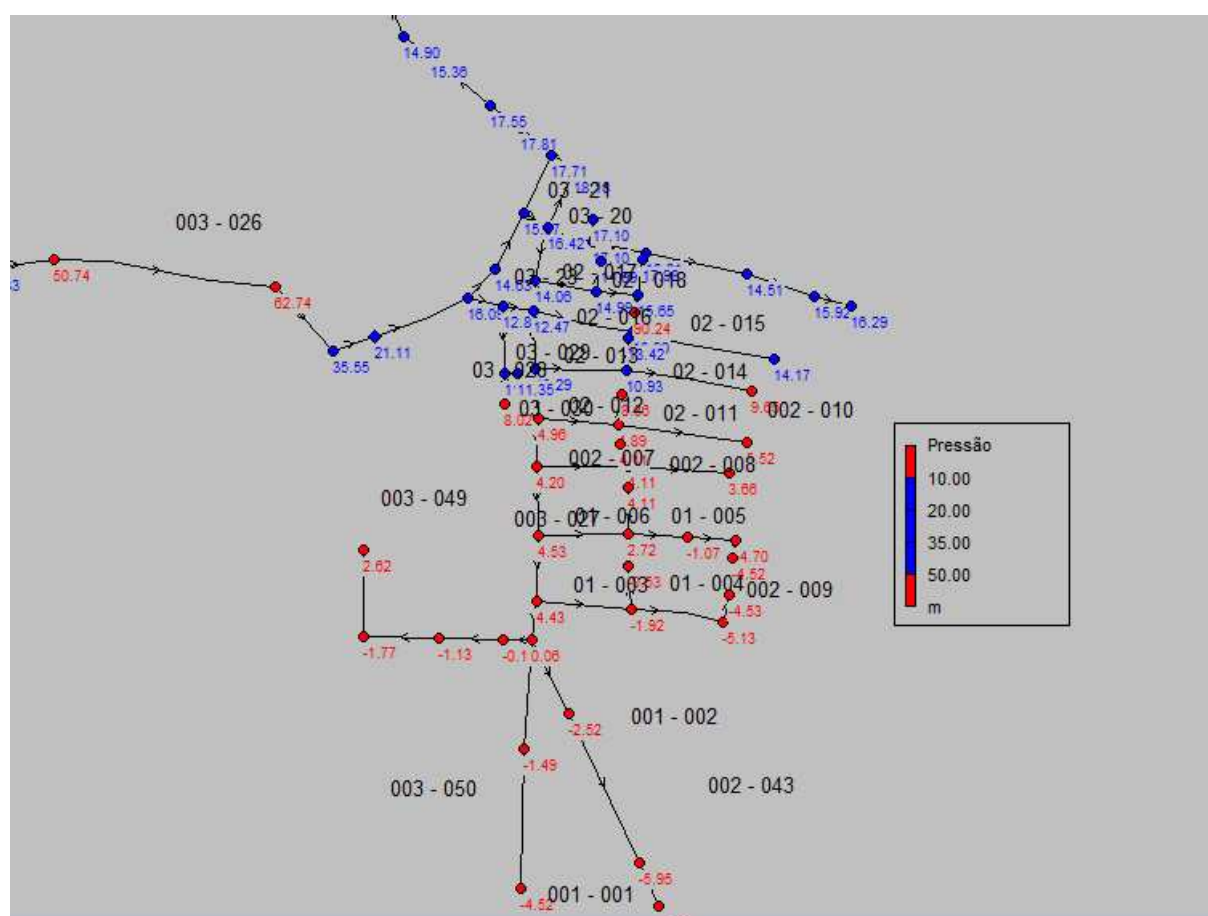
Figura 49 – Área com alteração de diâmetro para 40 mm



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

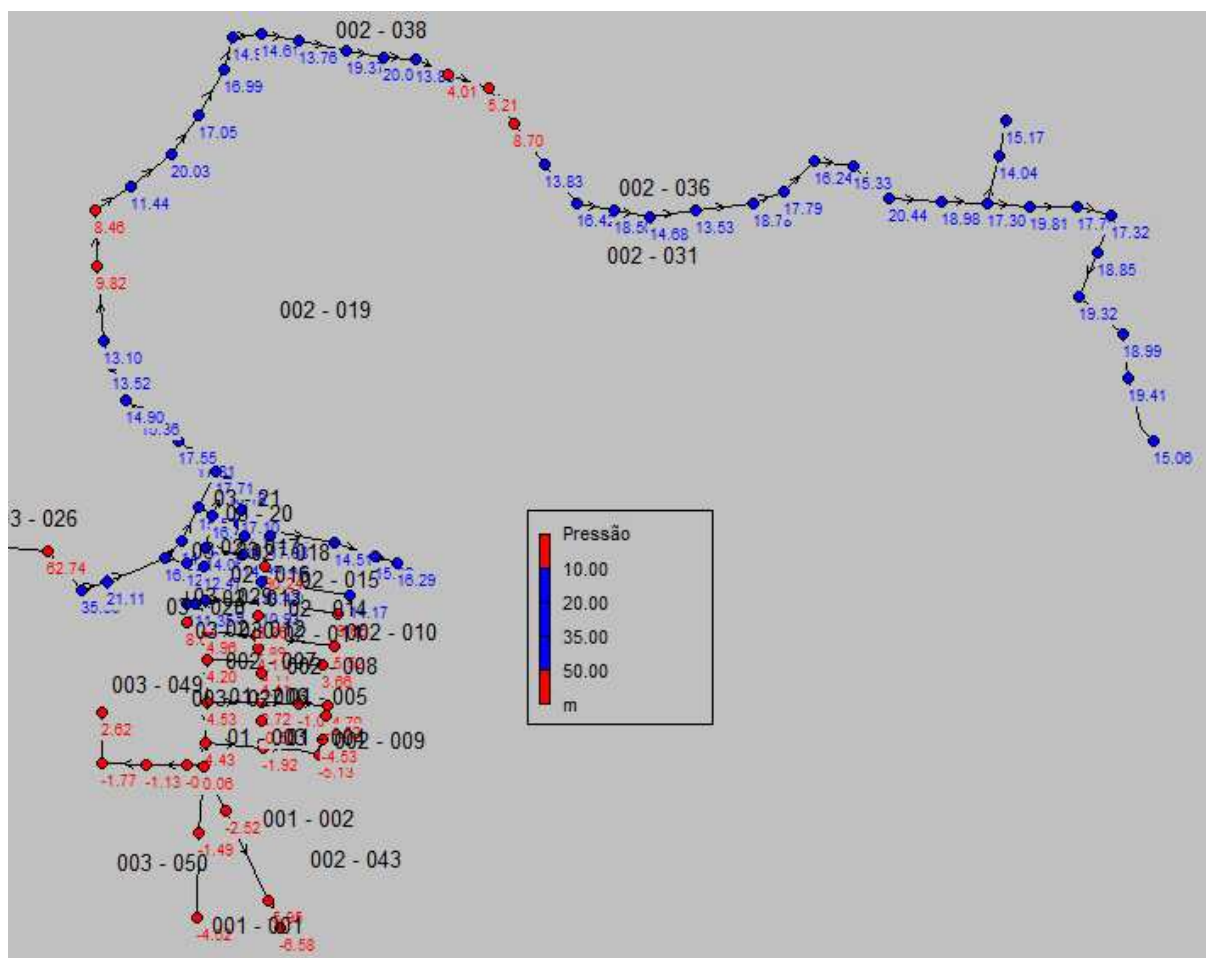
Ao simular o modelo com a redução do diâmetro das tubulações, observou-se uma diminuição geral das pressões na região crítica, mantendo-as dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 12218, representadas em azul no modelo. Esse ajuste também beneficiou a área ao norte do sistema, que anteriormente apresentava pressões elevadas e em desacordo com a norma. No entanto, a análise da região sul do centro urbano revelou um efeito adverso: os valores de pressão, que antes estavam dentro dos limites normativos, passaram a ficar abaixo do mínimo permitido. Esse resultado ocorreu devido à redução do fluxo disponível, consequência direta da diminuição do diâmetro das tubulações a jusante.

Figura 50 – Resultado da simulação com diminuição do diâmetro



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Figura 51 – Resultado da simulação com diminuição do diâmetro reduzida



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Dessa forma, embora a redução dos diâmetros tenha se mostrado eficaz no controle das pressões elevadas, especialmente nas áreas críticas do modelo, essa medida apresenta limitações significativas. Além de demandar elevados custos de intervenção, associados a escavações e repavimentações, a alteração geraria cenários de baixa pressão em regiões a jusante, comprometendo a regularidade do abastecimento. Assim, trata-se de uma alternativa tecnicamente inviável, tanto pelos impactos operacionais quanto pelas consequências negativas para a distribuição de água no sistema.

Diante do cenário identificado, torna-se mais viável a implantação de uma válvula redutora de pressão (VRP) ou uma Pump as Turbine (PAT) posicionada a montante dos pontos críticos, especialmente na entrada da zona urbana e na parte superior do distrito. Recomenda-se que a VRP seja configurada para limitar a pressão a, no máximo, 50 mca, ou preferencialmente 40 mca, a fim de garantir maior segurança operacional. Essa intervenção no sistema de abastecimento tem potencial para reduzir significativamente as pressões excessivas,

minimizar a ocorrência de vazamentos e, por consequência, diminuir as perdas reais, que atualmente apresentam índices expressivos no sistema.

5 CONCLUSÃO

Diante do cenário alarmante em que o distrito de Vazantes, no município de Aracoiaba, apresenta perdas totais de água com média mensal próxima a 70%, este trabalho teve como objetivo identificar e analisar os principais fatores responsáveis por essas perdas. Para isso, foi empregada a modelagem e simulação hidráulica utilizando o software EPANET, aliada à coleta de dados específicos junto à CAGECE, empresa responsável pelo abastecimento local.

Foram utilizados dados cadastrais do sistema de abastecimento, como materiais e diâmetros das tubulações, consumos médios por quadra, mapas térmicos de vazamentos, idade das redes e dos hidrômetros, além do histórico de ocorrências. Paralelamente, foi solicitado à CAGECE a realização de ensaios de medição de vazão em três pontos estratégicos da rede. Os resultados revelaram volumes distribuídos significativamente superiores aos consumos micromedidos, indicando a existência de consumos desconhecidos em torno de 64% e, consequentemente, confirmando o cenário de perdas.

As principais hipóteses para as perdas aparentes foram: falhas cadastrais, fraudes e hidrômetros com vida útil ultrapassada — hipótese esta reforçada pelos dados coletados. No entanto, a alta frequência de vazamentos registrados (média superior a um por dia) evidenciou também a presença marcante de perdas reais no sistema.

A simulação hidráulica teve papel fundamental no diagnóstico das causas das perdas reais. A partir da inserção dos dados topográficos obtidos por meio do site TOPODATA e do software QGIS, bem como dos dados cadastrais da rede e padrões de consumo fornecidos pela CAGECE, foi possível identificar pontos com pressões acima dos limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 12218. Os locais mais críticos concentraram-se na entrada da zona urbana de Vazantes e no setor norte do distrito, regiões que também apresentaram maior número de registros de vazamentos, reforçando a correlação entre pressões elevadas e ocorrência de perdas reais.

Como propostas de mitigação, foram indicadas medidas para combate tanto às perdas aparentes quanto às perdas reais. Para as aparentes, recomendou-se a renovação dos hidrômetros antigos, a fiscalização e interrupção de ligações clandestinas, além da revisão e atualização do cadastro técnico-operacional do distrito. Já para as perdas reais, apesar da redução de volume ter se mostrado eficaz em pontos críticos, a instalação de uma Válvula Redutora de Pressão (VRP) ou uma Pump as Turbine (PAT) na entrada da zona urbana de Vazantes mostrou-se mais viável em simulação, promovendo a redução das pressões em pontos

críticos e, potencialmente, diminuindo a ocorrência de novos vazamentos sem ocasionar prejuízos no abastecimento em outras áreas do sistema. A redução dos diâmetros da rede nos pontos críticos foi simulada e demonstrou ser eficaz na diminuição das pressões elevadas nessas regiões. Entretanto, observou-se que essa intervenção impactou negativamente as pressões em trechos a jusante, comprometendo o atendimento adequado em áreas anteriormente estáveis. Além disso, os elevados custos associados às obras de substituição de tubulações, que envolveriam escavações e recomposição de pavimentos, não justificariam a adoção dessa solução. Ressalta-se que, ainda que neste trabalho não tenham sido elaborados orçamentos detalhados para as intervenções propostas, a análise técnica indica que essa alternativa apresenta limitações significativas do ponto de vista operacional e econômico.

Embora este estudo não tenha abrangido a implementação das medidas propostas nem avaliado quantitativamente seus impactos na redução das perdas, o objetivo principal foi alcançado em diagnosticar, com base técnica e simulação hidráulica, os principais fatores causadores das perdas de água no distrito e apresentar soluções viáveis para sua mitigação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL.

Controle e redução de perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro: ABES, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12214:2020**

Projeto de estação de bombeamento ou de estação elevatória de água — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12215-1:2017 –**

Projeto de adutora de água – Parte 1: Conduto forçado. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12217:1994 –**

Projeto de estação de tratamento de água — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12218:2017 –**

Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público — Procedimento. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12213: projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público.** Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

AZEVEDO NETTO, Miguel Fernandez y Fernandez; ARAÚJO, Roberto de; ITO, Acacio Eiji. **Manual de hidráulica.** 8. ed. São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 1998.

BARREIRA, Gustavo Sales. **Modelagem e simulação hidráulica no diagnóstico e**

resolução de problema em rede no Guajiru, Caucaia. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso - Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde. **Manual de orientação sobre a implementação de política de cobrança de serviços públicos de saneamento básico.** 2. ed. Brasília:

FUNASA, 2016. Disponível em:

https://www.funasa.gov.br/documents/20182/38564/03_Manual_sobre_a_implementacao_d_e_politica_de_cobranca_VER_2_0_WEB_final.pdf. Acesso em: 28 set. 2025.

GOMES, Heber Pimentel. **Abastecimento de Água.** 2. ed. João Pessoa: LENH/UFPB, 2021.

HELLER, Léo; PÁDUA, Valter Lúcio de (org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. 2. ed. rev. e atual. Belo Horizonte: Editora UFMG, v. 1, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DO PVC. **Qual a vida útil de um produto de PVC para a construção civil**. Disponível em: <https://pvc.org.br/perguntas-e-respostas/>. Acesso em: 28 set. 2025.

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Básico Municipal: Vazantes e Aracoiaba**: IPECE, 2022. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br>. Acesso em: 28 set. 2025.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: dados 2023**. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis>. Acesso em: 28 set. 2025.

MOURA, Eulina Maria de; DIAS, Isabelly Cícera Souza; SILVA, Jussara Severo da; SILVA, Ferdnando Cavalcanti da. **Abordagem sobre perdas de água em sistemas de abastecimento: breve explicação sobre os tipos e principais causas**. João Pessoa, 2004.

NASIR, Abdulbasit; DRIBSSA, Edessa; GIRMA, Misrak. **The pump as a turbine: A review on performance prediction, performance improvement, and economic analysis**. Heliyon, [S.l.], v. 10, e26084, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26084.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2006.

ROSSMAN, L. A. **EPANET: Manual do usuário**. Tradução de Heber Pimentel Gomes e Moisés Menezes Salvino. João Pessoa: Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, Universidade Federal da Paraíba, UFPB, 2009.

SANE SOLUTI. **Datalogger de Pressão e Vazão – Ecologger**. Disponível em: <https://sanesoluti.com.br/produto/datalogger-de-pressao-e-vazao-ecologger/>. Acesso em: 28 set. 2025.

SOUZA, Antonio Carlos de. **Influência de manobras de válvulas na identificação de vazamentos em redes de distribuição de água utilizando dados transientes e algoritmo**

genético. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

TOPODATA: Mapa interativo de dados geomorfológicos do Brasil. São José dos Campos: INPE, 2025. Disponível em:

<https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1Yle0c2VU4waXoKzn0RBONZG9NgSYas&ll=-16.94719021712191%2C-48.361348271369934&z=4>. Acesso em: 28 set. 2025.

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