



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Matheus Legnani Wilken

Belo Horizonte, MG
2025

Matheus Legnani Wilken

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista

Orientador: Professor Doutor Frederico Keizo Odan

Belo Horizonte, MG

2025



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL - NS



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 17 / 2025 - DCTA (11.55.03)

Nº do Protocolo: 23062.066474/2025-51

Belo Horizonte-MG, 15 de dezembro de 2025.

FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC

Matheus Legnani Wilken

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 15 de dezembro de 2025

Banca examinadora:

Presidente da Banca Examinadora

Prof. DSc. Frederico Keizo Odan – CEFET-MG – Orientador

1º Avaliador

Prof. MSc. André Luiz Marques Rocha – CEFET-MG

2ª Avaliadora

Profa. DSc. Luciana Peixoto Amaral – CEFET-MG

(Assinado digitalmente em 15/12/2025 17:54)
ANDRE LUIZ MARQUES ROCHA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO
DCTA (11.55.03)
Matrícula: 2143906

(Assinado digitalmente em 17/12/2025 11:04)
FREDERICO KEIZO ODAN
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO
DCTA (11.55.03)
Matrícula: 2092847

(Assinado digitalmente em 17/12/2025 06:17)
LUCIANA PEIXOTO AMARAL
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO
DCTA (11.55.03)
Matrícula: 1808233

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **17**, ano: **2025**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão:
15/12/2025 e o código de verificação: **32a8bf4c0e**

AGRADECIMENTOS

O presente estudo não é fruto de um esforço individual, mas um esforço que envolve muitos à minha volta, alguns que nem sequer sabiam deste esforço.

A Deus, não apenas pela oportunidade de estar onde cheguei, mas também pela mente e espírito de continuar persistindo, independente do quão cansado eu cheguei a ficar.

A meus queridos amigos da faculdade, que por mais que não demonstre, tenho muito carinho e apreço por cada um deles, Guillermo Arturo, Isabela Nicomedes, Júlia Batista e Ruan Carlos, estes foram os nomes que mesmo não sabendo e não os dizendo, me ajudaram bastante em dias que eu não sabia se eu conseguiria, nomes que me motivaram a seguir em frente, nomes que levarei para o resto de minha vida.

A meus velhos e preciosos amigos de infância, Arthur Cunha, Samir Cauã e Layana Pelizari, que sempre estiveram ao meu lado, sempre me fizeram rir em momentos que não sabia que teria a capacidade, amigos do peito que estiveram ao meu lado durante sorrisos, lágrimas, suor e todos os sentimentos possíveis que uma vida de boas experiências e memórias podem oferecer.

A minha futura esposa, Emilly Jessica, a pessoa que esteve mais perto de mim, que mais me conhece. A mulher da minha vida, que me motivou e me motiva a ser a melhor versão de mim mesmo, que mesmo sabendo de cada um de meus erros, cada um dos meus tropeços e cada uma de minhas falhas, me ama por cada uma delas, me ama por quem eu sou, por quem eu fui e por quem eu serei, e foi por este amor, um amor que me deu forças em meus momentos de fraqueza, que sei que estou no caminho certo.

A minha família, com seu amor incondicional, que mesmo tendo me distanciado tanto nestes últimos meses por conta de meus compromissos e responsabilidades e pelo caminho árduo que estou trilhando que valerá a pena no futuro, sempre possuem um espaço em seus corações para mim, mesmo com todos meus defeitos, sempre me amaram, me acolheram e cuidaram de mim em meus momentos de doença, tristeza e necessidade.

Por fim, a meu orientador, grande Fred, uma figura que me inspirou e me inspira com seu conhecimento, um professor que respeito, um amigo que escolheu ter a paciência de me lecionar e orientar. Um grande professor.

RESUMO

WILKEN, MATHEUS LEGNANI. **Análise de Sensibilidade de um Sistema de Abastecimento de Água**. 2025. 111 páginas. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

O presente estudo apresenta o contexto de Sistemas de Abastecimento de Água, bem como estudos de caso que mostram as variáveis formas como estes sistemas podem se apresentar e como podem ser analisados e tratados de forma a maximizar sua eficiência. O objetivo de um sistema de abastecimento de água (SAA) pode ser resumido no fornecimento de água potável para atender as demandas residenciais, industriais e de serviços. No entanto, a operação desse sistema não é trivial, e envolve diversos fatores que geram incertezas quanto à satisfação das demandas em termos de quantidade e qualidade. Nesse contexto, é fundamental compreender como esses fatores afetam o desempenho do SAA, para que o planejamento e operação deles sejam mais eficientes e eficazes. Diante disso, se faz presente as análises de sensibilidade, que conseguem evidenciar parâmetros e variáveis que mais influenciam ou geram estas incertezas no sistema como um todo e nas características do mesmo. É neste contexto que o trabalho se faz presente com a construção de um código que realiza esta análise e retorna a quantificação em forma de índices de elasticidade. Foi escolhido como base um modelo hidráulico benchmark empregado em pesquisas acadêmicas. O objetivo principal é identificar quais variáveis e parâmetros exercem maior influência sobre o comportamento hidráulico da rede, bem como a significância desta influência, contribuindo para o aprimoramento de estudos de calibração, operação e tomada de decisão no contexto do saneamento. O modelo foi simulado utilizando a linguagem de programação Python e sua integração com o software EPANET 2, o que possibilitou a execução automatizada de múltiplos cenários e a extração sistemática de resultados de vazão e pressão ao longo da rede. Foram analisados elementos como perdas de água e rugosidade das tubulações. A distinção entre variáveis e parâmetros guiou a estrutura metodológica, assegurando rigor conceitual de acordo com as definições clássicas da matemática aplicadas à modelagem. Os coeficientes de sensibilidade foram utilizados como ferramenta analítica para quantificar o impacto individual de cada variável sobre o desempenho do sistema, permitindo identificar os componentes mais influentes e interpretar as implicações práticas desses resultados. Sugere-se que os achados evidenciam que as perdas de água relacionadas às demandas nodais possuem uma sensibilidade maior se comparada à rugosidade da rede, além disso, características da rede, tais quais a topografia

também influencia nessa sensibilidade. Dessa forma, o estudo contribui para o fortalecimento das ferramentas de modelagem aplicadas ao planejamento e à gestão de sistemas de abastecimento, oferecendo subsídios técnicos que auxiliam na compreensão do comportamento hidráulico e no desenvolvimento de estratégias mais eficientes para operação e manutenção.

Palavras-chave: Análise de sensibilidade. Modelagem hidráulica. EPANET. Redes de abastecimento de água. Programação.

ABSTRACT

WILKEN, MATHEUS LEGNANI. Sensitivity Analysis of a Water Supply System. 2025. 111 pages. Monograph (Bachelor's Degree in Environmental and Sanitary Engineering) – Department of Environmental Science and Technology, Federal Center for Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

This study presents the context of Water Supply Systems, as well as case studies that illustrate the diverse ways in which these systems can be structured and how they can be analyzed and treated to maximize their efficiency. The primary objective of a Water Supply System (WSS) can be summarized as the provision of potable water to meet residential, industrial, and service-sector demands. However, operating such a system is not trivial and involves several factors that generate uncertainties regarding the ability to meet demands in terms of both quantity and quality. In this context, it is essential to understand how these factors affect the performance of the WSS so that its planning and operation can be more effective and efficient. Given this, sensitivity analyses become relevant, as they highlight the parameters and variables that most influence or generate uncertainties in the system as a whole and in its specific characteristics. It is within this context that the present work is situated, involving the development of a code that performs this analysis and returns the quantification in the form of elasticity indices. A benchmark hydraulic model commonly used in academic research was chosen as the foundation. The main objective is to identify which variables and parameters exert the greatest influence on the hydraulic behavior of the network, as well as the significance of this influence, thereby contributing to the improvement of calibration studies, system operation, and decision-making within the sanitation sector. The model was simulated using the Python programming language and its integration with the EPANET 2 software, which enabled the automated execution of multiple scenarios and the systematic extraction of flow and pressure results throughout the network. Elements such as water losses and pipe roughness were analyzed. The distinction between variables and parameters guided the methodological structure, ensuring conceptual rigor according to classical mathematical definitions applied to modeling. Sensitivity coefficients were used as an analytical tool to quantify the individual impact of each variable on system performance, making it possible to identify the most influential components and interpret the practical implications of these results. The findings suggest that water losses related to nodal demands exhibit greater sensitivity when compared to pipe roughness. Additionally, network characteristics such as topography also influence this sensitivity. Therefore, the study

contributes to strengthening modeling tools used in the planning and management of water supply systems, offering technical support that aids in understanding hydraulic behavior and developing more efficient strategies for operation and maintenance.

Keywords: Sensitivity analysis. Hydraulic modeling. EPANET. Water supply networks. Programming.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo Geral	16
2.2. Objetivos Específicos	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. Componentes de um Sistema de Abastecimento de Água	17
3.2. Tipos de Sistemas de Abastecimento de Água	18
3.3. Gestão e Aspectos Operacionais de um SAA	20
3.3.1. Planejamento Adaptativo	21
3.3.2. Elementos Monitorados em um SAA	22
3.3.3. Indicadores de Desempenho da Operação de um SAA	23
3.4. Modelagem da operação de SAA: Princípio da modelagem aplicado a SAA	24
3.4.1. Estudos de Caso: Programação e Automação em SAAs	26
3.4.1.1. Porto Rico, EUA	26
3.4.1.2. Algoritmo de Controle Preditivo Econômico	27
3.5. Análise de sensibilidade e sua aplicação em SAAs	28
4. METODOLOGIA	30
4.1. Área de Estudo	31
4.2. Coeficientes de Sensibilidade	32
4.3. EPANET 2	34
4.4. Python	35
4.4.1. A Integração do Python com o EPANET	36
4.5. Variáveis/Parâmetros-Chave	38
4.5.1. Variáveis e Parâmetros de entrada	38
4.5.2. Variáveis de saída	40
4.6. O Código	40
4.6.1. Leitura e tratamento do arquivo INP	41
4.6.2. Simulação hidráulica	43
4.6.3. Simulação com parâmetros alterados	44
4.6.4. Cálculo dos índices de sensibilidade e elasticidade	46
5. RESULTADO E DISCUSSÕES	48
5.1. Características da Rede Simulada	48
5.1.1. Nós	49
5.1.2. Tubulações	50
5.1.2. Geometria da Rede	51
5.2. Índices Calculados e sua interpretação	52
5.2.1. Influência da Rugosidade na Vazão	52
5.2.2. Influência da Rugosidade na Pressão	54
5.2.3. Influência da Perda de Água na Vazão	56

	10
5.2.4. <i>Influência da Perda de Água na Pressão</i>	58
5.2.5. <i>Análise Geral dos Índices Encontrados</i>	60
5.2.5.1. <i>Comparação dos EI nas tubulações: rugosidade × perda de água</i>	61
5.2.5.2. <i>Comparação dos EI nos nós: rugosidade × perda de água</i>	61
5.2.5.3. <i>Considerações gerais</i>	61
6. CONCLUSÕES	63
7. RECOMENDAÇÕES	65
8. REFERÊNCIAS	67
APÊNDICE A - CÓDIGO PYTHON PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	77
ANEXO A - ARQUIVO INP “New York water supply system” BENCHMARK TRABALHADO	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. – Componente de um Sistema de Abastecimento de Água	18
Figura 4.1. – Fluxograma da Metodologia	32
Figura 4.6.1.1. - Exemplo Visual de Formato “Tabela” no Arquivo INP	43
Figura 4.6.1.2. - Exemplo Visual de Formato “Par Chave-Valor” no Arquivo INP	43
Figura 4.6.1.2. - Exemplo Visual de Formato “Par Chave-Valor” no Arquivo INP	44
Figura 4.6.1.3. - Exemplo Visual de Formato “Chave-Valor” gerado	44
Figura 4.6.2.1. - Código Responsável por Executar a Simulação	44
Figura 4.6.2.2. - Código Responsável por Retornar as Vazões em Cada Trecho em Forma de Lista	45
Figura 4.6.2.3. - Código Responsável por Retornar as Pressões em Cada Nó em Forma de Lista	45
Figura 4.6.3.1. - Código Responsável por Simular o Sistema de Abastecimento Alterando Algum Parâmetro	46
Figura 4.6.4.1. - Código Responsável por Calcular os Índices de Sensibilidade e Elasticidade	47
Figura 5.1.1. - Rede de Abastecimento Simulada com Vista Superior	50
Figura 5.2.2.1. - Rede de Abastecimento Simulada com Vista Superior com Índices de Elasticidade da Análise Rugosidade - Pressão.	57
Figura 5.2.3.1. - Rede de Abastecimento Simulada com Vista Superior com Índices de Elasticidade da Análise Perda de Água - Vazão.	59
Figura 5.2.4.1. - Rede de Abastecimento Simulada com Vista Superior com Índices de Elasticidade da Análise Perda de Água - Pressão.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1.1.1. - Junções da Rede Simulada	50
Tabela 5.1.2.1. - Tubulações da Rede Simulada	52
Tabela 5.2.1.1. - Análise de Sensibilidade da Rugosidade aplicada à Vazão das Tubulações do Sistema	54
Tabela 5.2.2.1. - Análise de Sensibilidade da Rugosidade aplicada à Pressão nos Nós do Sistema	56
Tabela 5.2.3.1. - Análise de Sensibilidade da Perda de Água aplicada à Vazão nas Tubulações do Sistema	58
Tabela 5.2.4.1. - Análise de Sensibilidade da Perda de Água aplicada à Pressão nos Nós do Sistema	60

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

DLL - Biblioteca de Vínculo Dinâmico

EI - Índice de Elasticidade

EPANET - Environmental Protection Agency Network Evaluation Tool

EPA - Environmental Protection Agency

ID - Indicadores de Desempenho

OMS - Organização Mundial da Saúde

SAA - Sistema de Abastecimento de Água

SAI - Sistema de Água Integrado

SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition

SI - Índice de Sensibilidade

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SP - São Paulo

US - United States

UV - Ultravioleta

WNTR - Water Network Tool for Resilience

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso vital para a sobrevivência humana e para o desenvolvimento socioeconômico das sociedades. A importância do abastecimento de água se relaciona não apenas com a saúde pública, mas também com a agricultura, com a indústria e com diversas atividades cotidianas. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), o acesso à água potável é um direito humano fundamental, e a falta desse recurso pode levar a sérios problemas de saúde e à degradação da qualidade de vida (OMS, 2019). Portanto, garantir um sistema de abastecimento de água eficiente e confiável é essencial para o bem-estar da população.

Nesse contexto, destaca-se também o papel das políticas públicas e do arcabouço legal brasileiro na estruturação dos serviços de saneamento básico. O Novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) estabeleceu metas ambiciosas de universalização do acesso à água potável e esgotamento sanitário até 2033, além de novas diretrizes de regionalização, regulação e cobrança pelos serviços. Essa legislação fortalece o papel da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) como órgão regulador e impõe maior exigência de planejamento, controle de perdas e eficiência operacional dos sistemas. Dessa forma, o alinhamento dos sistemas de abastecimento de água aos dispositivos legais se torna um elemento essencial tanto para a efetividade do serviço quanto para o cumprimento das metas nacionais de sustentabilidade e inclusão.

Os sistemas de abastecimento de água (SAA) são complexas redes que envolvem a captação, tratamento, transmissão e distribuição de água. Esses sistemas são projetados para atender à demanda de água de uma população específica, levando em consideração fatores como a topografia, a densidade populacional e as características do solo. Segundo Silva, Ferreira e Costa (2021), um SAA bem projetado deve ser capaz de fornecer água de qualidade adequada, em quantidade suficiente e de forma contínua. No entanto, a implementação e a operação desses sistemas apresentam desafios significativos, que vão desde a escolha das tecnologias adequadas até a gestão eficiente dos recursos hídricos disponíveis.

A complexidade no projeto, operação e manutenção dos SAA é um dos principais problemas enfrentados pela gestão dos mesmos. A interdependência entre os diversos componentes do sistema, como reservatórios, tubulações e estações de tratamento, torna a análise do desempenho e eficácia do sistema uma tarefa desafiadora. Além disso, fatores externos, como

variações na demanda de água e mudanças climáticas, podem impactar significativamente a eficiência do sistema. Segundo Costa e Santos et al. (2022), a falta de uma análise adequada pode levar a falhas no abastecimento, desperdício de recursos e insatisfação da população. Portanto, é fundamental que os gestores adotem abordagens que permitam uma compreensão mais profunda do comportamento do sistema.

Nesse contexto, a análise de sensibilidade emerge como uma ferramenta valiosa para a gestão de sistemas de abastecimento de água. Essa análise permite avaliar como as variações em parâmetros específicos, como a demanda de água e as características da rede de tubulações, afetam o desempenho do sistema. Segundo Vale e Oliveira (2021), a análise de sensibilidade é crucial para identificar pontos críticos que podem levar a falhas no abastecimento, permitindo que os gestores tomem decisões informadas sobre intervenções necessárias. A utilização de softwares como o EPANET 2, que simula o comportamento de sistemas de distribuição de água, potencializa essa análise. A integração do EPANET 2 com linguagens de programação, como Python ou MATLAB, possibilita a automação de simulações e a realização de análises em larga escala, conforme destacado por Costa e Santos (2022). Essa abordagem não apenas aumenta a eficiência das análises, mas também permite a exploração de múltiplos cenários, contribuindo para a otimização da operação do sistema.

Portanto, a análise de sensibilidade, quando combinada com ferramentas computacionais avançadas como o EPANET 2, representa um avanço significativo na gestão de sistemas de abastecimento de água. Essa combinação não apenas melhora a eficiência hídrica, mas também promove a sustentabilidade ambiental, conforme discutido por Ferreira, Silva e Almeida (2022). Através deste trabalho, busca-se explorar as metodologias de análise de sensibilidade e suas aplicações práticas, destacando a importância dessa ferramenta na tomada de decisões estratégicas para a gestão de recursos hídricos.

2. OBJETIVOS

Os objetivos do presente estudo foram elaborados de forma a nortear o trabalho realizado. Portanto, foram formulados um objetivo geral e um conjunto de objetivos específicos que direcionam a análise, desde a investigação e caracterização dos principais elementos que compõem um SAA até a análise da sensibilidade das variáveis/parâmetros que podem influenciar o sistema. Esses objetivos sustentam a abordagem e oferecem um caminho metodológico para avaliar a operação do sistema e compreender a influência dos elementos de um SAA em sua operação.

2.1. Objetivo Geral

Investigar, por meio de um estudo de caso, a influência dos elementos de um sistema de abastecimento de água na sua operação, com foco na análise de sensibilidade de suas variáveis e parâmetros operacionais.

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar e caracterizar os principais elementos que compõem um sistema de abastecimento de água;
- Mapear e compreender as variáveis e parâmetros que influenciam a operação do SAA;
- Selecionar e aplicar uma metodologia de análise de sensibilidade adequada ao modelo e tipo de sistema em estudo; e
- Analisar a sensibilidade das variáveis que podem influenciar em um sistema de abastecimento de água.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As redes de água potável representam um pilar fundamental para a saúde da população, o conforto e o progresso sustentável tanto em cidades quanto no campo. Um sistema de abastecimento de água é planejado para certificar que a água seja destinada aos usuários em volume adequado e com uma qualidade que esteja de acordo com as normas de potabilidade. Tais sistemas abrangem diversas fases integradas, que vão desde a captação da água na natureza até a sua entrega final ao consumidor, sendo cruciais para acompanhar o aumento da população e encarar os desafios que as alterações climáticas e a rápida urbanização impõem (Saleem e Mian, 2019).

Tendo em vista sua complexidade e relevância, é indispensável entender a organização, o modo de operação dos sistemas de abastecimento de água e como podem ser otimizados. Para isso, a base teórica do presente trabalho foi dividido para fins de explicação em:

1. Componentes de um Sistema de Abastecimento de Água;
2. Tipos de Sistemas de Abastecimento de Água;
3. Gestão e Aspectos Operacionais de um SAA;
4. Modelagem da Operação de SAA: Princípio da Modelagem Aplicado a SAA;
5. Análise de Sensibilidade e sua Aplicação em SAAs.

3.1. Componentes de um Sistema de Abastecimento de Água

Ainda segundo Saleem e Mian (2019), um sistema de distribuição hídrica é formado por diversas partes interligadas que atuam juntas para certificar o fornecimento eficaz de água potável. As quatro etapas principais realizadas pelo ser humano são:

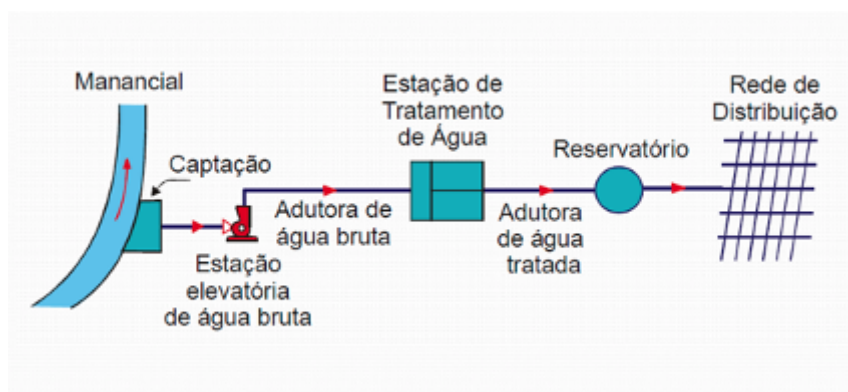
- **Captação:** Essa etapa envolve a coleta de água de diversas fontes, como rios, lagos, aquíferos subterrâneos e represas. A captação pode incluir a construção de poços, barragens e estações de bombeamento para retirar a água da fonte e direcioná-la para as unidades de tratamento (Tafesse, Porcelli e Seboka, 2023). A eficiência nessa etapa é vital para garantir um fornecimento constante de água bruta.
- **Tratamento:** A água coletada passa por um processo de tratamento para retirar impurezas, poluentes e patógenos, tornando-a segura para consumo humano. Os processos de tratamento podem incluir filtração, coagulação, floculação, sedimentação, desinfecção (cloração, ozonização, radiação ultravioleta) e ajuste de pH (Lapointe & Barbeau, 2016). A

escolha dos métodos de tratamento depende da qualidade da água bruta e dos padrões de potabilidade exigidos.

- **Transmissão:** Após o tratamento, a água é transportada por meio de grandes tubulações e estações de bombeamento para os reservatórios de distribuição (Saleem e Mian, 2019). Essa parte garante que a água tratada seja transportada de forma eficaz para as áreas onde será distribuída aos consumidores.
- **Distribuição:** A água é distribuída aos consumidores por meio de uma rede de tubulações menores, reservatórios de distribuição e estações de bombeamento. A rede de distribuição deve ser projetada para manter a pressão ideal e garantir que a água chegue a todos os pontos de consumo de forma confiável (Soares, 2021). O monitoramento constante da rede é vital para detectar e reparar vazamentos, além de garantir a qualidade da água até o ponto de consumo.

O esquema a seguir da figura 3.1. ilustra estes componentes:

Figura 3.1 - Componente de um Sistema de Abastecimento de Água.



Fonte: Alem Sobrinho e Contrera (2013, apud Guedes, 2018).

Além dos componentes de um SAA, é de suma importância o conhecimento e o entendimento dos tipos de sistemas existentes para melhor compreensão do presente estudo e como ele irá se desenvolver.

3.2. Tipos de Sistemas de Abastecimento de Água

Os sistemas de distribuição hídrica podem ser classificados com base em sua escala, complexidade e tecnologia aplicada. Aqui estão alguns dos modelos mais comuns:

- **Sistemas Centralizados:** Atendem grandes cidades com uma única estação de tratamento e uma ampla rede de distribuição. Devido às economias de escala, os sistemas centrais geralmente apresentam melhor custo-benefício para grandes populações. No entanto, interrupções no tratamento ou na distribuição podem causar falhas generalizadas nesses sistemas (Li-hui, Sui-Qing e Wen, 2006).
- **Sistemas Descentralizados:** Também conhecidos como sistemas de ponto de uso, eles servem pequenas comunidades ou prédios isolados. Eles empregam tecnologias de tratamento local, como filtros de areia, desinfecção UV ou sistemas de osmose reversa (Arnaud et al., 2024). Sistemas descentralizados são mais resistentes a falhas de grande alcance e podem ser ideais para áreas isoladas ou pequenas comunidades.
- **Sistemas Híbridos:** Unem elementos dos sistemas centrais e descentralizados. Por exemplo, uma cidade pode ter uma estação de tratamento central, mas também usar sistemas descentralizados para áreas específicas ou para fins não potáveis, como irrigação (Arnaud et al., 2024). Sistemas híbridos oferecem versatilidade e podem otimizar o uso de recursos hídricos de maneira mais eficaz.
- **Sistemas Inteligentes de Abastecimento de Água:** Usam tecnologias avançadas, como sensores, medidores inteligentes e sistemas de monitoramento em tempo real, para otimizar a distribuição de água, detectar vazamentos e aumentar a eficiência energética. Esses sistemas podem ajudar a diminuir o desperdício de água e aprimorar a gestão dos recursos hídricos (Ascensão et al., 2023).
- **Sistemas de Captação de Água da Chuva:** Captam água da chuva de telhados e outras superfícies para uso doméstico, irrigação ou recarga de aquíferos. Esses sistemas são especialmente úteis em áreas com escassez de água ou onde a água subterrânea é de baixa qualidade. A água da chuva coletada pode precisar de tratamento antes do consumo, dependendo da qualidade da água e do uso pretendido (Song et al., 2025).
- **Sistemas de Reúso de Água:** Tratamento de águas residuais para reutilização em aplicações não potáveis, como irrigação, resfriamento industrial ou recarga de aquíferos. Embora não seja um sistema de abastecimento direto, ele contribui para aumentar a disponibilidade de água (Chung, Choi e Lee, 2009).

Vale destacar que a escolha e a utilização destes sistemas devem levar em consideração diversos parâmetros que podem variar dependendo de onde se quer implantar cada um deles, para que, assim, elas possam vir a funcionar e se preservar em um bom estado por muitos anos, sendo crucial para um abastecimento sem muitas correções do decorrer deste tempo de

funcionamento. Para isso, precisa-se usar a água de forma inteligente, proteger as fontes e diminuir a poluição (Chung, Choi e Lee, 2009).

É muito importante que o sistema tenha durabilidade e resiliência para enfrentar enchentes e secas severas. Também deve estar pronto para lidar com problemas inesperados, como poluição ou danos na estrutura (Kumar et al., 2021).

O uso de eletricidade para bombear e tratar a água pode ser bem alto. Usar bombas que gastam menos energia, aproveitar a energia de outras formas e controlar o consumo são ações importantes para economizar e poluir menos, bem como prezar pelo uso eficiente de energia elétrica (Kong, Wang e Chen, 2023; Morani, Hernández e Castellani, 2018).

Outro ponto chave é se preparar para fenômenos climáticos que podem vir a ocorrer. Os sistemas precisam se adaptar às variações na disponibilidade hídrica e à ocorrência de eventos extremos que acontecem cada vez com mais frequência, para garantir que a água continue sendo usada de forma sustentável e a nunca faltar água para a população (Arnaud et al., 2024).

Portanto, as redes de água são partes muito importantes das cidades e do campo, e precisam de um bom planejamento, um projeto bem feito e um funcionamento que não prejudique o ambiente, para que todos tenham água potável sempre. As redes de distribuição de água são partes cruciais da infraestrutura moderna, demandando planejamento atencioso, projeto eficaz e funcionamento sustentável para certificar o fornecimento de água potável a todos (Saleem e Mian, 2019).

3.3. Gestão e Aspectos Operacionais de um SAA

Assegurar a sustentabilidade do sistema depende principalmente de uma boa administração e planejamento de recursos hídricos. A gestão do Sistema de Abastecimento de Água envolve o planejamento, a melhoria contínua e a preservação das fontes de água, considerando os interesses de governos, comunidades e setores produtivos (Machado et al., 2024).

Nesse sentido, Zhang et al. (2023) destacam que uma gestão hídrica eficiente exige a realização de análises quantitativas da sustentabilidade da água. Tais análises devem contemplar a disponibilidade destes recursos hídricos, as condições do meio aquático e as

estratégias de gestão instituídas. Além disso, uma administração boa e eficiente precisa considerar, tanto o acesso da população aos serviços de abastecimento, quanto os impactos ambientais provocados pelas atividades humanas.

Diante disso, as práticas operacionais do sistema de abastecimento de água tornam-se elementos importantes para garantir a efetividade dessa gestão. É por meio delas que se torna possível a implementação das ações planejadas, sendo fundamental identificar os aspectos que exigem monitoramento contínuo, bem como indicadores que permitam avaliar o desempenho, a gestão e a eficiência operacional do sistema.

3.3.1. Planejamento Adaptativo

Segundo Mijic, Gago e Aldas (2024), em sistemas de água integrados (SAIs) (sistemas sustentáveis para o gerenciamento de recursos hídricos), o planejamento adaptativo e a automação são cruciais para garantir o uso eficiente e sustentável dos recursos hídricos. A integração desses conceitos permite uma gestão mais dinâmica e responsiva, capaz de lidar com as complexidades inerentes aos sistemas hídricos modernos.

Ainda de acordo com Mijic et al. (2024), o planejamento adaptativo busca alinhar a gestão da água com as mudanças dinâmicas do meio ambiente e as demandas humanas, utilizando a automação e tecnologias inteligentes para promover eficiência e resiliência. Isso inclui técnicas como monitoramento em tempo real, controle automático de componentes do sistema (como válvulas e bombas) e o uso de algoritmos baseados em aprendizado de máquina¹ para prever demandas e responder a eventos críticos. Essas soluções são amplamente utilizadas para enfrentar incertezas relacionadas a variabilidades climáticas, crescimento populacional e mudanças no uso da terra, otimizando o desempenho e a sustentabilidade do sistema.

Os benefícios da automação em sistemas de abastecimento de água integrados incluem, segundo Olsson (2021), eficiência e otimização (a automação permite a operação otimizada de sistemas de água, desde a coleta até a distribuição, minimizando perdas e garantindo o uso eficiente dos recursos hídricos), monitoramento em tempo real (sistemas automatizados

¹ O aprendizado de máquina é um subcampo da inteligência artificial no qual os algoritmos aprendem padrões a partir de dados históricos e fornecem previsões com base nesses padrões aprendidos, aplicando-os a novos dados.

podem monitorar continuamente variáveis como níveis de reservatórios, qualidade da água e demanda, permitindo respostas rápidas a situações de emergência ou variações nas condições operacionais), adaptação dinâmica (a automação facilita a adaptação dos sistemas de abastecimento de água integrados a diferentes condições, como variações climáticas, picos de demanda e eventos inesperados, garantindo a resiliência do sistema), redução de custos (ao otimizar o uso de recursos e minimizar perdas, a automação contribui para a redução de custos operacionais e de manutenção dos sistemas de abastecimento de água integrados) e, por fim, o controle inteligente (aplicação de um sistema de controle lógico inteligente para tornar o sistema de geração de água adaptável às condições atmosféricas e automatizar o sistema integrado de água).

3.3.2. *Elementos Monitorados em um SAA*

Em um sistema de abastecimento de água, mundialmente, acompanha-se vários pontos cruciais para assegurar que a água seja de alta qualidade e sempre disponível. Isso inclui:

- **Qualidade da Água:**
 1. **Parâmetros Físico-Químicas:** Monitora-se o pH, a turbidez, a cor, o cheiro e a quantidade de desinfetantes que restam, como o cloro (Ke et al., 2023).
 2. **Contaminantes:** Busca-se poluentes orgânicos e inorgânicos, além de substâncias que surgem durante a desinfecção (Kanakoudis & Tsitsifli, 2017).
 3. **Testes Microbiológicos:** Testes frequentes para garantir que não há bactérias, vírus ou protozoários que causam doenças (Kumpel, Delaire e Peletz, 2018).
- **Volume e Distribuição da Água**
 1. **Níveis dos Reservatórios:** Os níveis de água nos reservatórios são monitorados continuamente para garantir a regularidade do abastecimento e evitar desabastecimentos (Eker & Kara, 2003).
 2. **Vazão e Pressão:** A vazão e a pressão da água são medidas em diferentes pontos da rede de distribuição para identificar eventuais vazamentos e assegurar a adequada entrega da água aos consumidores (Xu et al., 2014).
 3. **Perdas de Água:** As perdas de água, decorrentes de vazamentos físicos ou ligações clandestinas, são quantificadas com o auxílio de tecnologias modernas de detecção, como softwares automatizados, que permitem a localização precisa e a redução dessas perdas (Yoon & Lee, 2010; Allen, Fischer e Chen, 2012).

- **Infraestrutura**

1. Estado de Bombas e Válvulas: O funcionamento das bombas e válvulas é monitorado de forma sistemática, visando prevenir falhas operacionais que possam comprometer o desempenho do sistema (Baroiu et al., 2017).
2. Condição das Tubulações: As tubulações são inspecionadas para detectar corrosões, obstruções ou outras anomalias estruturais que possam comprometer a qualidade e continuidade do fornecimento (Bandurin, Kuleshova e Kuleshov, 2021).
3. Sistema de Drenagem: O sistema de drenagem é acompanhado para evitar colapsos, obstruções ou conexões cruzadas que possam resultar na contaminação da água potável (Cardoso-Gonçalves & Tentúgal-Valente, 2023).

- **Operação e Controle**

1. Consumo de Energia: O consumo de energia elétrica, especialmente nas estações de bombeamento, é monitorado para promover a eficiência energética e reduzir custos operacionais (Kong, Wang e Chen, 2023).
2. Automação e Controle: Sistemas de automação, como o SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), são empregados para o monitoramento e controle em tempo real das unidades operacionais do SAA (Babunski et al., 2018).
3. Modelagem Hidráulica: Modelos de simulação hidráulica são utilizados para prever o comportamento do sistema em diferentes cenários, otimizando a operação e prevenindo falhas (Eker & Kara, 2003).

- **Resiliência do Sistema**

1. Ações em Situações de Emergência: São elaborados estratégias e planos de contingência para garantir a continuidade operacional do sistema em situações emergenciais, como desastres naturais ou falhas técnicas (Huang e Zhang, 2023).
2. Planos de Segurança da Água (PSA): Desenvolvem-se Planos de Segurança da Água (PSA) com o objetivo de identificar riscos, prevenir contaminações e fortalecer a gestão integrada da segurança hídrica em todo o sistema (Kumpel, Delaire e Peletz, 2018).

3.3.3. *Indicadores de Desempenho da Operação de um SAA*

A gestão eficiente dos aspectos operacionais de um SAA, apoiada por um sistema robusto de indicadores de desempenho, é essencial para administrar de forma eficaz as operações, utilizando um conjunto sólido de indicadores de desempenho. A incorporação de novas

tecnologias, a melhoria do consumo energético e a análise das mudanças geográficas e de tempo são fatores primordiais para uma boa gestão dos SAAs.

Tais Indicadores de Desempenho (ID) são instrumentos que possibilitam medir o quão bem os recursos são aproveitados e o quão eficientes são os serviços oferecidos pelos SAA (Silva, 2020). A escolha cuidadosa desses indicadores, considerando sua importância, facilidade de medição e capacidade de comparação, é essencial para a análise comparativa e a avaliação do desempenho entre diferentes sistemas.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Os indicadores podem ser divididos em: Indicadores estruturais, focam na avaliação da base física e nas particularidades inerentes ao sistema, indicadores operacionais, quantificam o desempenho das atividades rotineiras, a exemplo do fornecimento e purificação da água, indicadores de qualidade, acompanham o padrão da água que chega às pessoas e a excelência do atendimento e por fim, os indicadores econômicos, investigam as questões de dinheiro, a exemplo dos gastos com o dia a dia e as aplicações financeiras.

3.4. Modelagem da operação de SAA: Princípio da modelagem aplicado a SAA

Os fenômenos ambientais variam continuamente no tempo e no espaço, apresentando comportamentos complexos, não lineares e influenciados por múltiplas escalas e interações, inicialmente vistas como aleatórias. Essa complexidade impõe desafios à modelagem ambiental, que deve representar essas dinâmicas por meio de modelos matemáticos e computacionais. Segundo Oreskes (2003), a modelagem ambiental é uma ferramenta essencial para entender a complexidade dos sistemas naturais, permitindo a simulação de cenários e a previsão de comportamentos futuros.

Nesses modelos, as propriedades ambientais são tratadas como variáveis, e suas interações são expressas por operações aritméticas ou lógicas. Para que esses modelos sejam implementados digitalmente, é necessário realizar discretizações (dividir um domínio contínuo, como o espaço, em partes finitas ou discretas) e quantizações (atribuir valores numéricos discretos a uma grandeza contínua) nos domínios espacial, temporal e dos atributos, criando estruturas manipuláveis que representem o comportamento dos fenômenos no espaço-tempo. Como afirmam Borsuk, Stow e Rechhow (2001), a discretização e a

quantização são etapas cruciais na construção de modelos que buscam representar a realidade de forma precisa.

Portanto, em uma escala crescente, os computadores vêm sendo mais utilizados para compreender, estudar e analisar sistemas da realidade, sistemas estes que se se revelam cada vez mais complexos por conta da evolução científica e consequente melhor entendimento destes sistemas. De acordo com Kauffman (2000), a evolução da computação e das técnicas de modelagem possibilitou a análise de sistemas complexos de forma mais eficaz, permitindo a exploração de interações que antes eram difíceis de serem compreendidas. Diante deste cenário, são criados modelos que expliquem e simulem estes sistemas. Segundo Levin, Barrett e Bockstael (2013), a modelagem computacional não apenas facilita a compreensão dos fenômenos ambientais, mas também fornece uma base para a tomada de decisões informadas em políticas públicas e gestão ambiental.

Segundo Felgueiras et al. (2001), modelos matemáticos, aritméticos e lógicos buscam representar propriedades e processos do meio físico natural e têm sido muito usados nos campos das ciências sociais com o propósito de subsidiar estudos e compreensões do meio ambiente, promovendo intervenções fundamentadas, responsáveis e colaborativas. Dito isso, a modelagem em um sistema de abastecimento de água pode possuir diversas formas, como mostrado por Todini, 2020:

- A modelagem hidráulica, que detalha o movimento da água nas redes, calcula vazões, pressões e níveis nos reservatórios. Softwares como EPANET simulam redes de água, permitindo avaliar o efeito de cenários operacionais.
- A modelagem de qualidade da água, que reproduz a dispersão e alteração de substâncias na água, assegurando que a qualidade atenda aos padrões necessários.
- A modelagem de sistemas de bombeamento, que otimiza o uso das estações de bombeamento, reduzindo gastos de energia e custos operacionais. Isso abrange a simulação das curvas de desempenho das bombas e o uso de algoritmos para definir os melhores horários de uso.
- A modelagem da demanda de água, que antecipa as futuras necessidades de água, baseando-se em dados passados, clima e crescimento populacional. É essencial para o planejamento e expansão do sistema.

- A modelagem de otimização, que utiliza algoritmos de otimização para achar as melhores estratégias, considerando objetivos como reduzir custos, aumentar a confiabilidade e garantir a qualidade.

É neste contexto que se insere a chamada “Análise de Sensibilidade”, que segundo Frank-Paul, M. (1978), trata-se de um método voltado à identificação dos fatores mais impactantes em um sistema, ou seja, considerando que todos os modelos são abstrações imperfeitas da realidade e que dependem de dados de entrada para gerar valores de saída, quando estes dados são imprecisos e possuem erros, eles também acabam por gerar resultados imprecisos e propagando estes erros e esta análise se baseia justamente na quantificação desta dessas imprecisões/erros.

3.4.1. Estudos de Caso: Programação e Automação em SAAs

Segundo Olsson (2021), a aplicação de programação e automação em sistemas de abastecimento de água visa otimizar a gestão, reduzir perdas, aumentar a eficiência energética e garantir a distribuição equitativa dos recursos hídricos. Diversos estudos de caso demonstram os benefícios da implementação dessas tecnologias em diferentes contextos urbanos e rurais, tais como:

3.4.1.1. Porto Rico, EUA

Um exemplo notável da aplicação de programação e automação em sistemas de abastecimento de água, segundo Ubert e Alcala (2017), foi o projeto de modernização de 121 estações de filtração em Porto Rico, EUA, realizado entre 2011 e 2014 em uma região insular. A iniciativa teve como principal objetivo automatizar completamente essas unidades, que apresentavam processos similares, mas com arquiteturas de controle e infraestrutura bastante distintas. A complexidade do projeto exigiu uma abordagem estruturada e altamente técnica, com forte dependência de soluções baseadas em programação para garantir a padronização e a eficiência operacional.

Para isso, foi desenvolvido um sistema robusto utilizando controladores lógicos programáveis e supervisão remota via SCADA (Componentes de hardware e software especializado em controle de processos industriais; coleta, monitoramento e processamento de dados em tempo real). Cada planta chegou a operar com cerca de 800 pontos de entrada e saída (I/O),

totalizando quase 100 mil pontos controlados remotamente em toda a rede. A equipe responsável criou bibliotecas de programação parametrizáveis que permitiram adaptar os códigos às necessidades específicas de cada estação, mantendo um padrão técnico elevado e facilitando futuras expansões e manutenções.

Além do aspecto técnico, o projeto envolveu uma reestruturação organizacional importante. A operação que antes era predominantemente manual passou a ser conduzida remotamente, exigindo o treinamento dos operadores e a redefinição de rotinas operacionais. As plantas foram organizadas em grupos (ou clusters), facilitando o gerenciamento em escala e possibilitando a atuação centralizada com maior controle e eficiência.

A automação trouxe benefícios substanciais para o sistema de abastecimento: maior confiabilidade, redução de intervenções manuais, diagnóstico remoto de falhas e melhoria no desempenho energético. A capacidade de monitoramento em tempo real permitiu a adoção de ações preventivas e corretivas de forma mais ágil, o que resultou em ganhos operacionais significativos.

Esse estudo de caso evidencia a importância da programação em sistemas de abastecimento de água, mostrando que não se trata apenas de uma ferramenta de controle, mas de um pilar estratégico para garantir eficiência, sustentabilidade e resiliência na operação desses sistemas. O uso de tecnologias como SCADA e bibliotecas padronizadas de código torna possível integrar diferentes estruturas físicas e operacionais em uma rede coesa, inteligente e sustentável, algo cada vez mais necessário diante dos desafios atuais de gestão hídrica.

3.4.1.2. Algoritmo de Controle Preditivo Econômico

Um estudo publicado no periódico “Journal of Water Resources Planning and Management” por Wang e Zhou (2021) apresenta uma solução inovadora para otimização energética em sistemas de distribuição de água, utilizando controle preditivo econômico em tempo real. O trabalho propõe a aplicação de um algoritmo de Controle Preditivo Econômico (EMPC) que atua de forma autônoma e inteligente na escolha das bombas a serem acionadas ao longo do dia, levando em consideração tanto as flutuações nos preços da energia elétrica quanto a previsão de demanda hídrica da população atendida. A base desse modelo está na integração com o simulador hidráulico EPANET, que permite avaliar com precisão o comportamento da rede a partir das decisões de bombeamento.

O algoritmo é programado para operar com um horizonte de previsão deslizante (ou receding horizon), recalculando continuamente as melhores opções de operação com base nos dados atualizados. Essa abordagem permite, por exemplo, que o sistema acione as bombas durante horários de tarifa reduzida e reduza sua operação em períodos de pico tarifário, tudo isso mantendo os níveis de pressão e volume de água dentro dos parâmetros exigidos para garantir o abastecimento.

O método foi testado em um sistema de distribuição conhecido como “*Richmond Pruned*”, uma rede de *benchmark*² amplamente utilizada em estudos acadêmicos. Os resultados obtidos com a aplicação do EMPC foram comparados com um sistema tradicional baseado em controle por níveis de reservatório (o chamado trigger-level control). A diferença foi significativa: o algoritmo EMPC resultou em uma redução expressiva dos custos energéticos, sem comprometer o fornecimento de água ou a segurança operacional da rede.

Esse estudo evidencia de forma clara como a programação avançada e o uso de algoritmos preditivos podem transformar a operação de sistemas de abastecimento de água. A automação inteligente, neste caso, não apenas simplifica o processo de decisão como também potencializa a eficiência energética, oferecendo soluções adaptativas e econômicas frente às crescentes pressões sobre os recursos hídricos e sobre os custos operacionais. A adoção de abordagens como essa representa um avanço significativo na direção de sistemas mais sustentáveis, autônomos e resilientes, reforçando o papel da engenharia de controle, modelagem computacional e automação na gestão moderna da água.

3.5. Análise de sensibilidade e sua aplicação em SAAs

Para compreender o impacto das alterações nos dados de entrada de um modelo sobre os seus resultados, utiliza-se uma ferramenta fundamental: a análise de sensibilidade. No âmbito dos sistemas de abastecimento de água, ela é importante para descobrir as variáveis mais relevantes que afetam o funcionamento do sistema, possibilitando uma administração mais eficiente e consciente.

A análise de sensibilidade tem como objetivo encontrar os pontos críticos de incerteza em modelos ambientais com distribuição espacial, incluindo os dados utilizados e os parâmetros

² Benchmark é uma ferramenta de gestão que consiste na comparação de estratégias, processos, metodologias, produtos ou serviços entre pessoas ou empresas.

do modelo (Koo et al., 2021). Essa análise completa é imprescindível para modelos não identificáveis, nos quais as interações complexas impedem que se determine o efeito isolado de cada variável (Koo et al., 2021).

Em Chennai, na Índia, a técnica de modelagem de sistemas dinâmicos foi utilizada para medir a fragilidade dos recursos de água perante a pressão hídrica da cidade. Os dados mostraram como a avaliação da sensibilidade se aplica bem à administração de sistemas urbanos intrincados, onde o aumento da procura e a falta de água pedem decisões sólidas e completas (Rajarethinam, Pannerselvam e Thangavelu, 2021).

Analogamente, na Bacia do Alto Bilate, na Etiópia, a avaliação de sensibilidade foi associada à modelagem hidrológica para estimar os recursos hídricos de superfície e melhorar a sua distribuição entre diferentes fins. O método permitiu entender melhor a dinâmica entre oferta e procura, ajudando numa administração mais igualitária e duradoura da água na área (Genjebo, Kemal e Nannawo, 2023).

Em relação ao Aquífero Guarani, que abrange diversos países sul-americanos, a análise da sensibilidade cumpre uma função crucial na gestão unificada dos recursos hídricos que ultrapassam fronteiras. Ao levar em conta as relações entre usos diversos e as possíveis fragilidades do sistema, a ferramenta é vital para garantir a longevidade e a colaboração internacional no uso do aquífero (Pereira & Moraes, 2020).

Finalmente, na área de Zichebashskoe, na Rússia, a avaliação da sensibilidade foi usada num cenário industrial para aperfeiçoar a injeção de água com pouco sal em campos petrolíferos. O estudo comprovou como este método pode ser útil não só na gestão do meio ambiente, mas também para aumentar a eficácia operacional nos processos de recuperação de recursos (Zeinijahromi, Shahrokhi e Khalili, 2015).

Portanto, através destes exemplos, pode-se compreender a importância e a aplicabilidade, tanto da modelagem, quanto da análise de sensibilidade, não só no contexto ambiental, mas também em sistemas hídricos e por isso, esta análise será o objeto de estudo neste trabalho.

4. METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa foi estruturada em etapas sequenciais, com o objetivo de realizar uma análise de sensibilidade de um sistema de abastecimento de água de um modelo benchmark escolhido e visando compreender o funcionamento da rede, seus componentes principais e suas características operacionais.

Em seguida, foram identificadas as variáveis e parâmetros que influenciam diretamente o desempenho do sistema, como demanda de água, condição dos equipamentos, que incluem fatores como a rugosidade das tubulações, pressões e padrões de consumo. Essa identificação foi fundamental para a seleção das variáveis que foram utilizadas posteriormente na análise de sensibilidade. Além disso, após a escolha destas variáveis e parâmetros, foi analisada também qual a possível variação que estas podem sofrer com o decorrer do tempo e pelo desgaste de uso.

Com base nessas informações, foi feita a análise de dados do modelo, que engloba dados de vazão e pressão, além da utilização de coeficientes de sensibilidade.

Para a modelagem do sistema, foi utilizada a integração da linguagem de programação Python com as funcionalidades do software EPANET 2, que permite modelar o comportamento hidráulico da rede. A análise de sensibilidade foi conduzida da mesma forma com o desenvolvimento de scripts³ em Python, possibilitando avaliar o impacto das variáveis selecionadas no desempenho e eficiência do sistema de abastecimento, bem como o que este impacto pode significar.

De forma geral, a metodologia pode ser ilustrada pela figura 4.1:

³ Scripts são blocos de instruções escritas em uma linguagem de programação específica que executam tarefas específicas

Figura 4.1 - Fluxograma da Metodologia

Fonte: O autor (2025).

4.1. Área de Estudo

Inicialmente, para examinar a sensibilidade, foi selecionado o sistema de água de Araraquara, cidade no interior paulista por questões de facilidade de acesso aos dados, porém não foi possível trabalhar com os mesmos pois houve uma mudança na gestão responsável pelo sistema, o que inviabilizou o acesso aos dados em tempo hábil para a pesquisa.

Diante disso, e considerando a necessidade de um modelo com topologia, parâmetros e documentação adequada para o presente estudo, que consiste em simulações, optou-se pela utilização de modelos benchmark. Alguns destes modelos são disponibilizados pelo Centre for Water Systems (UoE, c2025), que mantém um repositório de redes sintéticas e reais para estudos acadêmicos envolvendo otimização, simulação, confiabilidade e análises de desempenho.

Entre os benchmarks disponíveis, selecionou-se o modelo denominado New York Water Supply System, que consiste em uma representação simplificada do sistema de túneis de abastecimento de Nova Iorque. Embora o objetivo original deste benchmark seja a avaliação de alternativas de projeto economicamente eficientes para a expansão do sistema, seu uso no

presente estudo não se relaciona a essa finalidade. A escolha foi motivada principalmente por conveniência metodológica: trata-se de um sistema de pequena escala, com configuração bem documentada e parâmetros suficientemente simples para permitir verificações manuais.

Essa característica de possibilidade de verificações manuais é particularmente vantajosa em estudos que envolvem desenvolvimento de algoritmos e rotinas computacionais, como é o caso deste trabalho, no qual o programa em Python implementa manipulações paramétricas e cálculos hidráulicos utilizando o EPANET/ WNTR. Um benchmark de baixa complexidade permite a validação individualmente de cada etapa do código, como variações paramétricas, leitura de nós e trechos, propagação dos efeitos no balanço hidráulico e verificação do comportamento das pressões e vazões, além dos cálculos de índices necessários para a análise de sensibilidade. Dessa forma, é possível conferir se o programa está retornando resultados consistentes, comparando-os com cálculos manuais ou com valores esperados a partir das equações hidráulicas fundamentais.

Por fim, em relação ao uso de benchmarks, existem algumas vantagens particulares para esta escolha. Segundo Vargas (2009), esta preferência:

- Permite um processo de investigação contínuo, comparando práticas ou sistemas de referência para identificar oportunidades de melhoria.
- Estimula a mudança e a inovação, ou seja, não apenas replicar, mas aprender com práticas já estabelecidas e adaptá-las ao próprio contexto.
- Possui flexibilidade em seu uso, podendo ser usado por qualquer espécie ou organização independentemente de porte ou área da pesquisa.
- Facilita a avaliação e conferência dos dados, por ser um sistema bem documentado e comparável.

4.2. Coeficientes de Sensibilidade

No presente estudo, a análise da sensibilidade da rede de distribuição de água foi feita utilizando duas abordagens quantitativas: o Índice de Sensibilidade (SI) e o Índice de Elasticidade (EI). Segundo Loucks & Beek (2017), tais métricas possibilitam determinar de que maneira uma grandeza resultante do sistema reage a ligeiras mudanças em uma grandeza

inicial, propiciando informações cruciais para a definição de prioridades em medidas de gestão e alocação de recursos.

O Índice de Sensibilidade (SI) é calculado com a seguinte fórmula (4.1):

$$SI = \frac{F(V_0 + \Delta V) - F(V_0 - \Delta V)}{2\Delta V} \quad (4.1)$$

Em que:

- F representa a variável de saída ou função resultante do modelo;
- V é o parâmetro ou variável de entrada que será testada sua sensibilidade na função F;
- V_0 é o valor base (ou nominal) do parâmetro V;
- ΔV é a variação aplicada em torno de um valor base V_0 ;
- SI é o índice de sensibilidade da função F em relação ao parâmetro V.

Este indicador revela o ritmo de alteração nos resultados diante de mudanças específicas nos dados de entrada, ajudando a identificar os fatores que mais impactam o desempenho do sistema, bem como a proporcionalidade deste impacto (se é diretamente ou indiretamente proporcional), porém o mesmo possui dimensões, portanto, não sendo possível comparações de diferentes variáveis.

Por sua vez, o Índice de Elasticidade (EI) padroniza o valor do índice de sensibilidade, retirando suas dimensões e possibilitando estas comparações. Sua fórmula é dada por (4.2):

$$EI = \left(\frac{V_0}{F(V_0)} \right) SI \quad (4.2)$$

Em que:

- EI é o índice de elasticidade da função F em relação à variável V_0 ;
- $\frac{V_0}{F(V_0)}$ representa a razão entre o valor base da variável de entrada e o valor correspondente da variável de saída.

Este indicador revela o quão sensível é o resultado, mostrado adimensionalmente, em comparação a uma mudança no dado inicial. Isso facilita comparar elementos diferentes, mesmo que sejam medidos de formas distintas.

Os dois valores calculados foram usados nos resultados vindos das simulações de água feitas no EPANET 2, junto com programas em Python para simplificar as contas e organizar as informações.

4.3. EPANET 2

O EPANET 2 é um software desenvolvido pela U.S. Environmental Protection Agency para simulação do comportamento hidráulico e da qualidade da água em redes de distribuição submetidas a uma determinada pressão (EPA, 2025). Por meio dele, é possível realizar simulações dinâmicas ao longo do tempo, obtendo dados como vazão em cada trecho da tubulação, pressão em nós, níveis de água em reservatórios de nível variável e concentração de substâncias químicas transportadas na rede.

A modelagem permite também rastrear sua origem dentro do sistema, sendo especialmente útil na análise da qualidade da água distribuída. As redes modeladas no EPANET são compostas por elementos como tubulações, válvulas, bombas, nós e reservatórios, e a simulação é dividida em múltiplos intervalos de tempo, proporcionando maior precisão nos resultados.

O EPANET 2 foi selecionado como ferramenta principal deste estudo devido à sua integração consolidada com a linguagem Python, possibilitada por bibliotecas específicas já existentes que permitem a leitura de arquivos INP, a execução de simulações hidráulicas e a extração automática de resultados. Essa integração representa uma vantagem significativa frente a outros simuladores, pois oferece um ambiente programável familiarizado pelo autor do presente estudo.

Além disso, o EPANET utiliza uma interface gráfica baseada em arquivos INP, com geração de resultados em tabelas e gráficos, o que facilita a análise de sensibilidade sobre quais parâmetros/variáveis em quais trechos do sistema pode-se observar maior influência. O EPANET também oferece a “Toolkit”, uma biblioteca DLL que permite acesso às suas funções via programação em linguagens como C++ e Visual Basic.

No caso deste estudo, conforme presente no arquivo INP usado do modelo benchmark, foi utilizado o modelo de Hazen-Williams disponível no EPANET 2 para simulação hidráulica e posterior coleta das vazões em cada tubulação e pressões em cada nó.

Por fim, no escopo desta pesquisa, o EPANET foi utilizado de forma direcionada às necessidades da modelagem hidráulica do sistema de abastecimento. A partir das bibliotecas em Python, foi possível importar o modelo benchmark, simular o comportamento da rede e obter, de forma automatizada, dados de interesse como vazões nos trechos e pressões nos nós. Esses resultados forneceram a base numérica necessária para a aplicação dos coeficientes de sensibilidade, permitindo avaliar como alterações em variáveis e parâmetros selecionados influenciam o desempenho hidráulico do sistema. Assim, o uso do EPANET esteve diretamente associado à execução de simulações programáveis, essenciais para a construção dos índices de sensibilidade que orientaram toda a etapa analítica do estudo.

4.4. Python

Segundo Menezes (2010), a linguagem de programação Python destaca-se por sua sintaxe simples e de sua clareza estrutural. Apesar de apresentar uma abordagem acessível, trata-se de uma linguagem robusta, capaz de atender tanto a tarefas administrativas quanto ao desenvolvimento de projetos de maior complexidade. Sua objetividade e organização contribuem para um aprendizado mais direto e eficiente, características que justificam sua ampla adoção em ambientes educacionais e profissionais como do presente estudo.

A linguagem Python se consolidou como uma ferramenta fundamental em muitos setores, incluindo a engenharia e a concepção de sistemas hídricos. Sua sinergia com o EPANET (Environmental Protection Agency Network) provê um espaço robusto para a avaliação e simulação de redes de distribuição de água.

Além das características gerais da linguagem, o presente estudo fez uso de bibliotecas fundamentais para organização e leitura de arquivos, bem como a análise e cálculo dos dados trabalhados, tornando o desenvolvimento das rotinas mais estruturado utilizando as seguintes bibliotecas não relacionadas ao EPANET mas para organização e leitura dos dados de simulação hídrica:

- pathlib;

- `re`;
- `matplotlib.pyplot`.

A biblioteca “pathlib” foi empregada para o gerenciamento de diretórios e caminhos de arquivos de maneira mais segura e intuitiva. Sua interface facilita operações como criação, navegação e leitura de arquivos, garantindo maior portabilidade do código entre diferentes sistemas operacionais. No caso desta pesquisa, esta biblioteca foi usada para ler o arquivo INP”, que é o arquivo que carrega as informações dos parâmetros do sistema de abastecimento de águas, como rugosidade, diâmetro e comprimento dos canos e outros.

Outra ferramenta essencial foi o módulo “re”, responsável pela manipulação de expressões regulares. Ele permite identificar, extrair e modificar padrões textuais complexos, sendo particularmente útil durante a leitura e interpretação dos arquivos de entrada utilizados nas simulações hidráulicas. Essa capacidade de filtrar e padronizar informações garante que os parâmetros processados pelo programa permaneçam consistentes com a estrutura definida pelo modelo. Neste trabalho, foi utilizado para a criação da função de leitura do arquivo INP.

Por fim, a biblioteca “matplotlib.pyplot” foi utilizada para gerar representações gráficas dos resultados obtidos, como variações de pressão, vazão ou distribuição de parâmetros ao longo da rede. Sua flexibilidade possibilita a criação de gráficos personalizados e adequados tanto para validação do comportamento hidráulico quanto para exposição dos resultados no relatório técnico. Na simulação, foi usado para gerar uma visão superior do sistema de abastecimento.

Dessa forma, o conjunto de bibliotecas auxiliares oferece suporte ao fluxo completo de desenvolvimento: desde a leitura e organização dos dados até a visualização clara e interpretável das simulações.

4.4.1. A Integração do Python com o EPANET

A união do Python com o EPANET possibilita a automatização de processos, a execução de análises complexas e a customização de simulações de maneira mais eficaz. Há várias bibliotecas Python que simplificam essa integração, como a “epanetAPI”.

A integração entre Python e EPANET oferece um conjunto de benefícios que aprimoram a eficácia e adaptabilidade na modelagem e avaliação de sistemas de abastecimento de água.

Um dos maiores ganhos dessa união é a otimização de tarefas, possibilitando o uso do Python para criar modelos, rodar simulações e examinar resultados de maneira automática. Essa característica é valiosa em estudos que demandam diversas simulações em diferentes situações, economizando tempo e recursos (Leone & Nocerino, 2021).

Além disso, a capacidade de análise do Python se destaca com o emprego de bibliotecas como “Pandas” e “NumPy” (bibliotecas de análise de dados), que simplificam o manuseio e a interpretação dos dados obtidos das simulações do EPANET. Com esses recursos, é viável criar representações visuais mais compreensíveis, realizar análises estatísticas aprofundadas e obter informações importantes para uma decisão.

Outro aspecto importante é a chance de personalizar os modelos, pois Python permite ajustar os parâmetros e formatos do EPANET de acordo com requisitos individuais. Isso pode abranger desde a aplicação de algoritmos de controle sob medida até a conexão com outros sistemas de dados, incluindo a criação de interfaces gráficas mais fáceis de usar e acessíveis aos usuários.

Por fim, a união das habilidades de otimização do Python com o ambiente de simulação do EPANET impacta positivamente a qualidade dos projetos de redes hidráulicas. Essa integração pode ser utilizada na procura por soluções mais acessíveis, assegurando níveis de pressão ideais e diminuindo desperdícios na distribuição, o que fortalece a tomada de decisões e a torna mais voltada a resultados (Manzano et al., 2021).

No contexto específico da modelagem hidráulica, este trabalho utilizou recursos da biblioteca WNTR (Water Network Tool for Resilience), que é uma extensão moderna e programável voltada para análise de redes de distribuição de água. O módulo wntr permite carregar modelos no formato INP, ajustar parâmetros estruturais e operar simulações hidráulicas, fornecendo uma interface programática mais flexível que o EPANET clássico. Essa ferramenta foi central para a implementação da análise de sensibilidade, pois possibilita manipular atributos como rugosidade, diâmetro, demanda e elevação de maneira direta dentro do ambiente Python. Foram utilizadas as seguintes bibliotecas de integração Python-EPANET:

- wntr;
- wntr.epanet

O módulo `wntr.epanet` fornece a ponte de comunicação entre o Python e o mecanismo hidráulico original do EPANET, permitindo que as simulações usem o solver clássico quando desejado. Isso viabiliza a comparação entre resultados obtidos pelos diferentes métodos de cálculo.

4.5. Variáveis/Parâmetros-Chave

A seleção das variáveis mais importantes para examinar os sistemas de distribuição de água depende muito das características únicas de cada situação. No entanto, alguns aspectos são geralmente considerados vitais para assegurar que esses sistemas funcionem de forma eficaz e duradoura.

No presente estudo, as variáveis podem ser divididas em duas: **variáveis e parâmetros de entrada** e **variáveis de saída**. Essa distinção é fundamental na análise de sensibilidade, pois é através dela que se consegue entender a relação de proporcionalidade e influenciabilidade entre elas. As variáveis de entrada são os parâmetros escolhidos para compreender sua influência nas variáveis de saída. Por exemplo, a demanda de água de uma população influencia direta ou indiretamente na vazão que passa pelos trechos do sistema de abastecimento, neste caso, a demanda é a variável de entrada e a vazão é a variável de saída, sendo o papel da análise de sensibilidade dimensionar esta influência.

Desta forma, as variáveis escolhidas foram:

4.5.1. Variáveis e Parâmetros de entrada

As variáveis de entrada consideradas neste estudo representam os elementos do sistema hidráulico cujos valores podem se alterar de forma significativa ao longo do tempo ou em função das condições operacionais da rede. Já os parâmetros correspondem a características estruturais do sistema, que permanecem constantes ou apresentam variações muito pequenas dentro do intervalo de análise. Essa distinção segue as definições clássicas de matemática aplicadas em análises de sensibilidade, segundo as quais parâmetros são constantes paramétricas, sem variação temporal relevante, enquanto variáveis representam o estado do sistema e podem assumir diferentes valores dentro de um intervalo previsto (LOPES, 2017). Neste estudo, foram consideradas as seguintes:

- Demanda de água (Variável): A demanda é um dos fatores mais influentes no desempenho hidráulico. Alterações nos consumos afetam diretamente a distribuição de vazões e pressões ao longo da rede. A demanda também incorpora efeitos relacionados a hábitos de consumo, variações horárias, comportamento dos usuários, sazonalidade, bem como a qualidade em que as tubulações se encontram, pois engloba parâmetros como:

- As perdas de água impactam diretamente o volume que precisa ser distribuído no sistema. Quando ocorrem perdas reais (vazamentos) ou aparentes (falhas de medição), a demanda registrada nos nós deixa de representar a demanda real que deve ser atendida. Para suprir o consumo desejado pela população, o sistema precisa fornecer uma vazão maior do que aquela inicialmente prevista de forma a compensar essa perda e suprir a demanda. Na análise de sensibilidade, essa condição foi representada por meio do aumento proporcional das demandas dos nós. Assim, uma perda de X% implica elevar a demanda em X%, de modo que o modelo hidráulico receba um valor ajustado que corresponda ao volume necessário para compensar a parcela perdida no percurso. Isso permite avaliar como variações no nível de perdas influenciam pressões, vazões e o desempenho geral do sistema.

- Características da rede – Rugosidade das tubulações (Parâmetro): A rugosidade é um parâmetro hidráulico essencial, pois influencia diretamente as perdas de carga ao longo das tubulações. Pequenas alterações nesse valor podem modificar significativamente a energia contida no sistema, afetando as condições de escoamento e o nível de pressão disponível nos nós. Essa sensibilidade é relevante tanto do ponto de vista operacional quanto de calibração de modelos.

A análise de sensibilidade considerou variações controladas nos parâmetros de rugosidade das tubulações e demanda nodal (utilizada como representação da perda de água). As magnitudes de ΔV (conforme Fórmula 4.2.) foram definidas da seguinte forma:

- Para a rugosidade, adotou-se $\Delta V = 10$ no coeficiente de Hazen–Williams. Esse valor corresponde a uma variação típica observada em materiais como ferro fundido, conforme Yildirim & Özger (2008), que apresentam comportamento hidráulico estável e baixa amplitude de alteração da rugosidade ao longo do tempo. A escolha desses materiais como referência baseia-se no fato da rugosidade no arquivo possuir o valor da rugosidade média de ferro fundido ($C=100$ para ferro novo e $C=90$ para ferros mais velhos). Assim, a variação aplicada representa um desvio plausível das condições reais encontradas em redes com tubulações poliméricas.

- Para a perda de água, optou-se por representar o fenômeno por meio da alteração das demandas nos nós. A variação ΔV adotada corresponde ao desvio padrão das próprias demandas presentes no arquivo INP, permitindo que o modelo utilize a dispersão real das cargas hidráulicas como referência estatística.

Dessa forma, os parâmetros ΔV adotados para rugosidade e demanda constituem bases adequadas para interpretar, nos tópicos seguintes, como essas variáveis influenciam o comportamento hidráulico global da rede.

4.5.2. Variáveis de saída

As variáveis de saída representam os resultados obtidos após a execução das simulações hidráulicas e refletem o comportamento operacional do sistema quando submetido às perturbações nos parâmetros de entrada. No presente estudo, foram avaliadas:

- Vazões nas tubulações: A vazão é um parâmetro que indica o volume de água circulando em cada trecho da rede por um dado período de tempo. Alterações em demanda, rugosidade ou perdas afetam diretamente os fluxos internos, permitindo identificar como o sistema redistribui o escoamento diante das modificações impostas.
- Pressões nos nós: A pressão é uma variável crítica para a operação segura e eficiente de sistemas de abastecimento. Ela reflete a disponibilidade de energia hidráulica nos pontos de consumo. Analisar a sensibilidade das pressões possibilita identificar nós mais vulneráveis a quedas de nível ou falhas na distribuição, bem como avaliar a robustez do sistema diante de perturbações externas.

4.6. O Código

O programa desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python teve uma linha de raciocínio, que segue os seguintes passos:

1. Criação de uma função para leitura do arquivo INP;
2. Criação de uma função para simulação do arquivo INP para retorno de valores de vazão e pressão;
3. Criação de uma função que consiga mudar os valores dos parâmetros das variáveis-chave do arquivo INP sem que o arquivo original seja alterado;

4. Criação de uma função, que através do “passo 3”, consiga calcular os índices de sensibilidade e elasticidade definindo um valor de mudança

Vale ressaltar que os dados do arquivo INP são próprios do modelo escolhido e não foram manipulados de forma alguma, além disso, a simulação realizada foi dirigida pela demanda, ou seja, o desencadeador ou motor principal dos eventos e processos simulados é a demanda de água real ou prevista, e é uma simulação estática, portanto, as demandas não variam ao longo do tempo.

4.6.1. Leitura e tratamento do arquivo INP

O código percorre o arquivo linha a linha, detectando títulos entre colchetes, como por exemplos [JUNCTIONS] ou [PIPES]. Cada seção é armazenada em um dicionário separado. O INP foi dividido em dois formatos principais:

- Tabelas: como em [PIPES] e [JUNCTIONS], onde a primeira linha define os campos e o restante das linhas são os valores destes campos em cada um dos trechos ou nós., Como mostrado na figura 4.6.1.1.1.:

Figura 4.6.1.1. - Exemplo Visual de Formato “Tabela” no Arquivo INP

4	[JUNCTIONS]			
5	;ID	Elev	Demand	Pattern
6	2	0	92.4	;
7	3	0	92.4	;
8	4	0	88.2	;
9	5	0	88.2	;
10	6	0	88.2	;
11	7	0	88.2	;
12	8	0	88.2	;
13	9	0	170.0	;
14	10	0	1.0	;
15	11	0	170.0	;
16	12	0	117.1	;
17	13	0	117.1	;
18	14	0	92.4	;
19	15	0	92.4	;
20	16	0	170.0	;
21	17	0	57.5	;
22	18	0	117.1	;
23	19	0	117.1	;
24	20	0	170.0	;

Fonte: O autor (2025).

- Pares chave–valor: como em [ENERGY], onde a primeira coluna define os campos e a segunda coluna define os valores destes campos, como mostrado na figura 4.6.1.2.:

Figura 4.6.1.2. - Exemplo Visual de Formato “Par Chave-Valor” no Arquivo INP

81	[ENERGY]	
82	Global Efficiency	75
83	Global Price	0
84	Demand Charge	0

Fonte: O autor (2025).

Após esta diferenciação, o código converte os valores em um formato de dicionário, ou seja, um formato de “Chave-Valor”. Por exemplo, na figura 4.6.1.3., a chave seria ‘TITLE’ e o

valor seria 'New York example by Murphy, Simpson and Dandy Res.Rep. No. R109, Dec. 1993':

Figura 4.6.1.3. - Exemplo Visual de Formato “Chave-Valor” gerado

```
'TITLE': 'New York example by Murphy, Simpson and Dandy Res.Rep. No. R109, Dec. 1993'
```

Fonte: O autor (2025).

O resultado é um dicionário aninhado onde se pode acessar diretamente o valor, por exemplo do diâmetro do segundo trecho no sistema no formato “Dados[“PIPES”][“Diameter”][2]”.

4.6.2. Simulação hidráulica

A simulação do sistema utiliza o algoritmo do EPANET através da função “wntr.sim.EpanetSimulator”. Portanto, a execução da simulação e os resultados que ela retorna são encapsulados na parte do código mostrada pela figura 4.6.2.1.

Figura 4.6.2.1. - Código Responsável por Executar a Simulação

```
140 def simular_rede(wn_model):
141     sim = wntr.sim.EpanetSimulator(wn_model)
142     results = sim.run_sim() # roda simulação hidráulica
143     return results
```

Fonte: O autor (2025).

Na variável “results” são armazenados os resultados da simulação, o que também inclui os dados de vazão em cada trecho e a pressão em cada nó, sendo possível acessar estes dados do seguinte modo:

- results.link[“flowrate”] → vazões em cada trecho
- results.node[“pressure”] → pressões em cada nó

De forma que, as funções para retorno destes dados são ilustrados pela figura 4.6.2.2. e 4.6.2.3.:

Figura 4.6.2.2. - Código Responsável por Retornar as Vazões em Cada Trecho em Forma de Lista

```

145 def retornar_vazoes(wn_model):
146     """
147     Executa a simulação hidráulica e retorna uma lista com
148     as vazões (flowrate) de todos os trechos (pipes).
149     """
150     res_base = simular_rede(wn_model)
151     flow_all = res_base.link["flowrate"]
152
153     # Converte todos os valores do DataFrame em uma lista (achatada)
154     vazoes = flow_all.values.flatten().tolist()
155     return vazoes

```

Fonte: O autor (2025).

Figura 4.6.2.3. - Código Responsável por Retornar as Pressões em Cada Nó em Forma de Lista

```

158 def retornar_pressoes(wn_model):
159     """
160     Executa a simulação hidráulica e retorna uma lista com
161     as pressões (pressure) nos nós no último instante da simulação.
162     """
163     res_base = simular_rede(wn_model)
164     pressoes_df = res_base.node["pressure"]
165
166     # Último instante da simulação (uma linha → pressões finais)
167     pressoes_finais = pressoes_df.iloc[-1].values.tolist()
168     return pressoes_finais

```

Fonte: O autor (2025).

4.6.3. Simulação com parâmetros alterados

Uma das partes centrais do código é a função que realiza a simulação hidráulica e permite alterar parâmetros específicos, como rugosidade das tubulações, diâmetro, comprimento, demanda de consumo e elevação dos nós.

Essas modificações são feitas por meio de uma cópia do modelo original, o que evita que os dados-base sejam comprometidos. Em seguida, o simulador hidráulico do WNTR, EpanetSimulator, executa o cálculo das variáveis de interesse, retornando as vazões nos trechos e as pressões nos nós.

O ajuste de parâmetros é essencial para os testes de análise de sensibilidade, pois permite verificar como pequenas variações em variáveis de entrada afetam os resultados simulados. Dessa forma, é possível compreender a influência relativa de cada parâmetro na resposta do sistema. Esta parte do código é compreendida na figura 4.6.3.1.:

Figura 4.6.3.1. - Código Responsável por Simular o Sistema de Abastecimento Alterando Algum Parâmetro

```

170 def simular_com_fator_parametro(wn_model, campo, delta, variavel_saida):
171     from copy import deepcopy
172
173     wn_modificado = deepcopy(wn_model)
174
175     campo_lower = campo.lower().strip()
176     variavel_saida = variavel_saida.lower().strip()
177
178     if campo_lower in ("roughness", "diameter", "length"):
179         for pipe_name in wn_modificado.pipe_name_list:
180             pipe = wn_modificado.get_link(pipe_name)
181             valor_atual = float(getattr(pipe, campo_lower))
182             setattr(pipe, campo_lower, valor_atual + delta)
183
184     elif campo_lower in ("demand", "base_demand"):
185         for jn_name in wn_modificado.junction_name_list:
186             junction = wn_modificado.get_node(jn_name)
187             for demand_ts in junction.demand_timeseries_list:
188                 demand_ts.base_value = float(demand_ts.base_value) + delta
189
190     elif campo_lower in ("elev", "elevation"):
191         for jn_name in wn_modificado.junction_name_list:
192             junction = wn_modificado.get_node(jn_name)
193             valor_atual = float(junction.elevation)
194             junction.elevation = valor_atual + delta
195     else:
196         raise ValueError(f"Campo '{campo}' não reconhecido.")
197
198     sim = wntr.sim.EpanetSimulator(wn_modificado)
199     results = sim.run_sim()
200
201     if variavel_saida == "vazao":
202         vazoes = results.link["flowrate"].values.flatten().tolist()
203         return vazoes
204     elif variavel_saida in ("pressao", "pressure"):
205         pressoes_df = results.node["pressure"]
206         pressoes_finais = pressoes_df.iloc[-1].values.tolist()
207         return pressoes_finais
208     else:
209         raise ValueError("Variável de saída deve ser 'vazao' ou 'pressao'.")

```

Fonte: O autor (2025).

4.6.4. Cálculo dos índices de sensibilidade e elasticidade

Após a simulação, o código aplica as fórmulas 4.2 e 4.3, que correspondem aos índices de sensibilidade (SI) e elasticidade (EI), respectivamente. Esses cálculos são realizados para listas de valores, considerando simultaneamente todos os elementos do sistema, o que permite uma análise mais abrangente do comportamento hidráulico.

A função responsável executa três etapas principais:

1. Recebe as listas de valores originais e modificados (com $+\Delta V$ e $-\Delta V$, segundo as fórmulas 4.2. e 4.3.);
2. Calcula o índice de sensibilidade por meio da diferença entre os resultados simulados;
3. Determina o índice de sensibilidade e o índice de elasticidade de cada um dos valores nominais dados na lista.

O resultado é um conjunto de listas contendo os valores de SI e EI para cada elemento da rede (seja tubulação ou nó), permitindo visualizar onde o sistema apresenta maior ou menor influência de uma variável específica. Esta parte do código é mostrada na figura 4.6.4.1.:

Figura 4.6.4.1. - Código Responsável por Calcular os Índices de Sensibilidade e Elasticidade

```

212 def calcular_sensibilidade_elasticidade(delta_v, V0_list, FV_plus_list, FV_minus_list, FV_list):
213     """
214     Calcula os índices de sensibilidade (Si) e elasticidade (Ei) para listas de valores.
215
216     Parâmetros:
217     - delta_v: valor de  $\Delta V$  (float)
218     - V0_list: lista de valores nominais V0
219     - FV_plus_list: lista de  $F(V0 + \Delta V)$ 
220     - FV_minus_list: lista de  $F(V0 - \Delta V)$ 
221     - FV_list: lista de  $F(V0)$ 
222
223     Retorna:
224     - Si_list: lista de índices de sensibilidade
225     - Ei_list: lista de índices de elasticidade
226     """
227     Si_list = []
228     Ei_list = []
229
230     for V0, FV_plus, FV_minus, FV in zip(V0_list, FV_plus_list, FV_minus_list, FV_list):
231         Si = (FV_plus - FV_minus) / (2 * delta_v)
232         Ei = (V0 / FV) * Si
233         Si_list.append(Si)
234         Ei_list.append(Ei)
235
236     return Si_list, Ei_list

```

Para a etapa de análise dos índices calculados, foi conduzida por meio de duas abordagens distintas. Na primeira, cada variável de entrada foi examinada separadamente em relação à uma respectiva variável de saída, permitindo identificar de forma individual a sensibilidade e a elasticidade associadas a cada parâmetro. Na segunda abordagem, os índices foram analisados de maneira conjunta, considerando simultaneamente diferentes variáveis de entrada e seus efeitos sobre as variáveis de saída. Esse procedimento possibilitou avaliar a influência relativa de cada variável de entrada no comportamento global do sistema, destacando quais parâmetros exercem maior impacto sobre os resultados obtidos.

5. RESULTADO E DISCUSSÕES

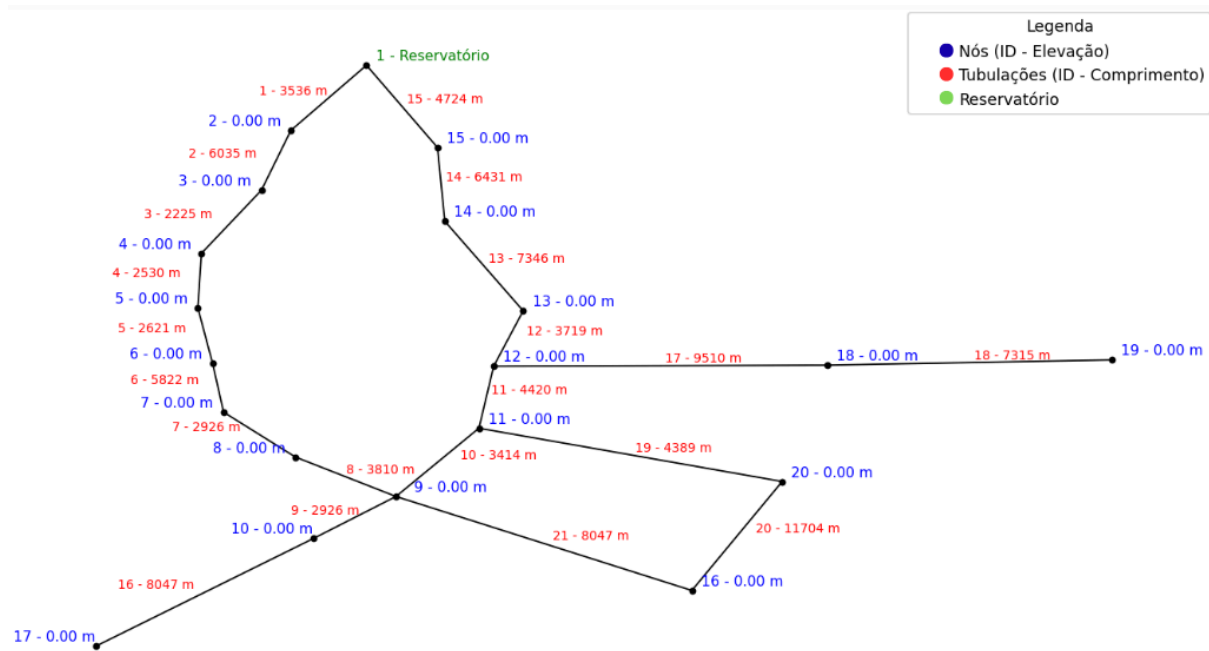
Este capítulo foca nos principais resultados encontrados a partir da simulação hidráulica da rede de abastecimento analisada, bem como das avaliações de sensibilidade aplicadas às variáveis e parâmetros que influenciam no SAA, além de discussão em torno do tema. Inicialmente, são apresentadas as características estruturais da rede simulada, de modo a contextualizar sua configuração física. Em seguida, são discutidos os índices calculados pelo código, permitindo compreender como alterações nestas na rugosidade e perda de água afetam as pressões e vazões do sistema. A partir dessas análises, são identificados padrões, relações e tendências que auxiliam na interpretação do desempenho do sistema.

5.1. Características da Rede Simulada

A rede simulada possui características principais como:

- 19 nós, juntamente com o reservatório;
- 21 tubulações;
- Não possui bombas, válvulas ou tanques;
- Não possui emissores, fontes de qualidade ou padrões de consumo.

Além disso, possui a vista de cima mostrada na figura 5.1.1., que também possui os IDs de cada nó, bem como sua topografia, que ajudará a compreender melhor a visualização dos próximos capítulos:

Figura 5.1.1. - Rede de Abastecimento Simulada com Vista Superior

Fonte: O autor (2025).

5.1.1. Nós

A rede de abastecimento é composta por 19 nós consumidores mais o reservatório, identificados pelos IDs de 2 a 20, todos com elevação igual a 0 m. Esse conjunto de nós representa pontos de consumo distribuídos ao longo da rede, com demandas variando entre 1,0 e 170,0 L/s. Como mostrado pela tabela 5.1.1.1.:

Tabela 5.1.1.1. - Junções da Rede Simulada

(Continua)

Id	Elevação (m)	Demanda (L/s)
2	0	92,4
3	0	92,4
4	0	88,2
5	0	88,2
6	0	88,2

(Conclusão)

Id	Elevação (m)	Demanda (L/s)
7	0	88,2
8	0	88,2
9	0	170
10	0	1
11	0	170
12	0	117,1
13	0	117,1
14	0	92,4
15	0	92,4
16	0	170
17	0	57,5
18	0	117,1
19	0	117,1
20	0	170

Fonte: O autor (2025)

5.1.2. Tubulações

A rede é composta por 21 tubulações pressurizadas, interligando o reservatório aos nós consumidores. Os trechos apresentam comprimentos que variam de 7.300 m a 38.400 m.

Os diâmetros utilizados incluem 60 mm, 72 mm, 132 mm, 180 mm e 204 mm, representando simultaneamente troncos principais e ramais de distribuição. Toda a rede utiliza coeficiente de rugosidade Hazen–Williams igual a 100.

Todas as tubulações encontram-se com status “Aberto”, ou seja, sem registros de fechamento ou válvulas associadas, permitindo a circulação plena da vazão ao longo de toda a malha hidráulica. Conforme mostrado pela tabela 5.1.2.1.:

Tabela 5.1.2.1. - Tubulações da Rede Simulada

Id	Nó 1	Nó 2	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Rugosidade	Status
1	1	2	11600	180	100	Aberto
2	2	3	19800	180	100	Aberto
3	3	4	7300	180	100	Aberto
4	4	5	8300	180	100	Aberto
5	5	6	8600	180	100	Aberto
6	6	7	19100	180	100	Aberto
7	7	8	9600	132	100	Aberto
8	8	9	12500	132	100	Aberto
9	9	10	9600	180	100	Aberto
10	11	9	11200	204	100	Aberto
11	12	11	14500	204	100	Aberto
12	13	12	12200	204	100	Aberto
13	14	13	24100	204	100	Aberto
14	15	14	21100	204	100	Aberto
15	1	15	15500	204	100	Aberto
16	10	17	26400	72	100	Aberto
17	12	18	31200	72	100	Aberto
18	18	19	24000	60	100	Aberto
19	11	20	14400	60	100	Aberto
20	20	16	38400	60	100	Aberto
21	9	16	26400	72	100	Aberto

Fonte: O autor (2025)

5.1.2. Geometria da Rede

A geometria do sistema é definida por um conjunto de coordenadas X e Y para todos os nós, possibilitando a reconstrução espacial da rede. A estrutura apresenta um arranjo ramificado.

O reservatório (ID 1) está localizado na extremidade superior da rede, atuando como fonte primária de carga hidráulica. As principais ramificações ocorrem a partir dos nós 9, 11 e 12, pontos que distribuem vazões para regiões com maior densidade de nós consumidores. Conforme pode ser visto na Figura 5.1.1.

Vale ressaltar que na preparação dos dados, o reservatório e os elementos diretamente conectados a ele foram excluídos das análises, pois, embora atue como nó fornecedor de vazão na simulação, ele é tratado como um elemento distinto no arquivo INP, o que gerou inconsistências e erros nos códigos de sensibilidade e elasticidade. Para evitar interpretações incorretas, optou-se por retirá-los das análises quantitativas, ainda que tenham sido considerados na simulação para obtenção das vazões e pressões. Além disso, o nó 20 também foi excluído da análise de sensibilidade da rugosidade na pressão, devido à incompatibilidade entre o número de valores de rugosidade (19 tubulações) e o número de nós (20), o que poderia gerar erros de código e resultados incorretos.

5.2. Índices Calculados e sua interpretação

A análise dos índices calculados permite compreender, de forma quantitativa, como cada variável ou parâmetro investigada influencia o comportamento hidráulico do sistema frente às perturbações aplicadas, no caso, como as perdas de água e rugosidade influenciam na vazão e na pressão. Nesta seção, são apresentados e interpretados os resultados referentes aos índices de elasticidade, que representam a sensibilidade, obtidos tanto para as tubulações quanto para os nós da rede. Dessa forma, pode-se avaliar o comportamento do sistema e entender suas principais vulnerabilidades e sensibilidades frente às duas variáveis analisadas.

5.2.1. Influência da Rugosidade na Vazão

Os índices de sensibilidade/elasticidade nesta análise podem ser vistos na tabela 5.2.1.1.:

Os resultados obtidos para o índice de sensibilidade e para a elasticidade da vazão em relação à rugosidade indicam que todas as tubulações apresentaram valores iguais a zero. Isso significa que, dentro da variação aplicada ($\Delta V = 10$ no coeficiente de Hazen–Williams), não houve alteração mensurável nas vazões simuladas ao longo da rede.

Quando a rede mantém rugosidades uniformes, a variação aplicada atua de forma proporcional em todos os trechos, preservando o equilíbrio relativo entre as resistências hidráulicas. Assim, mesmo que cada tubulação sofra uma leve alteração de perda de carga, nenhuma delas se torna significativamente mais restritiva ou mais favorável ao escoamento do que as demais. Em consequência, a distribuição das vazões permanece praticamente inalterada. O mesmo ocorre quando se aumenta o ΔV para valores como 20 e 30 no

coeficiente de Hazen–Williams, como também foi simulado nesta análise para entender se o comportamento utilizando $\Delta V = 10$ se repete com variações maiores.

Tabela 5.2.1.1. - Análise de Sensibilidade da Rugosidade aplicada à Vazão das Tubulações do Sistema

Tubulação	Índice de Elasticidade
2	0
12	0
20	0
19	0
18	0
17	0
16	0
14	0
13	0
11	0
3	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
21	0

Fonte: O autor (2025)

Conforme estabelecem leis de escoamento como as de Darcy–Weisbach e Colebrook–White, esse resultado está alinhado ao fundamento de que manter rugosidades uniformes em uma rede de tubulações geralmente resulta em variações de condições operacionais mais previsíveis e menos bruscas, uma vez que a rugosidade é um parâmetro central na determinação do coeficiente de atrito,. Tais formulações relacionam rugosidade, diâmetro e propriedades do fluido às perdas de carga hidráulicas; portanto, reduzir a variabilidade da rugosidade significa minimizar diferenças nos coeficientes de atrito entre os trechos.

No caso analisado, como todas as tubulações partem de um mesmo valor de rugosidade e recebem a mesma perturbação, a rede mantém um comportamento hidráulico homogêneo, sem redistribuições internas de vazão. Por isso, as vazões simuladas permanecem constantes, resultando nos índices nulos de sensibilidade e elasticidade.

5.2.2. *Influência da Rugosidade na Pressão*

Os resultados mostram que a rugosidade, embora não tenha alterado as vazões, gerou variações perceptíveis nas pressões, especialmente nos nós mais distantes do reservatório e localizados ao final da rede (como 18, 19 e 16). Esses nós apresentam os maiores valores de sensibilidade e elasticidade, indicando que a pressão nesses pontos é mais dependente das perdas de carga acumuladas ao longo do percurso. Como pode ser visto na tabela 5.2.2.1.:

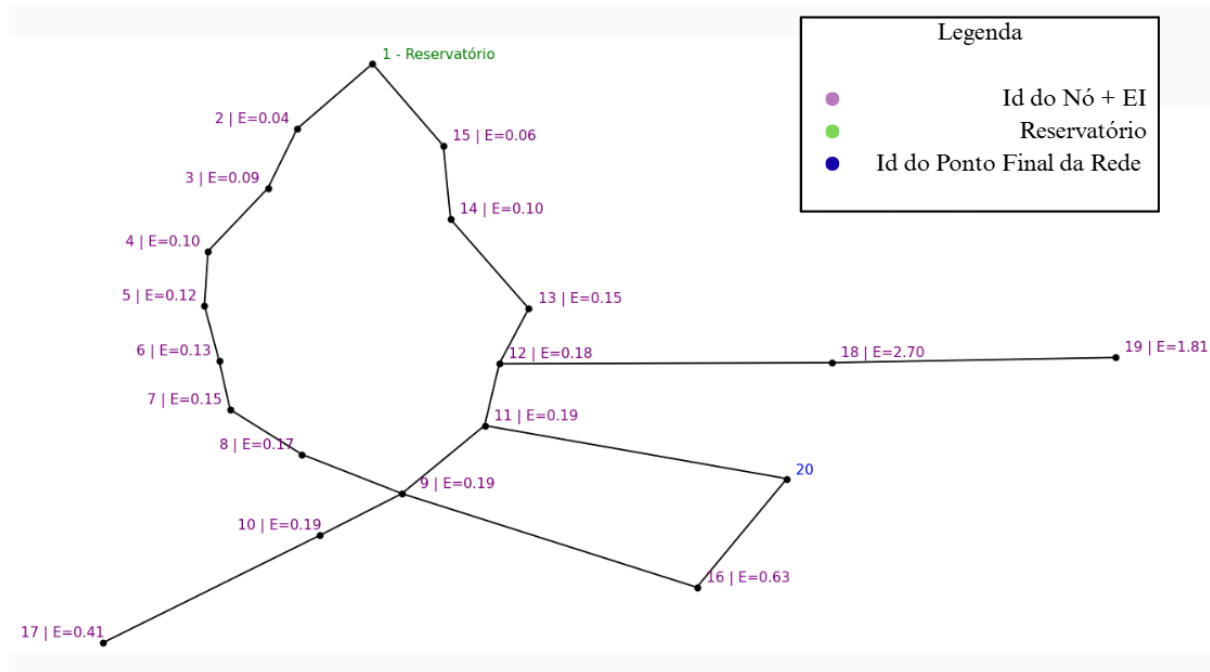
Tabela 5.2.2.1. - Análise de Sensibilidade da Rugosidade aplicada à Pressão nos Nós do Sistema

Nó	Índice de Elasticidade
18	2,7
19	1,81
16	0,63
17	0,41
10	0,19
9	0,19
11	0,19
12	0,18
8	0,17
13	0,15
7	0,15
6	0,13
5	0,12
4	0,1
14	0,1
3	0,09
15	0,06
2	0,04

Fonte: O autor (2025)

Foi também desenvolvido o mapa da rede com estes índices e Ids, segundo a figura 5.2.2.1.:

Figura 5.2.2.1. - Rede de Abastecimento Simulada com Vista Superior com Índices de Elasticidade da Análise Rugosidade - Pressão.



Fonte: O autor (2025)

Esse comportamento é compatível com o fato de que todas as tubulações possuem a mesma rugosidade inicial (100). Como a rede é uniforme nesse aspecto, a aplicação de ΔV modifica de maneira proporcional a resistência ao escoamento em todos os trechos, sem alterar o balanço das vazões, mas alterando o valor absoluto das perdas de carga totais, que se acumulam ao longo do caminho até cada nó.

Nesse contexto, também segundo as leis de escoamento de Darcy–Weisbach e Colebrook–White, é comprovado que manter rugosidades uniformes em uma rede de tubulações resulta em variações de condições operacionais mais previsíveis e menos bruscas, pois a rugosidade controla diretamente o coeficiente de atrito associado às perdas de carga. Como toda a rede sofre a mesma alteração, os coeficientes de atrito mudam de forma homogênea e não criam contrastes hidráulicos entre os trechos, mas apenas aumentam ou reduzem, de maneira conjunta, as perdas ao longo das linhas.

Assim, embora a distribuição das vazões permaneça idêntica, a pressão é mais sensível conforme a distância dos nós da fonte de abastecimento aumenta, como exemplo, tem-se os nós 18, 19 e 16, que apresentam uma maior sensibilidade e possuem uma maior distância do reservatório, além do caso dos nós 2, 15 e 3, que apresentam uma menor sensibilidade e possuem as menores distâncias do reservatório. Dessa forma, os índices obtidos mostram que a pressão, diferentemente da vazão, é mais responsiva às variações na rugosidade, principalmente em regiões onde as perdas acumuladas são mais expressivas.

Além disso, vale ressaltar que todos os índices de elasticidade encontrados são positivos, o que indica que a cada variação positiva da rugosidade, maior é a pressão em cada um dos nós do sistema, o mesmo ocorre para variações negativas, demonstrando que a relação de proporcionalidade entre este parâmetro e esta variável é diretamente proporcional.

5.2.3. Influência da Perda de Água na Vazão

Diferentemente do que ocorreu com a rugosidade, a análise de sensibilidade aplicada à perda de água não é uniforme ao longo da rede. Como pode ser visto na tabela 5.2.3.1.:

Tabela 5.2.3.1. - Análise de Sensibilidade da Perda de Água aplicada à Vazão nas Tubulações do Sistema

(Continua)

Tubulação	Índice de Elasticidade
16	540,28
17	269,68
9	151,84
19	52,28
3	35,92
2	35,84
4	34,13
5	33,92
6	33,63
7	33,17

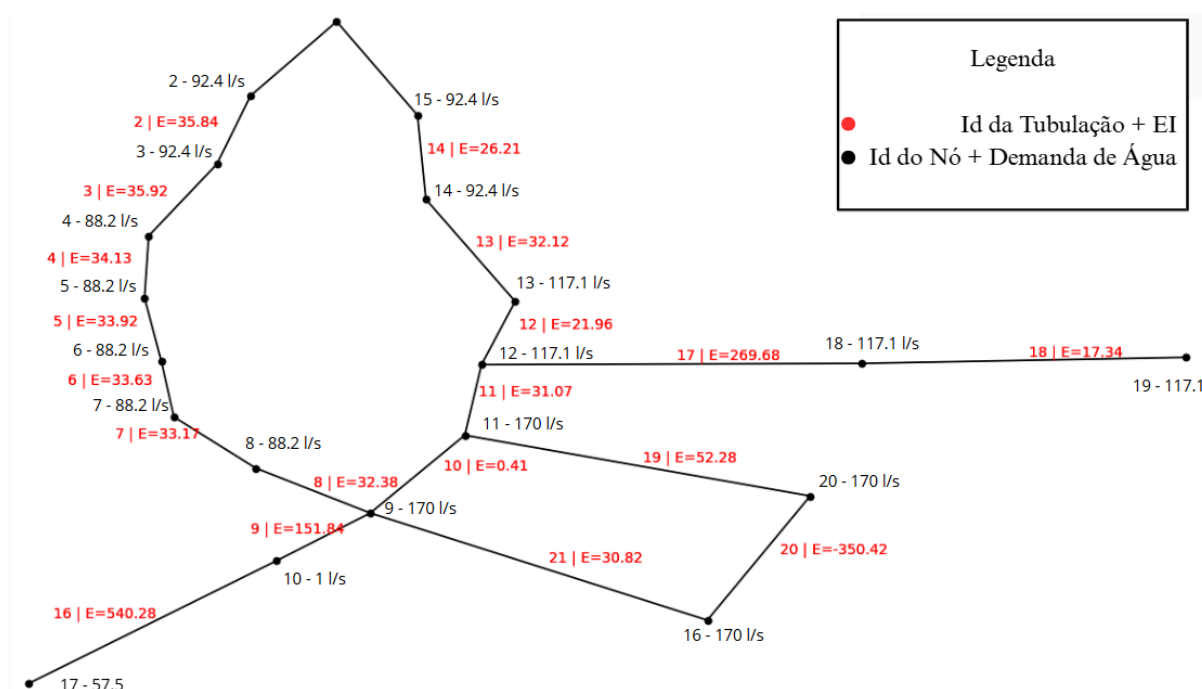
(Conclusão)

Tubulação	Índice de Elasticidade
8	32,38
13	32,12
11	31,07
21	30,82
14	26,21
12	21,96
18	17,34
10	0,41
20	-350,42

Fonte: O autor (2025)

Além disso, foi desenvolvido o mapa da rede com estes índices juntamente com seus Ids e a demanda de cada nó, segundo a figura 5.2.3.1.:

Figura 5.2.3.1. - Rede de Abastecimento Simulada com Vista Superior com Índices de Elasticidade da Análise Perda de Água - Vazão.



Fonte: O autor (2025)

Os resultados indicam que algumas tubulações apresentam elasticidade muito alta, como é o caso das tubulações 16, 20, 17 e 9 e outras com elasticidades menores como 10, 18, 12 e 14.

De forma geral, pode-se notar que a elasticidade tende a aumentar conforme a tubulação está mais distante da fonte de abastecimento. Já tubulações próximas ao ponto de fornecimento apresentam elasticidade menor porque atendem poucos nós ou demandas ainda pequenas. Em síntese:

- Próximas do reservatório → baixa sensibilidade: menos influência da Perda de Água na Vazão.
- Distantes do reservatório → alta sensibilidade: maior influência da Perda de Água na Vazão.

Além disso, vale ressaltar que a maioria dos índices de elasticidade encontrados possuem valor positivo, o que indica que a cada variação positiva no valor da perda de água, maior é a vazão em cada uma das tubulações do sistema, o mesmo ocorre para variações negativas, demonstrando que a relação de proporcionalidade entre este parâmetro e esta variável é diretamente proporcional, com exceção da tubulação número 20, que possui uma relação inversa de proporcionalidade, este comportamento pode ocorrer devido a uma inversão de sentido na vazão, que pode ocorrer em parcelas do sistema em malha.

5.2.4. Influência da Perda de Água na Pressão

Esta análise resultou na tabela 5.2.4.1.:

Tabela 5.2.4.1. - Análise de Sensibilidade da Perda de Água aplicada à Pressão nos Nós do Sistema

(Continua)

Nó	Índice de Elasticidade
10	-0.29
2	-6,03
15	-8,85
14	-13,62
3	-14,3

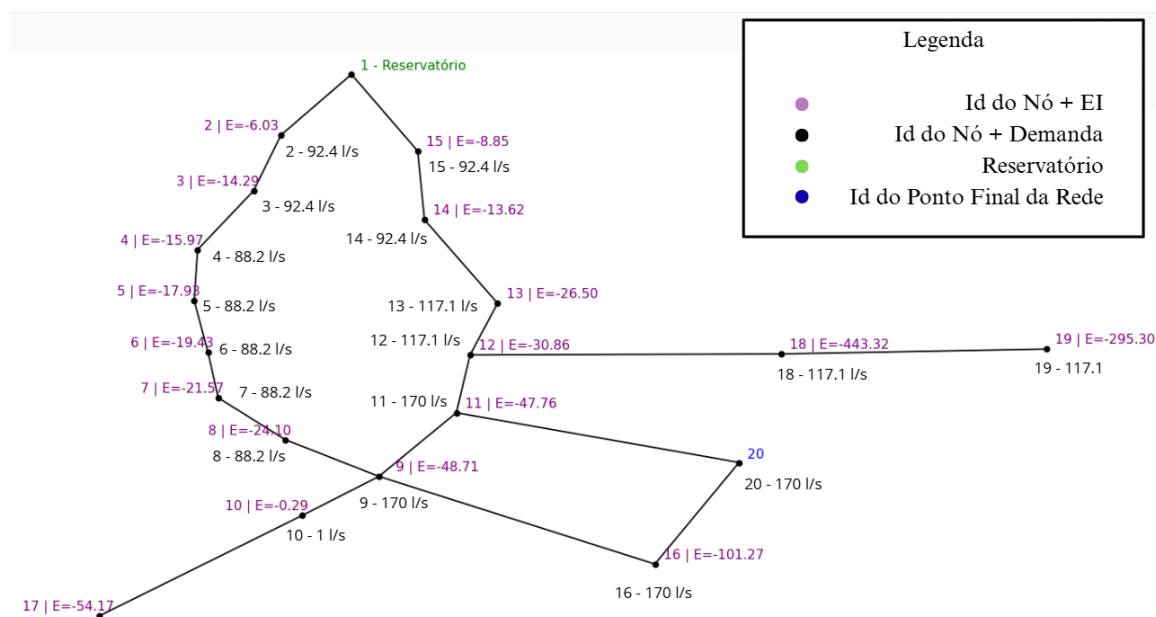
(Conclusão)

Nó	Índice de Elasticidade
4	-15,97
5	-17,93
6	-19,43
7	-21,57
8	-24,1
13	-26,5
12	-30,86
11	-47,76
9	-48,71
17	-54,17
16	-101,27
19	-295,3
18	-443,32

Fonte: O autor (2025)

Além disso, foi desenvolvido o mapa da rede com estes índices juntamente com seus Ids e suas demandas, segundo a figura 5.2.4.1.:

Figura 5.2.4.1. - Rede de Abastecimento Simulada com Vista Superior com Índices de Elasticidade da Análise Perda de Água - Pressão.



Fonte: O autor (2025)

Os resultados de elasticidade mostram que o impacto da perda de água sobre a pressão é mais intenso nos nós mais distantes da fonte ou localizados em ramais terminais, como os nós 18 e 19. Esses pontos apresentam as maiores elasticidades (443,3 e 295,3), indicando que uma mesma variação na demanda resulta em uma queda proporcional muito maior na pressão. Estes nós, juntamente com outros como o 16 e 17, que possuem índices de elasticidade elevados são também os nós mais distantes do reservatório..

Nos nós intermediários, como 9, 11 e 12, as elasticidades são moderadas. Isso significa que, embora ainda sofram reduções relevantes de pressão quando a demanda aumenta, a resposta não é tão intensa quanto nos pontos mais remotos. Esses nós geralmente estão em rotas que ainda acumulam perda de carga significativa, porém com caminhos hidráulicos mais robustos ou curtos o suficiente para amortecer parte do efeito.

Já os nós mais próximos da fonte, como os nós 2, 15, 14 e 3 apresentam elasticidades muito baixas. Isso pode acontecer porque a pressão de base nesses pontos costuma ser maior, e uma mesma variação de demanda resulta em alterações pequenas na pressão. Assim, a elasticidade evidencia de forma clara que a influência da perda de água na pressão cresce com a distância hidráulica e diminui conforme o nó se aproxima das condições de fornecimento mais estáveis.

Além disso, vale ressaltar que todos os índices de elasticidade encontrados possuem valor negativo, o que indica que a cada variação positiva no valor da perda de água, menor é a pressão em cada um dos nós do sistema, o mesmo ocorre para variações negativas, demonstrando que a relação de proporcionalidade entre este parâmetro e esta variável é inversamente proporcional.

5.2.5. Análise Geral dos Índices Encontrados

A partir dos índices de sensibilidade e elasticidade calculados para as variáveis avaliadas, rugosidade das tubulações e perdas de água representadas pelo ajuste das demandas, é possível realizar uma análise geral sobre como o sistema pode responder às perturbações impostas.

5.2.5.1. Comparação dos EI nas tubulações: rugosidade \times perda de água

Considerando os valores de EI obtidos para as tubulações, observa-se que:

- A rugosidade apresentou EI nulos ou próximos de zero nas análises de vazão, o que pode sugerir que, para este modelo específico, pequenas variações nesse parâmetro talvez não gerem alterações perceptíveis nos fluxos internos.
- Já as perdas de água (via aumento da demanda) resultaram em valores não nulos de EI, indicando que essa variável exerce maior influência sobre a redistribuição das vazões quando comparada à rugosidade, além disso, as tubulações que mais são sensíveis à perda de água são 16, 20 e 17.

Diante disso, uma comparação direta da ordem de sensibilidade das tubulações entre rugosidade e perda de água talvez não seja significativa, uma vez que uma das análises produziu EI nulo. Assim, diferenças de comportamento entre as duas variáveis podem ser interpretadas apenas como efeitos distintos de perturbações também distintas, e não como uma hierarquia comparativa.

5.2.5.2. Comparação dos EI nos nós: rugosidade \times perda de água

No caso dos nós, tanto na análise de pressão frente à rugosidade quanto na análise de pressão frente à perda de água foram obtidos valores de EI diferentes de zero. Isso permite uma comparação mais consistente entre as ordens de sensibilidade nodal.

Dessa forma, pode-se notar:

- Os nós mais sensíveis à rugosidade são também os nós mais sensíveis às perdas, e também dizem respeito a nós mais distantes do reservatório: 18, 19 e 16;
- A pressão é mais sensível a perda de água que em relação à rugosidade, visto que a ordem de grandeza é consideravelmente maior;

5.2.5.3. Considerações gerais

Com base nos resultados obtidos, pode-se supor que a rede possivelmente responde de forma mais sensível às alterações nas demandas (representando perdas), enquanto mudanças de rugosidade talvez produzam efeitos menos intensos nas grandezas analisadas. Além disso, a

distribuição espacial nos nós pode indicar zonas potencialmente mais sensíveis no sistema, o que também ocorre nas tubulações.

Por fim, pode-se notar também a questão da magnitude dos índices encontrados, visto que para a sensibilidade da rugosidade, obteve-se valores relativamente menores na casa das unidades. Enquanto os valores encontrados para as perdas de água são valores que abrangem, tanto as unidades, quanto às dezenas e até às centenas, evidenciando o quanto este valor é consideravelmente mais sensível a variações se comparado à rugosidade.

6. CONCLUSÕES

A análise realizada demonstrou que a rede simulada apresenta comportamento hidráulico coerente com sua estrutura ramificada com parcelas em malha, suas características geométricas e a uniformidade dos parâmetros adotados, esta coerência ocorre na medida que os índices de elasticidade na análise perda de água - vazão foram todos diretamente proporcionais, com exceção da parcela em malha. A avaliação da influência da rugosidade evidenciou que, devido à homogeneidade do coeficiente de Hazen-Williams em todas as tubulações, a variação aplicada não produziu redistribuições internas de vazão, resultando em sensibilidade nula. Ainda assim, a pressão mostrou-se responsiva às alterações globais da rugosidade, especialmente em nós mais distantes do reservatório, onde o acúmulo de perdas de carga ao longo do caminho é mais significativo.

A análise da perda de água, representada pela variação das demandas nodais, indicou diferenças marcantes entre os elementos da rede. Tanto para vazão quanto para pressão, verificou-se que a sensibilidade aumenta de forma consistente com a distância hidráulica em relação ao ponto de abastecimento, assim como no caso dos nós. Tubulações e nós situados nas regiões terminais apresentaram maior sensibilidade às perturbações, evidenciando que pequenas variações de demanda tendem a produzir efeitos mais amplificados em trechos longos ou distantes do reservatório. Por outro lado, elementos próximos ao reservatório mantiveram sensibilidades baixas, demonstrando comportamento mais estável diante das mesmas perturbações. Além disso, pode-se notar que a variável que mais influencia em condições operacionais foi a perda de água, mais especificamente, a perda de água é aquela que mais possui influência na pressão do sistema simulado.

De forma geral, os resultados confirmam que a topologia da rede e a distribuição espacial das demandas exercem papel determinante na forma como as variáveis hidráulicas respondem às alterações simuladas. A combinação entre estrutura ramificada com malha, uniformidade das tubulações e distanciamento em relação à fonte explica a diferença de sensibilidade entre os nós e trechos. Assim, os índices calculados mostraram-se adequados para identificar regiões críticas, compreender o comportamento hidráulico global e fornecer subsídios para análises futuras voltadas à gestão, operação e melhoria de sistemas de abastecimento semelhantes.

Considerando os objetivos estabelecidos, é possível observar que o estudo atendeu ao proposto em seu conjunto, ainda que algumas interpretações derivam de comportamentos

específicos do modelo adotado. O objetivo geral, que consistia em investigar a influência dos elementos de um sistema de abastecimento de água na sua operação por meio de análise de sensibilidade, foi contemplado ao se explorar como rugosidade e perdas de água afetam pressões e vazões. Os objetivos específicos foram alcançados, na medida em que os principais componentes do sistema foram identificados e caracterizados, e as variáveis e parâmetros influentes foram mapeados ao longo do desenvolvimento do trabalho, além disso, estas variáveis e parâmetros foram adequados ao sistema de análise de sensibilidade escolhido, análise esta que resultou na quantificação do que pode influenciar o sistema. A metodologia adotada para análise de sensibilidade mostrou-se compatível com o modelo estudado, permitindo avaliar impactos e possíveis vulnerabilidades/sensibilidades associadas às variações simuladas.

Por fim, ao analisar a sensibilidade das variáveis hidráulicas em diferentes condições, o estudo cumpriu o propósito de compreender como o sistema reage a perturbações, oferecendo bases que podem contribuir para aprimoramentos em sistemas de abastecimento de água com características semelhantes.

7. RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos e nas particularidades observadas ao longo da análise de sensibilidade, algumas recomendações podem ser consideradas para estudos futuros, especialmente no sentido de ampliar a robustez das interpretações e aproximar as simulações de cenários mais realistas. Uma delas seria a realização de análises em uma rede real, permitindo avaliar o comportamento hidráulico diante de condições operacionais mais representativas. Em um sistema real, as tubulações apresentam diferentes estados de conservação, materiais e idades, o que resulta em rugosidades variadas ao longo da rede. Assim, recomenda-se que estudos posteriores considerem a alteração da rugosidade de apenas uma tubulação por vez, de modo a identificar qual trecho seria potencialmente mais sensível a variações nesse parâmetro. Tal abordagem permitiria analisar a influência local de cada tubulação de forma isolada, algo que, no presente estudo, não seria adequado, pois a variação considerada foi global e aplicada uniformemente, não refletindo o comportamento de uma rede real.

Outra recomendação importante diz respeito à inclusão, nas etapas futuras, do nó do reservatório e das tubulações diretamente conectadas a ele. Na análise realizada, esses elementos foram excluídos para evitar interpretações errôneas, problemas de código ou resultados inconsistentes. Entretanto, ao serem considerados em análises posteriores, seria possível compreender como pequenas perturbações no entorno do reservatório podem repercutir no restante da rede, ampliando a visão sistêmica e oferecendo resultados mais completos. Incluir essas conexões pode contribuir para investigar zonas críticas próximas à captação.

Além disso, sugere-se a investigação de outros fatores, como a elevação, o nível do reservatório, a capacidade de armazenamento e as condições e diretrizes operacionais. Tais aspectos não foram considerados neste trabalho devido ao fato de o modelo utilizado tratar-se de um benchmark, o qual não fornece detalhes sobre esses parâmetros, impossibilitando uma análise adequada sem introduzir suposições que comprometem a coerência do estudo.

Recomenda-se também a realização de análises envolvendo redes que possuam sistemas de bombeamento e válvulas, de modo a avaliar a sensibilidade de parâmetros associados a esses elementos, uma vez que sua operação influencia significativamente o comportamento hidráulico em sistemas reais.

Por fim, sugere-se a consideração de aspectos relacionados à qualidade da água, como a variação da concentração de desinfetante ao longo da rede, permitindo estender a análise de sensibilidade para além do domínio hidráulico e incorporando dimensões adicionais relevantes para a gestão e operação de sistemas de abastecimento.

Essas recomendações, portanto, podem servir como caminhos para a continuidade do trabalho, permitindo que estudos futuros aprofundem a avaliação de sensibilidade, incorporem cenários mais complexos e reduzam limitações inerentes ao modelo adotado nesta etapa inicial da pesquisa.

8. REFERÊNCIAS

- AL-QAISI, A. Z.; OGLA, R. A.; ALI, Z. H. **Smart Water Systems: The Role of Technology and Engineering in Optimizing Urban Water Resources**. Journal of Information Systems Engineering and Management, v. 10, n. 21 supl., p. ?-?, mar. 2025. DOI: 10.52783/jisem.v10i21s.3445. Disponível em: <https://jisem-journal.com/index.php/journal/article/view/3445>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- ALLEN, D.; FISCHER, D.; CHEN, A. **Control and mitigation of drinking-water losses in distribution systems**. Washington. EPA, 2012. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-05/documents/epa816r10019.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- ARNAUD, N.; POCH, M.; SCHEIDEGGER, A.; PFLIEGER, M. **How scale influences the resilience of urban water systems**. Water (Switzerland), v. 16, n. 11, p. 1571, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/11/1571>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- ASCENÇÃO, Érico Soares; MELO MARINANGELO, Fernando; MESCHINI ALMEIDA, Carlos Frederico; KAGAN, Nelson; DIAS, Eduardo Mário. **Applications of Smart Water Management Systems: A Literature Review**. Water, Basel, v. 15, n. 19, art. 3492, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/19/3492>. Acesso em: 4 jan. 2026.
- BABUNSKI, D.; STANKOV, M.; TRAJKOVSKI, I.; MLADENOVSKI, D. **Optimization methods for water-supply SCADA systems**. [S.l.], 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/326280939_Optimization_methods_for_water_supply_SCADA_system. Acesso em: 7 jul. 2025.
- BANDURIN, A.; KULESHOVA, I.; KULESHOV, V. **Evaluating pipeline-inspection technologies for enhanced integrity**. Applied Sciences, v. 15, n. 3, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/3/1316>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- BORSUK, M. E.; STOW, C. A.; RECKHOW, K. H. **A Bayesian network approach to the assessment of water quality**. Environmental Modelling & Software, v. 17, n. 4, p. 251–259, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304380003003958>. Acesso em: 7 jul. 2025.

CARDOSO-GONÇALVES, M.; TENTÚGAL-VALENTE, L. **Analysis of selected reliability indicators of water-supply network**. Journal of KONBiN, v. 50, p. 53–64, 2023. Disponível em: <https://journalofkonbin.com/api/files/view/2109642.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2025.

CHUNG, G.; CHOI, S.-J.; LEE, S. H. **Water conservation and waste-water treatment options in the Geum River Basin**. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 13, n. 5, 2009. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-009-0471-3>. Acesso em: 7 jul. 2025.

COSTA, A. P.; SANTOS, F. R. **Integração do EPANET com linguagens de programação**. [S.l.]: UNEB, 2022. Disponível em: <https://ppgmsb.uneb.br/publicacoes/dissertacoes/dissertacaoNarielydeJesusSantos-pt.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2025.

EPA – Environmental Protection Agency. **Manual do EPANET – Brasil**. [S.l.]: Universidade Federal da Paraíba, [s.d.]. Disponível em: https://ct.ufpb.br/lenhs/contents/documentos/programa-epanet/manual_do_epanet_brasil.pdf. Acesso em: 8 jun. 2025.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). **EPANET: Water Distribution System Modeling Software**. Washington, DC: EPA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/epanet>. Acesso em: 07 dez. 2025.

EKER, I.; KARA, T. **Operation and control of a water-supply system**. ISA Transactions, v. 42, n. 3, p. 383–395, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057807601475>. Acesso em: 7 jul. 2025.

FELGUEIRAS, C. A. **MODELAGEM AMBIENTAL COM TRATAMENTO DE INCERTEZAS EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA: O PARADIGMA GEOESTATÍSTICO POR INDICAÇÃO**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Modelagem de Sistemas Ambientais.: INPE, 2001. Disponível em: <http://marte3.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/2001/08.03.12.35/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2025.

FERREIRA, L. M.; SILVA, P. Q.; ALMEIDA, J. C. **Sustentabilidade na gestão de recursos hídricos: o papel da análise de sensibilidade**. [S.l.], 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/377177016_Indicadores_de_sustentabilidade_aplicados_a_gestao_de_recursos_hidricos_uma_revisao_sistematica. Acesso em: 7 jul. 2025.

FRANK, P. M. *Introduction to system sensitivity theory*. New York: Academic Press, 1978. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1976393>. Acesso em: 7 jul. 2025.

GENJEBO, Mamushet Gebrewold; KEMAL, Abdella; NANNAWO, Abera Shigute. **Assessment of surface water resource and allocation optimization for diverse demands in Ethiopia's upper Bilate Watershed**. Heliyon, v. 9, n. 10, e20298, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20298. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174523013982?via%3Dihub>. Acesso em: 6 jan. 2026.

GUEDES, H. A. S.. **Introdução e concepção de sistemas de abastecimento de água**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS - UFPEL, 2018. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/hugoguedes/files/2018/11/Aula-8-Distribuição-Parte1.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2025.

GOPINATH, K.; THOMAS, M.; NITHISH, A. **Smart water supply and management system**. International Journal of Recent Technology and Engineering, v. 11, n. 3, 2022. Disponível em: <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v11i3/C72700911322.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2025.

HUANG, J.; ZHANG, Y.; LI, Y. **Drinking-water emergency planning and response**. Journal - American Water Works Association, v. 115, n. 4, 2023. Disponível em: <https://awwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/awwa.2037>. Acesso em: 7 jul. 2025.

KANAKOUDIS, Vasilis; TSITSIFLI, Stavroula. **Results of an urban water distribution network performance evaluation attempt in Greece**. Urban Water Journal, Abingdon: Taylor & Francis, **v. 7, n. 5, p. 267-285, out. 2010. DOI: 10.1080/1573062X.2010.509436. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2010.509436>. Acesso em: 4 jan. 2026.

KAUFFMAN, Stuart; KOPPL, Roger; CAZZOLLA GATTI, Roberto; DEVEREAUX, Abigail; FATH, Brian D.; HERRIOTT, James; HORDIJK, Wim; ULANOWICZ, Robert E.; VALVERDE, Sergi. **Explaining Technology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2023. Elements in Evolutionary Economics. DOI: 10.1017/9781009386289. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/elements/explaining-technology/35B60E962727A42ABAB78D33CDE76B7C>. Acesso em: 4 jan. 2026.

KE, Yanchu; SUN, Wenjun; CHEN, Zhongyun; ZHU, Ying; CHEN, Xiuli; YAN, Shuang; LI, Yangyang; XIE, Shuguang. **Effects of disinfectant type and dosage on biofilm's activity, viability, microbiome and antibiotic resistome in bench-scale drinking water distribution systems**. Water Research, Oxford: Elsevier, v. 249, art. 120958, 2024. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120958. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135423013982>. Acesso em: 4 jan. 2026.

KIVIT, C.F.T.; et al. **Origin and behavior of particles in drinking water networks**. Journal of Water Supply: Research and Technology — AQUA, v. 53, n. 8, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965997808001841>. Acesso em: 07 dez. 2025.

KOO, Hyeongmo; IWANAGA, Takuya; CROKE, Barry F. W.; JAKEMAN, Anthony J.; YANG, Jing; WANG, Hsiao-Hsuan; SUN, Xifu; LÜ, Guonian; LI, Xin; YUE, Tianxiang; YUAN, Wenping; LIU, Xintao; CHEN, Min. **Position paper: Sensitivity analysis of spatially distributed environmental models — a pragmatic framework for the exploration of uncertainty sources**. Environmental Modelling & Software, Oxford: Elsevier, v. 135, art. 104912, 2021. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104912. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815220309142>. Acesso em: 5 jan. 2026.

KONG, X.; WANG, Y.; CHEN, Y. **Energy saving in pumping stations via multi-objective optimisation**. Journal of Cleaner Production, v. 422, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623026719>. Acesso em: 7 jul. 2025.

KUMAR, N.; POONIA, V.; GUPTA, B. B.; GOYAL, M. K. **A novel framework for risk assessment and resilience of critical infrastructure towards climate change**.

Technological Forecasting and Social Change, v. 165, p. 120532, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162520313585?via%3Dihub>.

Acesso em: 7 jul. 2025.

KUMPEL, E.; DELAIRE, C.; PELETZ, R. **Measuring the impacts of water-safety plans in the Asia-Pacific region**. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 15, n. 6, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29890783/>. Acesso em: 7 jul. 2025.

LAPOINTE, M.; BARBEAU, B. **Characterization of ballasted flocs in water treatment**. Water Research, v. 96, p. 245–254, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135415304152>. Acesso em: 7 jul. 2025.

LEONE, Mattia Federico; NOCERINO, Giovanni. **Advanced modelling and digital manufacturing: Parametric design tools for the optimization of UHPFRC (ultra high-performance Fiber reinforced concrete) shading panels**. Automation in Construction, Oxford: Elsevier, v. 126, art. 103650, jun. 2021. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103650. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580521001011>. Acesso em: 6 jan. 2026.

LEVIN, S. A.; BARRETT, S.; BOCKSTAEL, N. **Ecosystem services: a primer**. Ecosystem Services, v. 5, p. 1–3, 2013. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2941726>. Acesso em: 7 jul. 2025.

LI-HUI, M.; SUI-QING, L.; WEN, Q. **Vulnerability assessment of water-supply systems**. Water & Wastewater Engineering, 2006. Disponível em: <https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/ETD-TAMU-1084/KANTA-THESIS.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2025.

LOPES, F. C. A. **Análise de sensibilidade de variáveis e parâmetros de equações de fator de segurança**. 2017. UNICAMP. Disponível em: <https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/2559>. Acesso em: 07 dez. 2025.

LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. *Water-resource systems planning and management*. Paris: UNESCO, 2017. Disponível em: https://www.jlakes.org/uploadfile/news_images/hpkx/2018-04-24/waterresources2017_book.pdf. Acesso em: 7 jul. 2025.

MACHADO, Anna Virginia Muniz; OLIVEIRA, Pedro A. D.; MATOS, Patrick G.; SANTOS, Ana Silvia Pereira. **Strategies for Achieving Sustainability of Water Supply Systems in Rural Environments with Community Management in Brazil**. Water, Basel, v. 15, n. 12, art. 2232, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/12/2232>. Acesso em: 4 jan. 2026.

MANZANO, Pablo; BURGAS, Daniel; CADAHÍA, Luis; ERONEN, Jussi T.; FERNÁNDEZ-LLAMAZARES, Álvaro; BENCHERIF, Slimane; HOLAND, Øystein; SEITSONEN, Oula; BYAMBAA, Bayarmaa; FORTELIUS, Mikael; FERNÁNDEZ-GIMÉNEZ, María E.; GALVIN, Kathleen A.; CABEZA, Mar; STENSETH, Nils Chr. **Toward a holistic understanding of pastoralism**. One Earth, Amsterdam: Elsevier, **v. 4, n. 5, p. 651-665, 21 maio 2021. DOI: 10.1016/j.oneear.2021.04.012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332221002311>. Acesso em: 6 jan. 2026.

MARCONDES, R. A. C. **Estudo do Uso das Tubulações de PEAD em Sistemas de Distribuição de Água no Brasil**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-06102016-092317/publico/RicardoAugustodeCastroMarcondesCorr16.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2025.

MIJIC, A.; GAGO, E. J.; ALDAS, J. S. **Towards adaptive resilience for the future of integrated water-systems planning**. [S.l.], 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/385849869_Towards_adaptive_resilience_for_the_future_of_integrated_water_systems_planning. Acesso em: 7 jul. 2025.

MORANI, A.; HERNÁNDEZ, S.; CASTELLANI, M. **Energy recovery by PATs vs. variable-speed pumping**. Fluids, v. 3, n. 2, p. 41, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-5521/3/2/41>. Acesso em: 7 jul. 2025.

MENEZES, N. N. C. **Introdução à Programação com Python**. 2010. Novatec [s.d.]. Disponível em: <https://s3.novatec.com.br/capitulos/capitulo-9788575222508.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2025.

ODAN, F. K. **Modelagem e análise de incertezas e sensibilidades em modelos hidrológicos com estruturas distribuídas**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-03092013-135015/publico/Tese_Odan_F_K_2013.pdf. Acesso em: 8 jun. 2025.

OLSSON, Gustaf. **Urban water supply automation – today and tomorrow**. Urban Water Journal, Abingdon: Taylor & Francis, **v. 18, n. 4, p. 420-437, 2021. DOI: 10.2166/aqua.2020.115. Disponível em: <https://iwaponline.com/aqua/article/70/4/420/78365/Urban-water-supply-automation-today-and-tomorrow>. Acesso em: 4 jan. 2026.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Água potável e saneamento: diretrizes da OMS**. Genebra: OMS, 2019. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/18-6-2019-uma-em-cada-tres-pessoas-no-mundo-nao-tem-a-cesso-agua-potavel-revela-novo>. Acesso em: 7 jul. 2025.

ORESQUES, N. **The role of quantitative models in science**. [S.l.], 2003. Disponível em: https://history.ucsd.edu/_files/faculty/oreskes-naomi/Role%20of%20quantitative%20models.pdf. Acesso em: 7 jul. 2025.

ÖZGER, Mehmet; YILDIRIM, Gürol. **Determining turbulent flow friction coefficient using adaptive neuro-fuzzy computing technique**. Advances in Engineering Software, v. 40, n. 4, p. 281-287, 2009. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2008.04.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997808000860>. Acesso em: 5 jan. 2026.

PEREIRA, C. A.; MORAIS, R. M. **Hydrochemistry of the Guarani aquifer system**. Environmental Advances, v. 2, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581820301877>. Acesso em: 7 jul. 2025.

RAJARETHINAM, V.; PANNEERSELVAM, R.; THANGAVELU, S. **System-dynamic modelling for assessing water-resource vulnerability: a case of Chennai City, Tamil Nadu, India**. [S.l.], 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/354594607_System_dynamic_modelling_for_assessing_the_vulnerability_of_water_resources_a_case_of_Chennai_City_Tamil_Nadu_India. Acesso em: 7 jul. 2025.

SALEEM, S.; MIAN, H. R. **Water distribution system**. Encyclopedia of Water, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340862366_Water_Distribution_System. Acesso em: 7 jul. 2025.

SALTELLI, A. **Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models**. [S.l.]: Wiley, 2004. Disponível em: <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/27934>. Acesso em: 8 jun. 2025.

SILVA, Enrique Douglas Casado da. **Eficientização energética para um sistema de distribuição de água**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/21314>. Acesso em: 4 jan. 2026.

SILVA, R. M.; FERREIRA, J. L.; COSTA, P. D. **Análise da qualidade da água de abastecimento público**. Cadernos de Graduação, v. 8, n. 2, 2021. Disponível em: <https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/download/3912/2949/15039>. Acesso em: 7 jul. 2025.

SOARES, T. D. F. S. **Evaluation of hydraulic parameters in water-distribution networks using EPANET 2.0: case study – Comoro, Zone I, Timor-Leste**. Journal of Environmental Engineering and Waste Management, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/355813755_The_evaluation_of_hydraulic_parameters_in_water_distribution_network_using_Epanet_20_Case_study_Comoro_Zone_I_Timor-Leste. Acesso em: 7 jul. 2025.

SONG, M.; YANG, D.; RAMU, A. G.; CHOI, D. **Overcoming water scarcity: a rainwater harvesting prototype for drinking water with advanced monitoring**. Sustainable Water

Resources Management, v. 11, art. 59, 2025. DOI: 10.1007/s40899-025-01234-3. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-025-01234-3>. Acesso em: 7 jul. 2025.

TAFESSE, N.; PORCELLI, M.; SEBOKA, M. **Trihalomethanes and physico-chemical quality of drinking water in Addis Ababa**. Heliyon, v. 9, n. 10, 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37809755/>. Acesso em: 7 jul. 2025.

TODINI, Ezio. **Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach**. Urban Water, **v. 2, n. 2, p. 115-122, jun. 2000. DOI: 10.1016/S1462-0758(00)00049-2. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1462075800000492>. Acesso em: 4 jan. 2026

UBERT, David; ALCALA, Francisco. **Water filtration plant automation: case study**. Consulting-Specifying Engineer, 5 jul. 2017. Disponível em: <https://www.csemag.com/case-study-water-filtration-plant-automation/>. Acesso em: 4 jan. 2026.

University of Exeter. **Benchmarks for water-distribution systems**. Exeter: Centre for Water Systems, University of Exeter, [s.d.]. Disponível em: <https://www.exeter.ac.uk/research/centres/cws/resources/benchmarks/>. Acesso em: 07 dez. 2025.

VALE, Conceição Christina Rigo; OLIVEIRA, Núbia Karla de. **O uso do valor de E para análise de sensibilidade em estudos epidemiológicos**. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 37, n. 6, e00294720, 2021. Disponível em: <https://cadernos.ensp.fiocruz.br/ojs/index.php/csp/article/view/7679>. Acesso em: 4 jan. 2026.

VARGAS, Sandra Martins Lohn. **Benchmarking: uma ferramenta para a gestão do conhecimento**. Revista Multidisciplinar da Faculdade Municipal de Palhoça , 2009. Disponível em: <https://fmpsc.edu.br/wp-content/uploads/2018/10/REVISTA-2009.pdf#page=19>. Acesso em: 07 dez. 2025.

VIEIRA, R. C.; LEITE, D. F.; COSTA, M. A. **Optimisation of operational planning for water-supply systems**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 137, n. 3,

p. 217–228, 2011. Disponível em:

<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29WR.1943-5452.0000566>. Acesso em: 7 jul. 2025.

WANG, X.; LI, J.; ZHOU, Q. **Minimizing pumping-energy cost in real-time operations of water-distribution systems using EMPC**. [S.l.], 2021. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/344679248_Minimizing_Pumping_Energy_Cost_in_Real-Time_Operations_of_Water_Distribution_Systems_Using_Economic_Model_Predictive_Control. Acesso em: 7 jul. 2025.

XU, Qiang; LIU, Ruiping; CHEN, Qiuwen; LI, Ruonan. **Review on water leakage control in distribution networks and the associated environmental benefits**. Journal of Environmental Sciences, **v. 26, n. 5, p. 955-961, 2014. DOI:

10.1016/S1001-0742(13)60569-0. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001074213605690>. Acesso em: 4 jan. 2026.

YOON, M.-J.; LEE, C.-G. **Development and application of DMA monitoring system to reduce water losses**. Journal of the Korea Academia Industrial Cooperation Society, v. 11, n. 8, p. 2734–2741, 2010. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/290144697_Development_and_application_of_DMA_monitoring_system_to_reduce_water_losses_in_water_supply_network. Acesso em: 7 jul. 2025.

ZEINIJAHROMI, A.; SHAHROKHI, A.; KHALILI, M. **Sensitivity study of low-salinity water injection in Zichebashskoe oilfield**. Journal of Petroleum and Gas Engineering, v. 6, n. 2, p. 12–20, 2015. Disponível em:

https://academicjournals.org/article/article1422539930_Zeinijahromi%20et%20al.pdf.

Acesso em: 7 jul. 2025.

APÊNDICE A - CÓDIGO PYTHON PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

```
from pathlib import Path

import re

import matplotlib.pyplot as plt

import wntr

import wntr.epanet

import pandas as pd


CAMINHO_INP = "dados_genericos.inp"


wn = wntr.network.WaterNetworkModel(CAMINHO_INP)


def ler_inp(nome_arquivo=CAMINHO_INP, encoding="utf-8"):

    # Caminho do arquivo (mesmo diretório do script)

    caminho_arquivo = Path(__file__).parent / nome_arquivo

    secoes = {}

    titulo_atual = None

    # Formato que os dados vão ser apresentados

    TIPO = None

    # Contador de auxilio para saber se é a primeira linha ou não

    Contador = 0
```

```
# Onde serão armazenados os dados
```

```
Dados = {}
```

```
# Verifica se o arquivo existe
```

```
if not caminho_arquivo.exists():
```

```
    print(f'Arquivo '{nome_arquivo}' não encontrado na pasta: {Path(__file__).parent}")
```

```
    return
```

```
print(f'Lendo arquivo: {caminho_arquivo}\n')
```

```
# Lê e processa as linhas
```

```
with open(caminho_arquivo, "r", encoding=encoding, errors="replace") as f:
```

```
    linhas = f.readlines()
```

```
# Remove espaços e linhas vazias
```

```
linhas_limpa = [linha.strip() for linha in linhas if linha.strip()]
```

```
# Exibe o conteúdo
```

```
for i, linha in enumerate(linhas_limpa, start=1):
```

```
    # print(f'{i:03d}: {linha}')
```

```

# if "[" in linha:

#     print(linha)


if linha.startswith("[") and linha.endswith("]"):

    titulo_atual = linha.strip("[").strip()

    secoes[titulo_atual] = []

else:

    # Se ainda não encontrou nenhum título, considera como cabeçalho inicial

    if titulo_atual is None:

        titulo_atual = "__HEADER__"

        secoes[titulo_atual] = []

        secoes[titulo_atual].append(linha)


for titulo, conteudo in secoes.items():

    if titulo.upper() == "TITLE":

        Dados[titulo] = " ".join([c.replace(";", "").strip() for c in conteudo]).strip()

        print(f"\n=== [ {titulo} ] ===")

        print([item for item in conteudo][0])

    # pula o processamento normal dessa seção

```

continue

```
print(f"\n==== [{titulo}] ====")
```

```
Dados[titulo] = {}
```

```
for item in conteudo:
```

```
    Contador += 1
```

```
    # Definindo qual o formato dos dados que vão ser apresentados
```

```
    if ";" in item and Contador == 1:
```

```
        TIPO = "Tabela"
```

```
    elif not ";" in item and Contador == 1:
```

```
        TIPO = "Dicionário"
```

```
    if TIPO == "Tabela":
```

```
        lista = item.split()
```

```
        lista = item.replace(";", "").split()
```

```
        if conteudo[0] == item:
```

```
            Parametros = []
```

```
            for i in range(len(lista)):
```

```
                Parametros.append(lista[i])
```

```
            Dados[titulo][lista[i]] = []
```



```
else:
```

```
    for i in range(len(lista)):
```

```
        Dados[titulo][Parametros[i]].append(lista[i])
```

```
    pass
```

```
elif TIPO == "Dicionário":
```

```
    # remove ';' e espaços iniciais/finais
```

```
    raw = item.replace(";", "").strip()
```

```
    # separa em grupos por 2+ espaços ou por tabs (preserva chaves com espaços)
```

```
    parts = [p.strip() for p in re.split(r'\s{2,}|\t+', raw) if p.strip()]
```

```
    if not parts:
```

```
        continue
```

```
    chave = parts[0]
```

```
    # se não há valores -> None (ex: FILE)
```

```
    if len(parts) == 1:
```

```
        Dados[titulo][chave] = None
```

```
    continue
```

```
# os grupos restantes podem ser vários (ex: DIMENSIONS -> múltiplos grupos)
```

```
# transformamos cada grupo em tokens individuais (ex: "12 am" -> ["12","am"])
```

```
tokens = []
```

```
for grp in parts[1:]:
```

```
    tokens.extend(grp.split())
```

```
# converte tokens pra números quando possível, preserva tempos (':') e strings
```

```
converted = []
```

```
for tok in tokens:
```

```
    if ":" in tok: # horários/ex.: "1:00"
```

```
        converted.append(tok)
```

```
        continue
```

```
    try:
```

```
        if "." in tok:
```

```
            converted.append(float(tok))
```

```
        else:
```

```
            converted.append(int(tok))
```

```
    except ValueError:
```

```
        converted.append(tok)
```

```
# decide como armazenar (único valor -> escalar, vários -> lista)
```

```

    if len(converted) == 1:

        Dados[titulo][chave] = converted[0]

    else:

        Dados[titulo][chave] = converted

    print(item)

    # print(Dados)

    Contador = 0

    TIPO = None

    return Dados

# Como consultar os dados

# print(Dados['NOME DA SEÇÃO']['NOME DO PARAMETRO']['NUMERO DA LINHA
QUE QUER - 1])

# print([i for i in Dados['JUNCTIONS']['Demand']])

def simular_rede(wn_model):

    sim = wntr.sim.EpanetSimulator(wn_model)

    results = sim.run_sim() # roda simulação hidráulica

    return results

def retornar_vazoes(wn_model):

```

```
"""
```

Executa a simulação hidráulica e retorna uma lista com
as vazões (flowrate) de todos os trechos (pipes).

```
"""
```

```
res_base = simular_rede(wn_model)
```

```
flow_all = res_base.link["flowrate"]
```

```
# Converte todos os valores do DataFrame em uma lista (achatada)
```

```
vazoes = flow_all.values.flatten().tolist()
```

```
del vazoes[0]
```

```
del vazoes[13]
```

```
return vazoes
```

```
def retornar_pressoes(wn_model):
```

```
"""
```

Executa a simulação hidráulica e retorna uma lista com
as pressões (pressure) nos nós no último instante da simulação.

```
"""
```

```

res_base = simular_rede(wn_model)

pressoes_df = res_base.node["pressure"]

# Último instante da simulação (uma linha → pressões finais)

pressoes_finais = pressoes_df.iloc[-1].values.tolist()

del pressoes_finais[0]

return pressoes_finais

def simular_com_fator_parametro(wn_model, campo, delta, variavel_saida):

    from copy import deepcopy

    wn_modificado = deepcopy(wn_model)

    campo_lower = campo.lower().strip()

    variavel_saida = variavel_saida.lower().strip()

    if campo_lower in ("roughness", "diameter", "length"):

        for pipe_name in wn_modificado.pipe_name_list:

            pipe = wn_modificado.get_link(pipe_name)

```

```

    valor_atual = float(getattr(pipe, campo_lower))

    setattr(pipe, campo_lower, valor_atual + delta)

elif campo_lower in ("demand", "base_demand"):

    for jn_name in wn_modificado.junction_name_list:

        junction = wn_modificado.get_node(jn_name)

        for demand_ts in junction.demand_timeseries_list:

            demand_ts.base_value = float(demand_ts.base_value) + delta

elif campo_lower in ("elev", "elevation"):

    for jn_name in wn_modificado.junction_name_list:

        junction = wn_modificado.get_node(jn_name)

        valor_atual = float(junction.elevation)

        junction.elevation = valor_atual + delta

else:

    raise ValueError(f'Campo '{campo}' não reconhecido.')

sim = wntr.sim.EpanetSimulator(wn_modificado)

results = sim.run_sim()

if variavel_saida == "vazao":

```

```

vazoes = results.link["flowrate"].values.flatten().tolist()

return vazoes

elif variavel_saida in ("pressao", "pressure"):

    pressoes_df = results.node["pressure"]

    pressoes_finais = pressoes_df.iloc[-1].values.tolist()

    return pressoes_finais

else:

    raise ValueError("Variável de saída deve ser 'vazao' ou 'pressao'.")

def calcular_sensibilidade_elasticidade(delta_v, V0_list, FV_plus_list, FV_minus_list,
FV_list):

    """

    Calcula os índices de sensibilidade (Si) e elasticidade (Ei) para listas de valores.

    Parâmetros:

    - delta_v: valor de  $\Delta V$  (float)

    - V0_list: lista de valores nominais V0

    - FV_plus_list: lista de  $F(V0 + \Delta V)$ 

    - FV_minus_list: lista de  $F(V0 - \Delta V)$ 

    - FV_list: lista de  $F(V0)$ 

```

Retorna:

- Si_list: lista de índices de sensibilidade

- Ei_list: lista de índices de elasticidade

"""

Si_list = []

Ei_list = []

for V0, FV_plus, FV_minus, FV in zip(V0_list, FV_plus_list, FV_minus_list, FV_list):

if FV == 0:

continue

Si = (FV_plus - FV_minus) / (2 * delta_v)

Ei = (V0 / FV) * Si

Si_list.append(Si)

Ei_list.append(Ei)

return Si_list, Ei_list

def desvio_padrao(valores):

media = sum(valores) / len(valores)

soma_quadrados = sum((x - media) ** 2 for x in valores)

return (soma_quadrados / len(valores)) ** 0.5


```

def remover_linha(dados_secao, idx):
    """
    Remove a linha de índice idx de todas as colunas da seção.
    """
    for coluna in dados_secao:
        if isinstance(dados_secao[coluna], list):
            # remove o item no índice específico
            if idx < len(dados_secao[coluna]):
                del dados_secao[coluna][idx]

def obter_demanda_segura(wn, node_name):
    node = wn.get_node(node_name)

    # Apenas Junctions possuem demanda
    if node.node_type == "Junction":
        # Alguns modelos podem usar demand_timeseries_list
        if hasattr(node, "base_demand"):
            return node.base_demand
        elif hasattr(node, "demand_timeseries_list"):
            if len(node.demand_timeseries_list) > 0:

```

```

        return node.demand_timeseries_list[0].base_value

    return 0.0

else:

    return None # Reservatórios e tanques não têm demanda

def plotar_rede(wn_model,    analise=None,    df_indices=None,    mostrar_nos=True,
mostrar_tubulacoes=True):

    # --- Comportamento automático baseado no tipo da análise ---

    if analise:

        if "Vazão" in analise or "Rugosidade - Vazão" in analise or "Perda de Água - Vazão" in
analise:

            # indicadores por TUBULAÇÃO

            mostrar_nos = False

            mostrar_tubulacoes = True

        elif "Pressão" in analise or "Rugosidade - Pressão" in analise or "Perda de Água -
Pressão" in analise:

            # indicadores por NÓ

            mostrar_nos = True

            mostrar_tubulacoes = False

    # =====

```

```

# SELECIONA ÍNDICES DA ANÁLISE

# =====

indices_por_id = {}

if analise and df_indices is not None:

    # Descobre automaticamente o nome da coluna que contém o ID

    col_id = [c for c in df_indices.columns if c in ("Nó", "Tubulação", "ID")][0]

    col_elast = "Elasticidade"

    for _, row in df_indices.iterrows():

        indices_por_id[str(row[col_id])] = float(row[col_elast])

fig, ax = plt.subplots(figsize=(14, 12))

# Função para aplicar deslocamento visual sem alterar o modelo

def ajustar_xy(name, x, y):

    # 1) Tudo com X < 597.4 → mover para a esquerda

    if x < 597.4:

        x -= 100 # deslocamento visual

    # 2) Nó 9 → mover para a direita

```

```

    if str(name) == "9":

        x += 10

    return x, y

# =====

# 1) Desenho básico da rede

# =====

wntr.graphics.plot_network(

    wn_model,

    node_attribute=None,

    link_attribute=None,

    title="Rede de Abastecimento - Vista Superior",

    ax=ax

)

# =====

# 2) Rótulos dos nós

# =====

if mostrar_nos:

    for node_name, node in wn_model.nodes():

```

```

x, y = node.coordinates

x, y = ajustar_xy(node_name, x, y)


dx, dy = 10, 10


if node.node_type == "Reservoir":

    label = f"{node_name} - Reservatório"

    color = "green"

else:

    if analise in ("Perda de Água - Pressão", "Rugosidade - Pressão") and
str(node_name) in indices_por_id:

        valor = indices_por_id[str(node_name)]

        label = f"{node_name} | E={valor:.2f}"

        color = "purple"

    else:

        label = f"{node_name} - {node.elevation:.2f} m"

        color = "blue"

ax.text(

    x + dx, y + dy,

    label,

```

```

        fontsize=9,

        color=color,

        ha="left",

        va="bottom"

    )

# =====

# 3) Rótulos das tubulações

# =====

if mostrar_tubulacoes:

    # === Lista de tubulações que NÃO devem aparecer por análise ===

    exclusoes = []

    if analise == "Rugosidade - Vazão" or analise == "Perda de Água - Vazão":

        exclusoes = ["1", "15"]

    # (se quiser excluir outras análises pode adicionar aqui)

    for pipe_name, pipe in wn_model.pipes():

```

```
# Se a tubulação estiver na lista de exclusão → pula
```

```
if str(pipe_name) in exclusoes:
```

```
    continue
```

```
start = wn_model.get_node(pipe.start_node).coordinates
```

```
end = wn_model.get_node(pipe.end_node).coordinates
```

```
x1, y1 = ajustar_xy(pipe.start_node, *start)
```

```
x2, y2 = ajustar_xy(pipe.end_node, *end)
```

```
xm, ym = (x1 + x2) / 2, (y1 + y2) / 2
```

```
dx, dy = 5, 5
```

```
if pipe_name in ["10", "12", "20"]:
```

```
    xm += 15
```

```
if pipe_name in ["8"]:
```

```
    xm += 40
```

```
if pipe_name in ["1", "9"]:
```

```
    xm -= 30
```

if analyse in ("Perda de Água - Vazão", "Rugosidade - Vazão") and str(pipe_name) in indices_por_id:

```
valor = indices_por_id[str(pipe_name)]
```

```
label = f"{pipe_name} | E={valor:.2f}"
```

```
color = "purple"
```

else:

```
label = f"{pipe_name} - {pipe.length:.0f} m"
```

```
color = "red"
```

```
ax.text(
```

```
    xm + dx, ym + dy,
```

```
    label,
```

```
    fontsize=8,
```

```
    color="red",
```

```
    ha="left",
```

```
    va="bottom"
```

```
)
```

```
start = wn_model.get_node(pipe.start_node).coordinates
```

```
end = wn_model.get_node(pipe.end_node).coordinates
```

```
# Ajustar coordenadas dos extremos
```



```
x1, y1 = ajustar_xy(pipe.start_node, *start)
```

```
x2, y2 = ajustar_xy(pipe.end_node, *end)
```

```
# Posição média
```

```
xm, ym = (x1 + x2) / 2, (y1 + y2) / 2
```

```
# Pequeno deslocamento geral para legibilidade
```

```
dx, dy = 5, 5
```

```
# 2) Tubulações 10 e 12 → mover para a direita
```

```
if pipe_name in ["10", "12", "20"]:
```

```
    xm += 15
```

```
if pipe_name in ["8"]:
```

```
    xm += 40
```

```
if pipe_name in ["1", "9"]:
```

```
    xm -= 30
```

```
if analyse in ("Perda de Água - Vazão", "Rugosidade - Vazão") and str(pipe_name) in
indices_por_id:
```

```
    valor = indices_por_id[str(pipe_name)]
```

```

label = f"{pipe_name} | E={valor:.2f}"

color = "purple"

else:

label = f"{pipe_name} - {pipe.length:.0f} m"

color = "red"


ax.text(

    xm + dx, ym + dy,

    label,

    fontsize=8,

    color="red",

    ha="left",

    va="bottom"

)


# =====

# 4) Legenda dinâmica

# =====

legend_items = []


if mostrar_nos:

```

```

legend_items.append(

    plt.Line2D([0], [0], label="Nós (ID - Elevação)", color="blue", linestyle="")

)

if mostrar_tubulacoes:

    legend_items.append(

        plt.Line2D([0], [0], label="Tubulações (ID - Comprimento)", color="red",
linestyle="")

    )

# Reservatório sempre aparece

legend_items.append(

    plt.Line2D([0], [0], label="Reservatório", color="green", linestyle="")

)

ax.legend(handles=legend_items, loc="upper right", title="Legenda")

plt.show()

if __name__ == "__main__":

    dados_inp = ler_inp()

    print(dados_inp)

    lista_vazoes = retornar_vazoes(wn)

```

```

print(len(retornar_vazoes(wn)))

print(len(retornar_pressoes(wn)))

delta_perda_de_agua = desvio_padrao([float(x) for x in
dados_inp['JUNCTIONS']['Demand']])

delta_rugosidade = 10

remover_linha(dados_inp['PIPES'], 0)

remover_linha(dados_inp['PIPES'], 13)

# Rugosidade

# Vazão

print('=====')

print('Rugosidade - Vazão')

print('=====')

df_nos_rugosidade_vazao = pd.DataFrame({

    "Tubulação": dados_inp['PIPES']['ID'],

    "Sensibilidade": calcular_sensibilidade_elasticidade(delta_rugosidade,

        [float(x) for x in dados_inp['PIPES']['Roughness']],

```

```

simular_com_fator_parametro(wn, "Roughness",
delta_rugosidade, "vazao"),

simular_com_fator_parametro(wn, "Roughness",
-delta_rugosidade, "vazao"),

retornar_vazoes(wn))[0],

"Elasticidade": calcular_sensibilidade_elasticidade(delta_rugosidade,

[float(x) for x in dados_inp['PIPES']['Roughness']],

simular_com_fator_parametro(wn, "Roughness",
delta_rugosidade, "vazao"),

simular_com_fator_parametro(wn, "Roughness",
-delta_rugosidade, "vazao"),

retornar_vazoes(wn))[1]

})

# Ordenar por maior elasticidade

df_nos_ordenado_rugosidade_vazao =
df_nos_rugosidade_vazao.sort_values(by="Elasticidade",
ascending=False).reset_index(drop=True)

print(df_nos_ordenado_rugosidade_vazao)

# Pressão

print('=====')
```

```

print('Rugosidade - Pressão')

print('=====')

df_pipes_rugosidade_pressao = pd.DataFrame({

    "Nó": dados_inp['JUNCTIONS']['ID'][0:len(dados_inp['JUNCTIONS']['ID'])-1],

    "Sensibilidade": calcular_sensibilidade_elasticidade(delta_rugosidade,

                                                         [float(x) for x in dados_inp['PIPES']['Roughness']],

                                                         simular_com_fator_parametro(wn, "Roughness",

delta_rugosidade, "pressao"),

                                                         simular_com_fator_parametro(wn, "Roughness",

-delta_rugosidade, "pressao"),

                                                         retornar_pressoes(wn))[0],

    "Elasticidade": calcular_sensibilidade_elasticidade(delta_rugosidade,

                                                         [float(x) for x in dados_inp['PIPES']['Roughness']],

                                                         simular_com_fator_parametro(wn, "Roughness",

delta_rugosidade, "pressao"),

                                                         simular_com_fator_parametro(wn, "Roughness",

-delta_rugosidade, "pressao"),

                                                         retornar_pressoes(wn))[1]

    })

df_pipes_ordenado_rugosidade_pressao =
df_pipes_rugosidade_pressao.sort_values(by="Elasticidade",
ascending=False).reset_index(drop=True)

```

```
print(df_pipes_ordenado_rugosidade_pressao)
```

```
# Perda de Água
```

```
# Vazão
```

```
print('=====')
```

```
print('Perda de Água - Vazão')
```

```
print('=====')
```

```
df_nos_perda_agua_vazao = pd.DataFrame({

    "Tubulação": dados_inp['PIPES']['ID'],

    "Sensibilidade": calcular_sensibilidade_elasticidade(delta_perda_de_agua,

                                                         [float(x) for x in dados_inp['JUNCTIONS']['Demand']],

                                                         simular_com_fator_parametro(wn, "Demand",

                                                         delta_perda_de_agua, "vazao"),

                                                         simular_com_fator_parametro(wn, "Demand",

                                                         -delta_perda_de_agua, "vazao"),

                                                         retornar_vazoes(wn))[0],

    "Elasticidade": calcular_sensibilidade_elasticidade(delta_perda_de_agua,

                                                         [float(x) for x in dados_inp['JUNCTIONS']['Demand']],
```

```

simular_com_fator_parametro(wn, "Demand",
delta_perda_de_agua, "vazao"),

simular_com_fator_parametro(wn, "Demand",
-delta_perda_de_agua, "vazao"),

retornar_vazoes(wn))[1]

})

```

```

# Ordenar por maior elasticidade

```

```

df_nos_ordenado_perda_agua_vazao =
df_nos_perda_agua_vazao.sort_values(by="Elasticidade",
ascending=False).reset_index(drop=True)

```

```

print(df_nos_ordenado_perda_agua_vazao)

```

```

# Pressão

```

```

print('=====')

```

```

print('Perda de Água - Pressão')

```

```

print('=====')

```

```

df_pipes_perda_agua_pressao = pd.DataFrame({

"Nó": dados_inp['JUNCTIONS']['ID'][0:len(dados_inp['JUNCTIONS']['ID'])-1],

"Sensibilidade": calcular_sensibilidade_elasticidade(delta_perda_de_agua,

```



```

[ float(x) for x in dados_inp['JUNCTIONS']['Demand']],

simular_com_fator_parametro(wn, "Demand",

                             delta_perda_de_agua,

                             "pressao"),

simular_com_fator_parametro(wn, "Demand",

                             -delta_perda_de_agua,

                             "pressao"),

retornar_pressoes(wn))[0],

"Elasticidade": calcular_sensibilidade_elasticidade(delta_perda_de_agua,

[ float(x) for x in dados_inp['JUNCTIONS']['Demand']],

simular_com_fator_parametro(wn, "Demand",

delta_perda_de_agua, "pressao"),

simular_com_fator_parametro(wn, "Demand",

-delta_perda_de_agua, "pressao"),

retornar_pressoes(wn))[1]

})

df_pipes_ordenado_perda_agua_pressao =
df_pipes_perda_agua_pressao.sort_values(by="Elasticidade",
ascending=False).reset_index(drop=True)

print(df_pipes_ordenado_perda_agua_pressao)

```

```
wn = wntr.network.WaterNetworkModel("dados_genericos.inp")

plotar_rede(wn, "Rugosidade - Vazão", df_nos_ordenado_rugosidade_vazao)

plotar_rede(wn, "Rugosidade - Pressão", df_pipes_ordenado_rugosidade_pressao)

plotar_rede(wn, "Perda de Água - Vazão", df_nos_ordenado_perda_agua_vazao)

plotar_rede(wn, "Perda de Água - Pressão", df_pipes_ordenado_perda_agua_pressao)

plotar_rede(wn)
```

ANEXO A - ARQUIVO INP “New York water supply system” *BENCHMARK*
TRABALHADO

[TITLE]

New York example by Murphy, Simpson and Dandy Res.Rep. No. R109, Dec. 1993

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern
2	0	92.4	;
3	0	92.4	;
4	0	88.2	;
5	0	88.2	;
6	0	88.2	;
7	0	88.2	;
8	0	88.2	;
9	0	170.0	;
10	0	1.0	;
11	0	170.0	;
12	0	117.1	;
13	0	117.1	;
14	0	92.4	;
15	0	92.4	;
16	0	170.0	;
17	0	57.5	;
18	0	117.1	;
19	0	117.1	;
20	0	170.0	;

[RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern
1	300.0	;

[TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter
MinVol	VolCurve				

[PIPES]

;ID	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	
MinorLoss	Status					
1	1	2	11600	180	100	0
	Open	;				
2	2	3	19800	180	100	0
	Open	;				

3	3	4	7300	180	100	0
	Open ;					
4	4	5	8300	180	100	0
	Open ;					
5	5	6	8600	180	100	0
	Open ;					
6	6	7	19100	180	100	0
	Open ;					
7	7	8	9600	132	100	0
	Open ;					
8	8	9	12500	132	100	0
	Open ;					
9	9	10	9600	180	100	0
	Open ;					
10	11	9	11200	204	100	0
	Open ;					
11	12	11	14500	204	100	0
	Open ;					
12	13	12	12200	204	100	0
	Open ;					
13	14	13	24100	204	100	0
	Open ;					
14	15	14	21100	204	100	0
	Open ;					
15	1	15	15500	204	100	0
	Open ;					
16	10	17	26400	72	100	0
	Open ;					
17	12	18	31200	72	100	0
	Open ;					
18	18	19	24000	60	100	0
	Open ;					
19	11	20	14400	60	100	0
	Open ;					
20	20	16	38400	60	100	0
	Open ;					
21	9	16	26400	72	100	0
	Open ;					

[PUMPS]

;ID Node1 Node2 Parameters

[VALVES]

;ID Node1 Node2 Diameter Type Setting MinorLoss

[TAGS]

[DEMANDS]

;Junction	Demand	Pattern	Category
-----------	--------	---------	----------

[STATUS]

;ID	Status/Setting
-----	----------------

[PATTERNS]

;ID	Multipliers
-----	-------------

[CURVES]

;ID	X-Value	Y-Value
-----	---------	---------

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]

Global Efficiency	75
Global Price	0
Demand Charge	0

[EMITTERS]

;Junction	Coefficient
-----------	-------------

[QUALITY]

;Node	InitQual
-------	----------

[SOURCES]

;Node	Type	Quality	Pattern
-------	------	---------	---------

[REACTIONS]

;Type	Pipe/Tank	Coefficient
-------	-----------	-------------

[REACTIONS]

Order Bulk	1
Order Wall	1
Global Bulk	0
Global Wall	0
Limiting Potential	0
Roughness Correlation	0

[MIXING]

;Tank Model

[TIMES]

Duration 0
 Hydraulic Timestep 1:00
 Quality Timestep 0:05
 Pattern Timestep 1:00
 Pattern Start 0:00
 Report Timestep 1:00
 Report Start 0:00
 Start ClockTime 12 am
 Statistic None

[REPORT]

Status No
 Summary No
 Page 0

[OPTIONS]

Units CFS
 Headloss H-W
 Specific Gravity 1
 Viscosity 1
 Trials 40
 Accuracy 0.001
 Unbalanced Continue 10
 Pattern 1
 Demand Multiplier 1.0
 Emitter Exponent 0.5
 Quality NONE mg/L
 Diffusivity 1
 Tolerance 0.01

[COORDINATES]

;Node	X-Coord	Y-Coord
2	528.00	2468.00
3	496.00	2240.00
4	431.00	2000.00
5	427.00	1793.00
6	443.00	1582.00
7	455.00	1395.00
8	533.00	1224.00

9	642.00	1074.00
10	553.00	915.00
11	732.00	1334.00
12	748.00	1570.00
13	780.00	1781.00
14	695.00	2122.00
15	687.00	2403.00
16	963.00	716.00
17	317.00	505.00
18	1110.00	1574.00
19	1419.00	1594.00
20	1061.00	1131.00
1	610.00	2716.00

[VERTICES]

;Link	X-Coord	Y-Coord
-------	---------	---------

[LABELS]

;X-Coord	Y-Coord	Label & Anchor Node
----------	---------	---------------------

[BACKDROP]

DIMENSIONS	261.90	394.45	1474.10	2826.55
UNITS	None			
FILE				
OFFSET	0.00	0.00		

[END]