



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E
MEIO AMBIENTE
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE (MDMA)



ALICE ALVES DA SILVA

ESTIMATIVA DAS PERDAS DE ÁGUA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO.

TERESINA – PI

2025

ALICE ALVES DA SILVA

ESTIMATIVA DAS PERDAS DE ÁGUA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO.

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Piauí (PRODEMA-UFPI) como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Orientadora: Prof^a Dr^a. Renata Shirley de Andrade Araújo

Coorientador: Prof. Dr. Alessandro de Araújo Bezerra

TERESINA - PI

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco
Divisão de Representação da Informação

S586e Silva, Alice Alves da.
 Estimativa das perdas de água em redes de distribuição / Alice
 Alves da Silva. – 2025.
 108 f. : il. color.

 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí, Programa
 de Pós-Graduação em Desenvolvimento e meio Ambiente, Teresina,
 2025.
 “Orientadora: Profª Drª. Renata Shirley de Andrade Araújo.”
 “Coorientador: Prof. Dr. Alessandro de Araújo Bezerra.”

 1. Perdas de Água. 2. Vazamento. 3. Aprendizado de Máquina.
 4. Simulação Hidráulica. 5. Engenharia Civil. 6. Calibração de
 Redes. I. Araújo, Renata Shirley de Andrade. II. Bezerra,
 Alessandro de Araújo. III. Título.

CDD 628.1

Bibliotecário: Gésio dos Santos Barros – CRB3/1469

ALICE ALVES DA SILVA

ESTIMATIVA DAS PERDAS DE ÁGUA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO.

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Piauí (PRODEMA-UFPI) como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Linha de Pesquisa: Biodiversidade e Utilização Sustentável dos Recursos Naturais.

Orientadora: Prof^a Dr^a. Renata Shirley de Andrade Araújo

Coorientador: Prof. Dr. Alessandro de Araújo Bezerra

Aprovada em: 19/11/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **RENATA SHIRLEY DE ANDRADE ARAUJO**
Data: 08/12/2025 15:21:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a Dr^a. Renata Shirley de Andrade Araújo
Universidade Federal do Piauí – UFPI
Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **JOSELIA DE CARVALHO LEAO**
Data: 09/12/2025 17:24:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a Dr^a. Josélia de Carvalho Leão
Universidade Estadual do Piauí – UESPI
Examinador externo

Documento assinado digitalmente
 **DENIS BARROS DE CARVALHO**
Data: 08/12/2025 15:27:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a Dr. Denis Barros De Carvalho
Universidade Federal do Piauí – UFPI
Examinador interno

AGRADECIMENTOS

Agradeço à **Deus**, em primeiro lugar, pela vida e saúde; pelas conquistas e oportunidade de poder chegar até esse momento; por me sustentar e tornar capaz durante toda essa caminhada. Porque em todo tempo Deus é bom.

Ao meu pequeno e amado filho **Caio**, um presente que chegou durante essa jornada e se tornou meu maior motivo de força e determinação para seguir.

Ao meu esposo **Vitor Kauê**, pelo amor, cuidado, incentivo; pelo suporte e zelo pela nossa família e pelas palavras de ânimo.

Aos meus pais **Romana Pereira** e **José Osmar** por todo o amor e cuidado, incentivo e apoio nos momentos difíceis; são meus verdadeiros exemplos de integridade e esforço.

Ao meu irmão **Osmar Junior** pelo carinho, apoio e incentivo.

A **Profª Drª Josélia de Carvalho Leão**, à qual respeito e admiro, docente e pesquisadora, que me apresentou e incentivou ao ingresso nesse programa de pós graduação. Muito obrigado por aceitar fazer parte da minha trajetória acadêmica.

Aos meus orientadores **Profª Drª. Renata Shirley de Andrade Araújo** e **Prof. Dr. Alessandro de Araújo Bezerra** pela paciência e apoio durante a realização deste trabalho. Vosso conhecimento e incentivo foram essenciais para a conclusão desta pesquisa.

Aos **Docentes** do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Piauí – UFPI, que compartilharam seus conhecimentos e incentivaram a buscar novos saberes.

A todos que, de alguma maneira, colaboraram com a execução desta pesquisa.
Obrigada!

“Porque dele, e por meio dele, e para ele são todas as coisas. A ele, pois, a glória eternamente. Amém!”
Romanos 11:36

RESUMO

A perda de água em redes de distribuição é um desafio crítico com severas implicações socioambientais e econômicas, demandando soluções tecnológicas eficientes para a gestão hídrica. Este trabalho teve um duplo objetivo: **(i)** desenvolver um modelo computacional para identificar a localização de perdas em redes de distribuição através da análise de dados de pressão, e **(ii)** avaliar a abordagem de calibração e controle de perdas nos cursos de Engenharia Civil no Brasil. A metodologia combinou a simulação hidráulica (EPANET) com a aplicação de Técnicas de Aprendizado de Máquina (Inteligência Computacional) para detecção e diagnóstico de vazamentos. Os resultados demonstraram que o modelo computacional alcançou uma capacidade satisfatória e precisa na identificação de anomalias, confirmando o potencial da integração de modelagem e IA para a otimização operacional. Paralelamente, a análise curricular revelou uma abordagem prática limitada sobre o tema nas universidades. Em resposta a essa lacuna, foi elaborada uma proposta de disciplina específica, com ementa e bibliografia, visando fortalecer a formação profissional. Conclui-se que a aplicação de modelagem avançada e inteligência artificial é crucial para a gestão eficiente, devendo ser acompanhada pela modernização da formação acadêmica para garantir a sustentabilidade e resiliência dos sistemas de abastecimento.

Palavras-chave: Perdas de Água; Vazamento; Aprendizado de Máquina; Simulação Hidráulica; EPANET; Engenharia Civil; Calibração de Redes.

ABSTRACT

Water loss in distribution networks constitutes a critical challenge with severe socio-environmental and economic implications, demanding efficient technological solutions for water resource management. These losses, mainly caused by leaks, compromise water security and increase operational costs. This study had a dual objective: **(i)** to develop a computational model capable of identifying the location of water losses in distribution networks based on pressure data analysis, and **(ii)** to evaluate the approach to calibration and loss control in Civil Engineering curricula in Brazil. The methodology combined the hydraulic simulation of a fictitious network (using EPANET software) with the application of Machine Learning Techniques (Computational Intelligence) for the real-time detection and diagnosis of leaks. The results demonstrated that the computational model achieved satisfactory and precise capability in identifying anomalies, confirming the potential of integrating hydraulic modeling and ML algorithms for operational optimization. Furthermore, the curriculum analysis revealed a limited practical approach to the topic in universities. In response to this gap, a proposal for a specific course, complete with syllabus and bibliography, was developed to strengthen professional training. It is concluded that the application of advanced modeling and artificial intelligence is crucial for efficient management, and must be accompanied by the modernization of academic training to ensure the sustainability and resilience of water supply systems.

Keywords: Water Loss; Leakage; Machine Learning; Hydraulic Simulation; EPANET; Civil Engineering; Network Calibration.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1	ÁGUA, SAÚDE E O MEIO AMBIENTE	5
2.2	SANEAMENTO	7
2.3	USOS E QUALIDADE DA ÁGUA	9
2.4	REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	12
2.5	PERDAS DE ÁGUA	14
2.6	CALIBRAÇÃO	16
2.7	SISTEMA UFC E EPANET 2.0	17
2.8	PYTHON	18
2.9	APRENDIZADO DE MAQUINA E REDES NEURAS	19
2.10	ENSINO PARA OS CURSOS DE GRADUAÇÃO.....	19
3	REFERÊNCIAS	21
4	ARTIGO I: DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA MONITORAMENTO E CONTROLE DE VAZAMENTOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	28
5	ARTIGO II: CALIBRAÇÃO DE MODELOS HIDRÁULICOS E CONTROLE DE PERDAS DE ÁGUA: ANÁLISE DA INSERÇÃO NOS CURRÍCULOS DE ENGENHARIA CIVIL NO BRASIL.....	57
6	CONCLUSÕES GERAIS.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Índice de Qualidade da Água	11
Figura 2. Esquema de rede de distribuição ramificada.	13
Figura 3. Esquema de rede de distribuição malhada	14
Figura 4. Balanço Hídrico – IWA	15
Figura 5. Tipos de Vazamentos	16

ARTIGO I:

Figura 1- Rede base fictícia	33
Figura 2-Rede MIGHA.....	34
Figura 3- Rede Base - Pontos com inserção de vazamentos	36
Figura 4- Rede MIGHA - Pontos com inserção de vazamentos.	37
Figura 5- Fluxograma de funcionamento do modelo computacional	39
Figura 6 - Distribuição de vazamentos identificados com limite a 50%.	41
Figura 7 - Distribuição de vazamentos identificados com limite a 10%.	42
Figura 8 - Distribuição de vazamentos identificados com limite a 100%.	43
Figura 9- Distribuição de vazamentos identificados com limite a 95%.	45
Figura 10- Distribuição de vazamentos identificados com limite a 90%.	46
Figura 11- Distribuição de vazamentos identificados com limite a 80%.	47
Figura 12- Distribuição de vazamentos identificados com limite a 50%.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição dos pontos de monitoramento no país.	11
--	----

ARTIGO I:

Tabela 1. Tabela da rede - Nós	33
Tabela 2. Tabela da Rede - Trechos	33
Tabela 3- Métricas de desempenho de cada modelo de aprendizado treinado para rede MIGHA	40
Tabela 4- Métricas de desempenho de cada modelo de aprendizado treinado para rede Base	40
Tabela 5 - Vazamentos identificados com limite em 50%	41
Tabela 6 - Vazamentos identificados com limite em 10%	42
Tabela 7- Vazamentos identificados com limite em 100%	43
Tabela 8- Vazamentos identificados com limite em 95%	44
Tabela 9- Vazamentos identificados com limite em 90%.	45
Tabela 10- Vazamentos identificados com limite em 80%.	46
Tabela 11- Vazamentos identificados com limite em 50%.	48

ARTIGO II:

Tabela 1. Universidades Federais Analisadas	61
Continuação da Tabela 1. Universidades Federais Analisadas.	62
Tabela 2. Universidades Estaduais Analisadas.	63
Continuação da Tabela 2. Universidades Estaduais Analisadas.	64
Tabela 3. Identificação das temáticas de perda de água e calibração na ementa dos cursos de Engenharia Civil em instituições Federais.	67
Continuação 1 da Tabela 3. Identificação das temáticas de perda de água e calibração na ementa dos cursos de Engenharia Civil em instituições Federais.....	68
Tabela 4. Identificação das temáticas de perda de água e calibração na ementa dos cursos de Engenharia Civil em instituições Estaduais.	69
Tabela 5. Identificação das disciplinas voltadas a área de rede de abastecimento de água dos cursos de Engenharia Civil em instituições Federais.....	72

Continuação 1 da Tabela 5. Identificação das disciplinas voltadas a área de rede de abastecimento de água dos cursos de Engenharia Civil em instituições Federais. ..	73
Tabela 6. Identificação das disciplinas voltadas a área de rede de abastecimento de água dos cursos de Engenharia Civil em instituições Estaduais.....	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Usos consuntivos setoriais no Brasil em 2020 em %	9
Gráfico 2- Taxa de água potável perdida não contabilizada na distribuição no Brasil dos anos de 2014 a 2021.....	15

ARTIGO I:

Gráfico 1- Vazamentos reais e falsos identificadores em cada simulação na rede MIGHA.	50
Gráfico 2 - Vazamentos reais e falsos identificadores em cada simulação na rede base.	51

ARTIGO II:

Gráfico 1 - Presença do curso de Engenharia Civil nas universidades Federais. ...	65
Gráfico 2 - Presença do curso de Engenharia Civil nas universidades Estaduais. ...	65
Gráfico 3- Identificação das temáticas de perda de água e calibração na ementa dos cursos de Engenharia Civil em instituições Federais.	66
Gráfico 4 - Identificação das temáticas de perda de água e calibração na ementa dos cursos de Engenharia Civil em instituições Estaduais.	66
Gráfico 5. Distribuição das universidades que ofertam o curso de engenharia civil nas regiões do Brasil.....	77
Gráfico 6 - Distribuição das universidades federais com abordagem das temáticas nas regiões do Brasil.....	78
Gráfico 7 - Distribuição das universidades estaduais com abordagem das temáticas nas regiões do Brasil.	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CNE	Conselho Nacional de Educação
IQA	Índice de Qualidade da Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IWA	International Water Association
ML	Machine Learning
MIGHA	Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PPC	Projeto Pedagógico do Curso
RDA	Rede de Distribuição de Água
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UF	Unidade da Federação

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso primordial para a existência de vida no planeta. A importância desse recurso natural engloba desde a sobrevivência humana, e dos seres vivos em geral, até o desenvolvimento produtivo. Garantir a disponibilidade e qualidade desse bem imprescindível é de expresso interesse para a sobrevivência dos ecossistemas e à proteção da saúde coletiva, sendo uma preocupação constante dos governos e da Organização Mundial de Saúde (Andrade, 2021).

A ausência de acesso à água potável figura entre as mais graves desigualdades sociais contemporâneas. Apesar de ser reconhecido como um direito humano básico, esse acesso ainda não é universal. Embora a escassez hídrica seja frequentemente tratada como um problema ambiental, suas raízes estão fortemente associadas a questões sociais, resultantes de desigualdade estrutural e de investimentos insuficientes em infraestrutura de abastecimento (UNESCO, 2021).

Segundo Martins et al. (2022), a segurança hídrica destinada ao abastecimento público está ameaçada pela perda global de biodiversidade, especialmente em função do desmatamento de florestas nativas. A degradação da qualidade da água eleva os custos de tratamento, sendo essa relação fortemente influenciada pela intensificação do uso do solo. Compreender os impactos ambientais decorrentes das atividades humanas é, portanto, uma medida essencial para a garantia da disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas.

O déficit no acesso à água potável representa um desafio grave, com consequências diretas para a saúde pública e para a qualidade de vida das comunidades, podendo ser significativamente mitigado por meio da ampliação e modernização dos serviços de abastecimento (Ministério da Saúde, 2019).

Entre os problemas operacionais das redes de distribuição, destacam-se os vazamentos, que acarretam perdas físicas relevantes, com implicações econômicas, ambientais e sociais. Além de reduzir a disponibilidade de água para consumo e uso produtivo, essas perdas aumentam os custos das companhias de abastecimento, pois demandam maior volume de captação, tratamento e bombeamento, refletindo-se, muitas vezes, em elevação das tarifas (Cambrais, 2024; Novais et al., 2023).

A infiltração de água no solo decorrente de vazamentos compromete a estabilidade geotécnica e pode afetar negativamente a integridade de pavimentos, fundações, pontes e outras estruturas. As consequências dos vazamentos se intensificam proporcionalmente ao volume de água perdido e ao tempo necessário para sua correção, incluindo as etapas de detecção, localização e reparo (Medina e Reis, 2021).

Os vazamentos se encontram diretamente ligados em grande parte a aberturas nos elementos da rede, algo que representa um risco potencial à saúde pública; durante fenômenos transientes podem se apresentar diminuições nas pressões que permitem o ingresso de água presente no meio que pode conter agentes patogênicos ou a ou outros componentes responsáveis à degradação da qualidade da água entregue à população (Medina e Reis, 2021).

O enfrentamento desses desafios requer ações integradas que aliem o uso racional da água à preservação dos recursos hídricos. Isso inclui programas de conscientização, investimentos em tecnologias para eficiência hídrica e implementação de estratégias de redução das perdas em sistemas de distribuição. Nesse cenário, projetos voltados à diminuição de vazamentos configuram prioridade para gestores e pesquisadores (Lima et al., 2023).

No Brasil, em abril de 2023 foram realizadas alterações na Lei de Saneamento Básico de modo a contemplar medidas de prevenção a desperdícios de água potável. Foi acrescido à Lei nº 14.546, de 4 de abril de 2023 o Art. 43-A. que dispõe:

Art. 43-A. É obrigação dos prestadores de serviço público de abastecimento de água, conforme regulamento:

I - Corrigir as falhas da rede hidráulica, de modo a evitar vazamentos e perdas e a aumentar a eficiência do sistema de distribuição; e

II - Fiscalizar a rede de abastecimento de água para coibir as ligações irregulares (Brasil, 2023, p.1).

O controle quanto aos derramamentos provenientes de redes de distribuição de água é de extrema relevância socioambiental. A eficácia no planejamento, execução e monitoramento de projetos que visem tais aspectos é imprescindível. Diante disso, é relevante compreender como tem se dado a abordagem de temáticas

como perdas de água em redes de abastecimento e suas metodologias de busca, como calibração de parâmetros na rede, na formação profissional dos engenheiros civis, profissionais que estão diretamente ligados a concepção e execução dessas estruturas.

O presente estudo tem como foco a criação de uma ferramenta computacional integrada a metodologias de simulação hidráulica e inteligência artificial, com o intuito de apoiar a detecção e análise de perdas de água em redes de distribuição. A proposta busca contribuir para o uso mais eficiente dos recursos hídricos e para o aprimoramento da gestão operacional, associando a aplicação prática da modelagem com o fortalecimento da formação técnica na área, por meio da avaliação e proposição de conteúdos acadêmicos relacionados à calibração e ao controle de perdas em cursos de Engenharia Civil no Brasil. Nesse contexto, foram definidos objetivos que orientam o desenvolvimento e a aplicação da pesquisa.

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um modelo computacional que permita identificar a localização das perdas de água em redes de distribuição, considerando as pressões.

Mais especificamente, os objetivos podem ser listados como sendo:

- Realizar o traçado e dimensionamento de uma rede de distribuição de água fictícia;
- Propor um modelo computacional para busca de vazamentos em redes de distribuição de água com uso de aprendizado de máquinas através de dados de pressão;
- Simular diferentes hipóteses de perdas na rede com a finalidade de testar e analisar o comportamento do modelo computacional;
- Identificar a presença da abordagem sobre calibração e perdas de água nos cursos de Engenharia Civil das Universidades Federais e Estaduais no Brasil.
- Propor, através de ementário e bibliografia, uma disciplina sobre busca por vazamentos, através de calibração, em redes de distribuição de água.

O desenvolvimento deste trabalho está apresentado em quatro partes:

Na **primeira parte - Introdução**, é apresentado o tema e justificada sua importância, **o objetivo geral e os específicos** e descrita sua estrutura.

Na **segunda parte – Referencial teórico**, são apresentados os fundamentos e conceitos que embasam a pesquisa. Inicialmente, aborda-se a relação entre a água, a saúde e o meio ambiente, evidenciando sua relevância para o equilíbrio ecológico e o bem-estar humano. Em seguida, discute-se o saneamento básico, destacando sua importância e os impactos de sua ausência. O texto prossegue com a caracterização dos usos da água e dos padrões de qualidade exigidos, seguida da descrição das principais características de uma rede de distribuição e da análise das perdas de água, incluindo suas tipologias, causas e indicadores. Na sequência, trata-se do processo de calibração de modelos hidráulicos e das funcionalidades do Sistema UFC e do software EPANET 2.0. Abordam-se ainda as aplicações da linguagem Python na automação e análise de dados, bem como os conceitos de aprendizado de máquina e redes neurais voltados à detecção de padrões em sistemas de abastecimento. Por fim, apresenta-se a abordagem de temas relacionados à calibração e ao controle de perdas nos cursos de graduação em Engenharia Civil, discutindo sua importância na formação profissional.

Na **terceira parte** – Resultados estão apresentados, estruturados em forma de dois artigos científicos, que serão enviados a periódicos especializados. O primeiro artigo intitulado: **Desenvolvimento de ferramenta computacional para monitoramento e controle de vazamentos em sistemas de distribuição**, apresenta o desenvolvimento de um código de aprendizado de máquina, juntamente com modelagem hidráulica para a identificação de perdas de água em redes de abastecimento a partir de dados de pressão aferidos na rede. O segundo artigo intitulado: **Calibração de modelos hidráulicos e controle de perdas de água: análise da inserção nos currículos de engenharia civil no Brasil**, refere-se a pesquisa realizada em instituições públicas de ensino superior, nos cursos de engenharia civil sobre a abordagem das temáticas de calibração e perdas de água.

Na **quarta parte** e última - **Conclusões** do estudo e apresentação das recomendações

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ÁGUA, SAÚDE E O MEIO AMBIENTE

É indiscutível que, a água, entre os recursos naturais existentes, é um dos mais amplamente utilizados. Essencial para a manutenção de vida na terra, a água é indispensável na realização de atividades humanas cotidianas, como alimentação, hidratação, higiene pessoal e no desenvolvimento social e econômico como hidrovias, indústrias ou lazer.

As técnicas de armazenamento e distribuição desse recurso foram desenvolvidas desde os tempos pré-históricos, com a criação de métodos simples de captação de água de chuva, rios e lagos. Na antiguidade, o surgimento das primeiras cidades acarretou a um aumento da procura deste valioso recurso. Desde então, passaram a ser desenvolvidos métodos para atender tais requisitos. (Sampaio, Araújo, 2019)

Segundo o Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos, o consumo de água doce tem crescido em nível mundial a uma taxa de 1% ao ano e estimasse que permanecerá crescendo a uma taxa aproximada até 2050, o que corresponde a um aumento entre 20% e 30% em relação ao nível atual de uso do recurso, esse aumento se dá devido ao aumento da população, ao desenvolvimento econômico e às mudanças nos padrões de consumo. A qualidade do bem também diminuiu exponencialmente e o estresse hídrico, já afeta mais de 2 bilhões de pessoas (UNESCO, 2019).

No Brasil, o consumo de água está em constante intensificação, com um crescimento de cerca de 80% na quantidade retirada nas últimas duas décadas. Estima-se que a demanda aumente em 24% até 2030. Dentro das principais tendências e padrões observados nos usos consuntivos da água, a irrigação é a principal e responsável por 52% das retiradas de água, seguida pelo abastecimento urbano (23,8%) (ANA, 2019).

Nos dias atuais, é incontestável o vínculo direto entre meio ambiente e saúde. A saúde humana encontra-se por incontáveis vezes, condicionada aos problemas ambientais. Tal percepção reflete na qualidade de vida da população, uma vez que o

ambiente exerce influência direta e indireta no processo saúde e doença do ser humano. Problemas ambientais como o comprometimento da qualidade da água e do ar, mudanças climáticas, perda de biodiversidade e contaminações por produtos químicos e resíduos são os principais fatores ligados a esse processo (Almeida, Malheiros e Bampi, 2019).

Motivado por esse conhecimento, decorreu a necessidade de uma maior atenção aos conflitos, desafios e discussões relacionados ao acesso à água e ao saneamento, destacando a importância crítica de abordar tais adversidades como uma questão de direitos humanos fundamentais. Conflitos esses como, desigualdades globais de acesso; crises de água; impactos humanitários e de saúde; conflitos armados; pressão da sociedade civil e organizações e precedentes legais e normativos (Penteado, Branchi, 2023).

A partir de julho de 2010, o Direito Humano à Água e ao Esgotamento Sanitário (DHAES) passa a ser garantido internacionalmente pela resolução A/RES/64/292 da Organização das Nações Unidas (ONU), aprovada em assembleia geral, do qual os signatários devem cumprir. (UNGA, 2010; Paz et al., 2021)

No Brasil, dada a diversidade climática e de biomas que estão presentes no decorrer da sua extensão, com regiões de alto volume de precipitação e outras que sofrem o impacto das secas, houve a necessidade de implementar normativas visando a preservação da água. O Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934, conhecido como o código das águas, é um importante marco na legislação brasileira sobre recursos hídricos e regula a relação entre águas públicas e privadas. Esse decreto estabelece as diretrizes para o uso e a gestão das águas no Brasil, ajudando a equilibrar os direitos de uso das águas pelos proprietários com a necessidade de preservar e proteger os recursos hídricos como um bem público e essencial para a sociedade (Brasil, 1934).

Em 1997 foi instituída a Política Nacional De Recursos Hídricos (PNRH) pela Lei nº 9.433, que ficou conhecida como a Lei das Águas. Esta legislação estabelece princípios, diretrizes e instrumentos para a gestão dos recursos hídricos, visando assegurar a disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas para os diversos usos. Dentre os instrumentos dessa legislação estão: o enquadramento dos

corpos de água em classes, outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, sistema de informações sobre recursos hídricos, cobrança pelo uso de recursos hídricos e planos e estudos sobre recursos hídricos (Brasil, 1997).

Ainda no que concerne a preservação e garantia de acesso a água para consumo, o Código Florestal vigente no Brasil, regulado pela Lei nº 12.651 de 2012, traz disposições específicas relacionadas à proteção de áreas de preservação permanente (APPs), que são áreas protegidas ao redor de cursos d'água, nascentes, lagos e reservatórios naturais, entre outros. Essas áreas desempenham um papel crucial na conservação dos recursos hídricos, contribuindo para a manutenção da qualidade e quantidade de água disponível. Sendo também uma regulamentação da relação entre a conservação ambiental e a disponibilidade de recursos hídricos no Brasil (Brasil, 2012).

2.2 SANEAMENTO

O saneamento básico é uma infraestrutura essencial para garantir a saúde pública, a qualidade de vida e a preservação do meio ambiente. Compreendendo uma gama de serviços e infraestruturas, desde o abastecimento de água potável até o tratamento de resíduos, o saneamento desempenha um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico e na promoção da equidade. (Menezes, Teixeira e Braga, 2023)

Dessa forma, é possível compreender que fazem parte do Saneamento os sistemas de abastecimento de água, sistemas de coleta e tratamento de esgoto, gestão dos resíduos sólidos e o manejo das águas pluviais.

Segundo relatório da Organização Mundial de Saúde (OMS), em conjunto com o Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) *“Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2000-2017: Special focus on inequalities”*, embora tenham ocorrido avanços significativos no saneamento básico e acesso a água, todavia, a qualidade dos serviços ainda é insatisfatória e discrepante em nível global. Bilhões de pessoas em todo o mundo ainda continuam sofrendo com a deficiência de acesso ao saneamento, enfrentando riscos à saúde e à dignidade humana. Cerca de 2,2 bilhões

de pessoas em todo o mundo não têm serviços de água tratada. (WHO; UNICEF, 2019b).

A falta de saneamento adequado está diretamente ligada a uma série de problemas de saúde, incluindo doenças transmitidas pela água, como cólera e febre tifoide, bem como infecções respiratórias e parasitárias. Além disso, a falta de acesso a instalações sanitárias adequadas afeta desproporcionalmente mulheres e meninas, exacerbando desigualdades de gênero e dificultando o acesso (Menezes, Teixeira e Braga, 2023).

Investimentos em saneamento não apenas melhoram a saúde e qualidade de vida das populações, mas também contribuem para o desenvolvimento socioeconômicos ao reduzir os custos associados à assistência médica e aumentar a produtividade da mão de obra, além de influenciar diretamente em setores como educação, turismo e valorização imobiliária. A Organização Mundial da Saúde (OMS) afirmou que, para cada dólar investido em água e saneamento, são economizados 4,3 dólares em custos de saúde no mundo (WHO, 2019a).

Segundo o Instituto Trata Brasil (2022), através do estudo *Benefícios Econômicos e Sociais da Expansão do Saneamento Brasileiro 2022*, caso o Brasil cumpra com as metas impostas pelo Marco Legal do Saneamento estima-se que o valor presente da economia total com a melhoria das condições de saúde da população brasileira seja de R\$ 25,1 bilhões, o que resultaria num ganho anual de R\$ 1,25 bilhão.

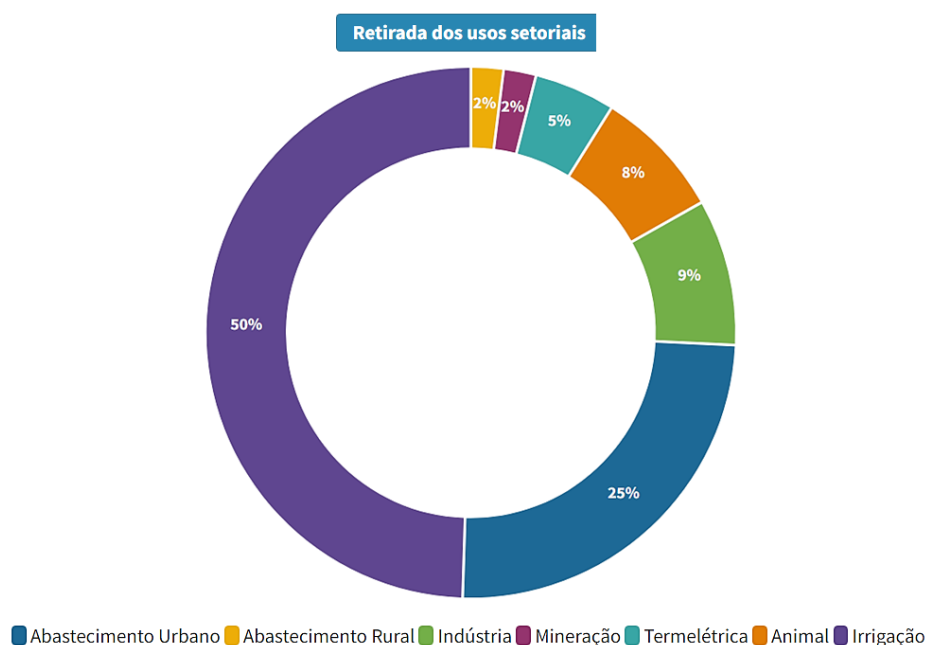
Há uma iniciativa global adotada pela Assembleia Geral das Nações Unidas, composta por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que interligados visam abordar os desafios globais que enfrentamos, como a pobreza, a desigualdade, a mudança climática, a degradação ambiental, a paz e a justiça. Em suma, o saneamento é um componente essencial para alcançar os ODS e construir um futuro mais saudável, próspero e equitativo para todos (IBGE, 2023).

2.3 USOS E QUALIDADE DA ÁGUA

A água é um recurso fundamental para a vida e desempenha múltiplos papéis em diversos setores da sociedade. Dentre os seus mais variados usos tem se: O consumo humano e animal sendo essencial para beber, cozinhar e manter a higiene pessoal; A agricultura juntamente com a pecuária e na produção de culturas aquáticas; Uso industrial; Geração de energia; Transporte; Recreação e Turismo (Tonaco, 2024).

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2022), as principais atividades responsáveis pelo uso consuntivo da água no Brasil são a irrigação, abastecimento humano (urbano e rural), abastecimento animal, indústria, geração termelétrica e mineração, com seus percentis apresentados no gráfico 1. Quanto aos usos não consuntivos, ou seja, não captam água diretamente são apontados usos como navegação, pesca, recreação, turismo e lazer.

Gráfico 1- Usos consuntivos setoriais no Brasil em 2020 em %



Fonte: ANA, 2022.

A qualidade das águas superficiais e subterrâneas é um fator que determina sua disponibilidade para diversos usos, que vão desde os principais usos consuntivos até mesmos os não consuntivos. Essa qualidade é influenciada por questões naturais, como o regime de chuvas, o escoamento superficial, a geologia e a cobertura vegetal,

além de ser impactada por práticas antrópicas. Essas atividades incluem fontes pontuais e difusas de poluição, como o lançamento de efluentes, o manejo dos solos e as cargas contaminantes que são manipuladas, despejadas ou dispostas na superfície ou no subsolo, entre outros fatores (ANA, 2022).

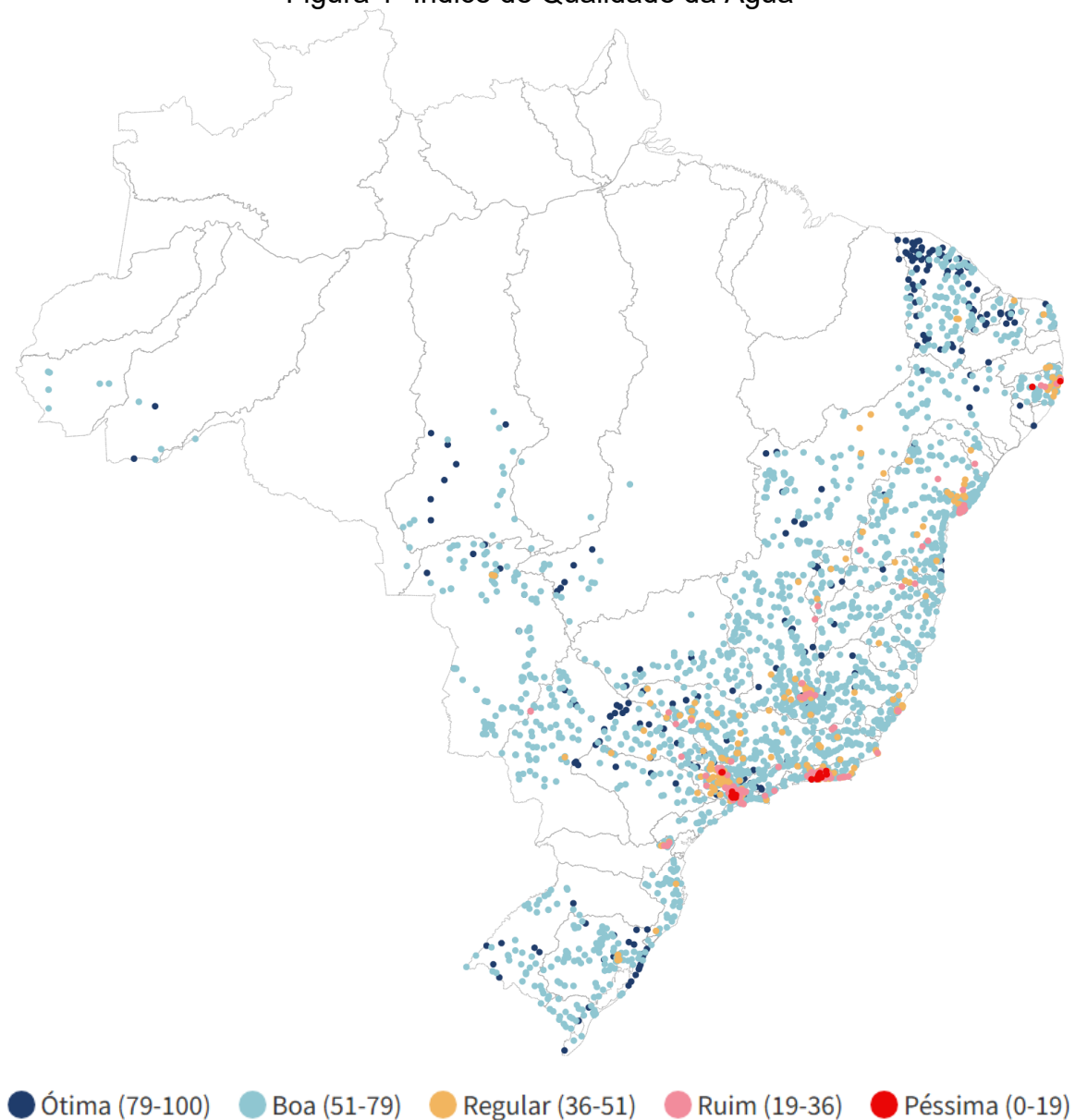
No que se trata do consumo dessas águas, a qualidade é crucial. Águas contaminadas podem ser prejudicial à saúde humana, animal e ao meio ambiente. Alguns aspectos considerados para avaliação da qualidade da água incluem: Potabilidade: água destinada ao consumo humano deve atender a padrões rigorosos para evitar doenças transmitidas pela água; Qualidade Química: Isso inclui a presença de metais pesados, produtos químicos industriais, pesticidas e outros contaminantes que podem afetar a saúde e a ecologia; Qualidade Biológica: Presença de microrganismos patogênicos que podem causar doenças, como bactérias, vírus e parasitas; e a Qualidade Física: Leva em conta aspectos como turbidez (claridade), cor e odor da água (Luciano et al, 2024).

Uma ferramenta importante utilizada para mensurar a qualidade da água foi desenvolvida em 1970, pela National Sanitation Foundation nos Estados Unidos, O Índice de Qualidade da Água (IQA). Trata-se de um índice composto por nove parâmetros físico-químicos e biológicos (OD, DBO, temperatura, pH, coliformes termotolerantes, nitrogênio, fósforo, sólidos e turbidez), aos quais são atribuídos diferentes pesos (ANA 2022).

Com base nesse índice a ANA apresenta na figura 1 um mapa que aponta os valores de IQA obtidos no decorrer da extensão do território Brasileiro com os dados dos anos de 2019-2020, onde os menores valores indicam maior comprometimento da qualidade da água. As classificações são apresentadas como: péssima (0-19), ruim (19-36), regular (36-51), boa (51-79) e ótima (79-100).

A base de dados de monitoramento da ANA conta com 3421 pontos distribuídos por pelo país conforme a tabela x. Ao nível das Unidades da Federação, a distribuição espacial dos pontos de monitoramento prioriza os locais de interesse para a gestão da qualidade da água dos rios e lagos. Questões logísticas relacionadas com a coleta de amostras de água também são levadas em consideração pelos operadores das redes para a distribuição dos pontos no território. (ANA, 2022).

Figura 1- Índice de Qualidade da Água



Fonte: ANA, 2022.

Tabela 1. Distribuição dos pontos de monitoramento no país.

Pontos de monitoramento por Unidade da Federação							
UF	Pontos	UF	Pontos	UF	Pontos	UF	Pontos
AC	17	PB	6	ES	124	RS	102
AL	43	PE	122	GO	8	SC	40
BA	474	PR	121	MG	720	SE	81
CE	160	RJ	201	MS	156	SP	544
DF	185	RN	105	MT	106	TO	106

Fonte: ANA, 2022.

Garantir a disponibilidade de água limpa e de qualidade é um desafio global crescente. A urbanização, a industrialização e as mudanças climáticas estão aumentando a pressão sobre os recursos hídricos. A gestão sustentável da água envolve a conservação, tratamento, políticas e regulação, educação e conscientização (Tonaco,2024).

Em suma, a água é um recurso vital cujo uso e qualidade são essenciais para a saúde humana, a produção de alimentos, o desenvolvimento industrial e econômico, além de desempenhar um papel fundamental no meio ambiente e na sustentabilidade global. Portanto, a gestão cuidadosa e responsável da água é crucial para o bem-estar das gerações atuais e futuras.

2.4 REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Segundo Macêdo, Azevedo e Bezerra (2021), uma Rede de Distribuição de Água (RDA) é um sistema hidráulico composto por reservatórios, bombas, tubulações, válvulas, sensores e outros acessórios projetados para fornecer água potável com vazão e pressão suficientes para satisfazer de forma contínua e adequadamente as necessidades de água dos consumidores instalados na sua área de abrangência.

As redes de distribuição de água demandam redobro de atenção dos projetistas no que concerne aos parâmetros do sistema, hipóteses de cálculo assumidas e metodologias, por serem uma parcela fundamental dos sistemas de abastecimento de água, sendo a parte que se encontra em contato direto com os consumidores e que contam com uma composição demasiadamente complexa e sobretudo devido aos seus altos custos de implantação, operação e manutenção, a fim de que se possa obter um projeto eficiente. (Porto, 2006)

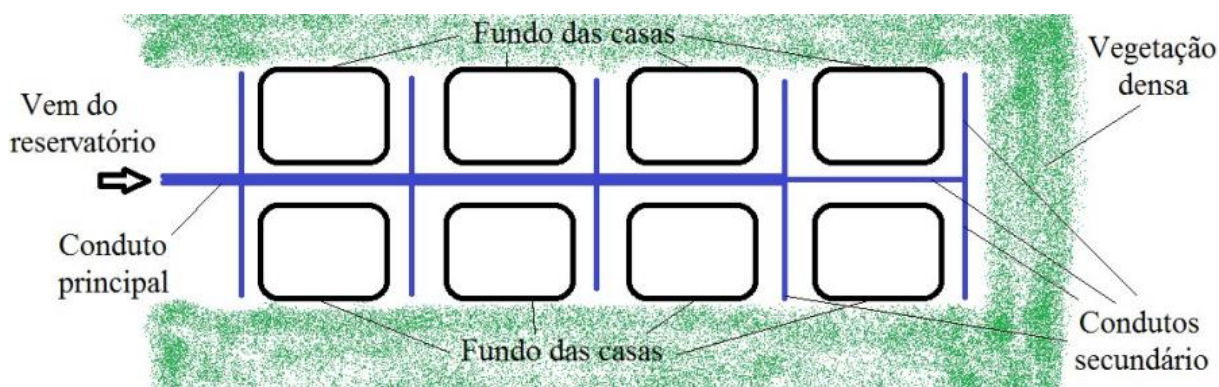
Azevedo Netto e Fernández (2018), aponta que a formação de uma rede de distribuição se dá por condutos, que costumam ser classificados em 2 tipos;

- i) Principais: Também chamados de tronco, que possuem os maiores diâmetros e são responsáveis diretos por abastecer os secundários;

- ii) Secundários: Com diâmetros inferiores aos principais, são responsáveis pelas ligações de abastecimento direto com os prédios que serão atendidos pela rede.

As redes de distribuição, formadas por um conjunto de tubulações, podem ser classificadas de acordo com seu traçado como rede ramificada e rede malhada. As redes ramificadas tem como característica o abastecimento iniciando a partir de uma tubulação tronco, abastecida por um reservatório ou estação elevatória, que distribui para as secundárias, tornando o sentido da vazão conhecido em qualquer ponto da rede, dessa forma, toda a rede fica condicionada a tubulação principal. Na figura 1 é demonstrado um esquema desses tipos de redes que são empregados em pequenas comunidades e sistemas de irrigação, por exemplo.

Figura 2. Esquema de rede de distribuição ramificada.

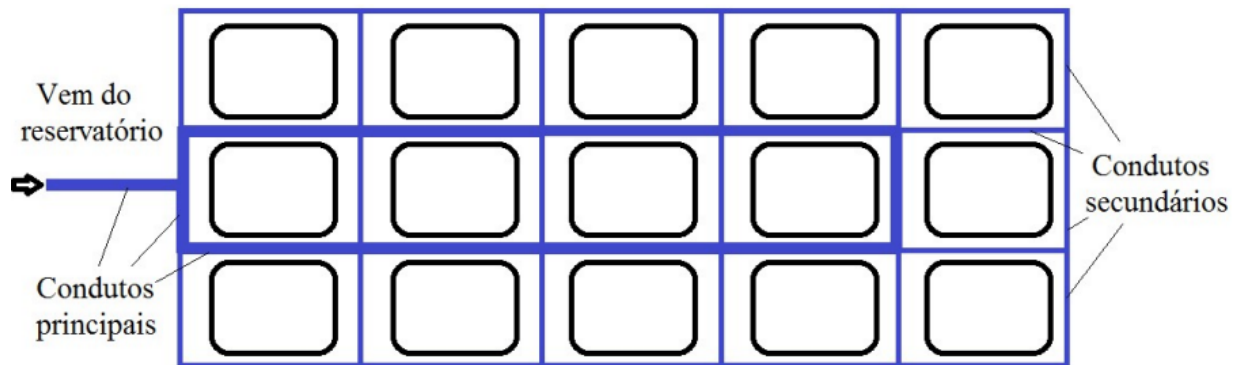


Fonte: Bezerra, 2018.

As redes malhadas, por sua vez, são amplamente aplicadas na maior parte das cidades. Na figura 2 é demonstrado um esquema desse tipo de rede.

As redes malhadas, são formadas por várias tubulações tronco que formam anéis ou malhas. Tal construção geométrica permite ainda a reversibilidade do sentido de abastecimento, conforme necessário, tornando não elementar o conhecimento do sentido do fluxo de abastecimento, possibilitando ainda a manutenção e eventuais reparos na rede, sem que haja necessidade de interrompimento total no sistema.

Figura 3. Esquema de rede de distribuição malhada



Fonte: Bezerra, 2018.

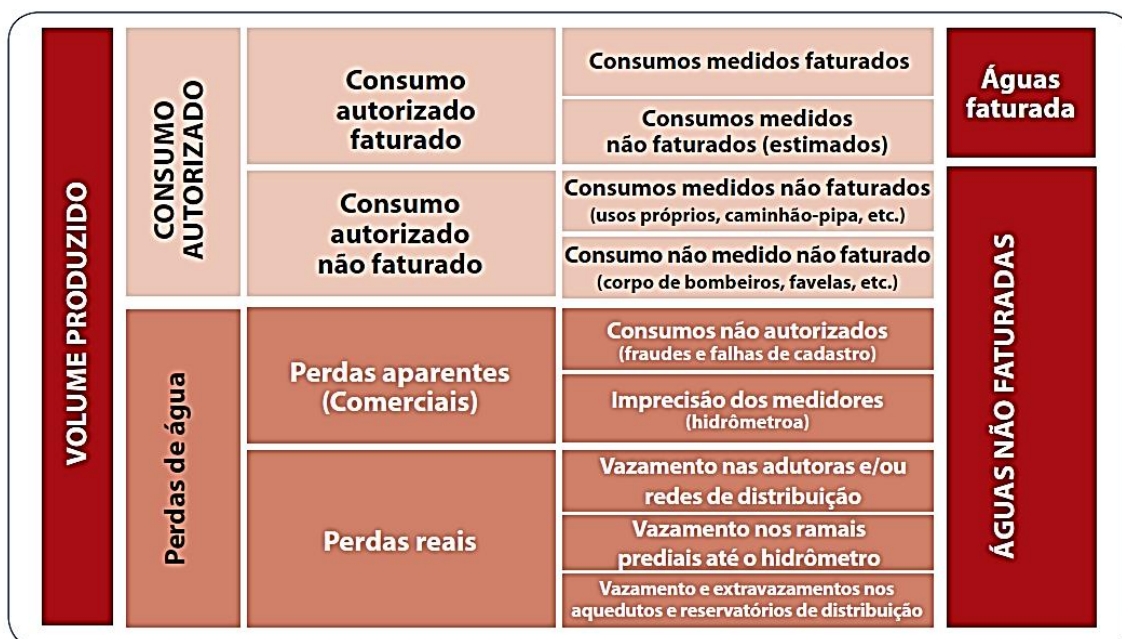
2.5 PERDAS DE ÁGUA

A disponibilidade hídrica mundial a cada dia alcança uma situação de maior precariedade. A demanda por água para as mais diversas atividades antrópicas em estado crescente vem gerando conflitos entre os principais usuários desse recurso. O crescimento populacional, o aumento da industrialização e as perdas em sistemas de abastecimento são os principais fatores que contribuem para esse cenário. (Ministério da Saúde, 2019)

Com a aprovação da Agenda 2030 em setembro de 2015 foram estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) dos quais entre eles se encontra o ODS 6 que elenca os problemas de água potável e saneamento e traz metas como: aumentar substancialmente a eficiência do uso da água, eliminar despejo de água e implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis (IBGE, 2023).

Com o surgimento do Manual de melhores práticas da Associação Internacional da Água (IWA) do ano de 2000 foi possível realizar a padronização do Balanço Hídrico, apresentado na figura 4, a partir do qual foram padronizados os conceitos e indicadores para os sistemas de abastecimento de água a nível mundial. Segundo a IWA, definem-se perdas como “toda perda real ou aparente de água ou todo o consumo não autorizado que determina aumento do custo de funcionamento ou que impeça a realização plena da receita operacional”. (Ministério da Saúde, 2014)

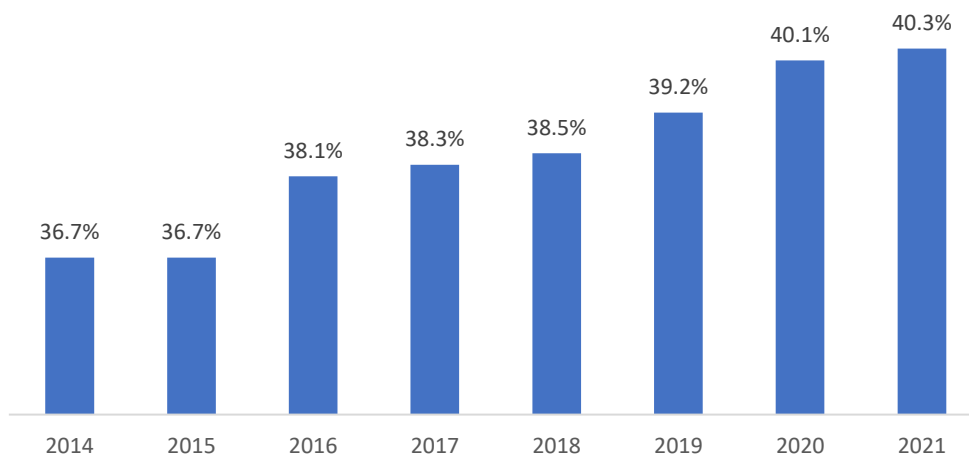
Figura 4. Balanço Hídrico – IWA



Fonte: Ministério da Saúde, 2014.

Segundo o Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS), de acordo com os dados do ano de 2021, o Brasil registra uma taxa de 40,3% de água potável disponibilizada que não é contabilizada ou é perdida na distribuição. Um dado relevante que causa preocupação mediante ao desperdício desse recurso, principalmente quando comparado com os dados dos anos anteriores que mostram uma tendência de crescimento dessa taxa que era de 36,7% no ano de 2014 como mostrado no gráfico 2.

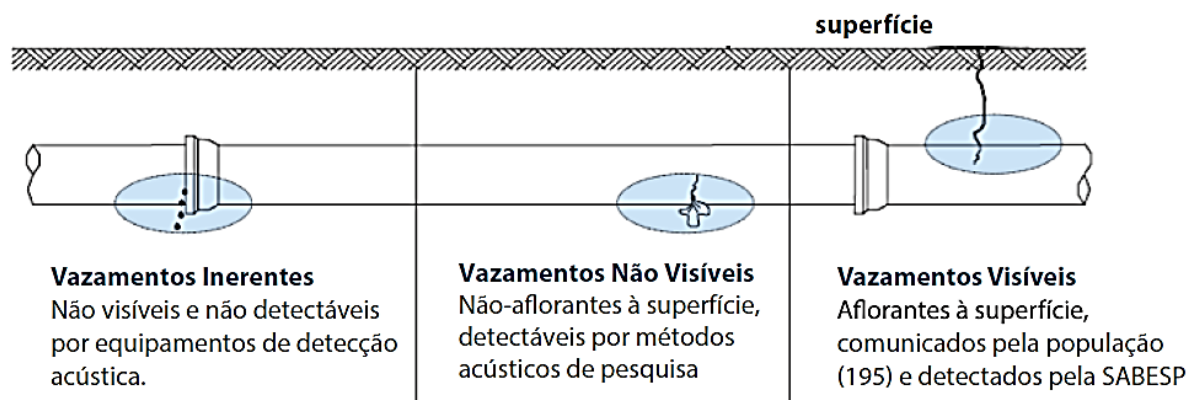
Gráfico 2- Taxa de água potável perdida não contabilizada na distribuição no Brasil dos anos de 2014 a 2021.



Fonte: SNIS, 2021.

No que concerne as perdas reais, das quais os vazamentos são os principais responsáveis, o Ministério da Saúde (2014) aponta por tipos de vazamentos as situações mais comumente encontradas, como apresentado na Figura 4.

Figura 5. Tipos de Vazamentos



Fonte: Ministério da Saúde, 2014.

Para Salvino, Carvalho e Gomes (2015), no que se trata do percentual de perdas causadas por vazamentos, o artifício a empregar é a restauração da rede, isto é, substituir tubulações e outros acessório antigos constituintes dos sistemas das RDAs. Os sistemas de medição e monitoramento controlam a produção de água em pontos específicos de uma rede. A maior parte desses procedimentos são onerosos, e atingir soluções mais eficientes está diretamente ligado a identificação mais precisa do ponto em que será necessária a reabilitação.

2.6 CALIBRAÇÃO

Nos dias atuais, os métodos computacionais tem se tornado indispensáveis na construção de projetos de engenharia, no que se trata de sistemas de abastecimento, o uso da tecnologia para a simulação do comportamento dos fluidos e redes de distribuição torna os projetos mais precisos e seguros.

Segundo Salvino, Carvalho e Gomes (2015) nos últimos anos, houve um notável aumento no estudo da calibração de redes de distribuição de água. Isso se deve ao avanço substancial dos modelos matemáticos, algoritmos e à evolução contínua das tecnologias de supervisão e controle. Esses avanços têm viabilizado a criação de modelos mais precisos e a implementação de algoritmos inteligentes,

aprofundando o entendimento sobre a rede em variados contextos e condições, resultando em respostas mais ágeis. Além disso, oferece suporte crucial para a reabilitação e operação eficiente dessas redes.

Para Araujo, Bezerra e Castro (2021) a calibração é um procedimento experimental que consiste em estabelecer, diante de condições especificadas, a relação entre os valores indicados por medições e valores estabelecidos como padrão. De acordo com Walski (1983), uma definição mais precisa para calibração de um modelo de distribuição de água consiste em um processo de dois passos, no qual o primeiro consiste na comparação de pressões e vazões calculadas com as observadas em condições de operação do sistema e, o segundo, no ajuste dos dados de entrada do modelo para que haja concordância entre o modelo calculado e o sistema observado.

Salvino, Carvalho e Gomes (2015) apontam três categorias em que os procedimentos de calibração de redes de distribuição de água podem ser divididos: iterativos, explícitos ou diretos e implícitos ou inversos. Nos quais, o método iterativo geralmente utiliza a metodologia de tentativa e erro, partindo de uma solução extrema onde em cada iteração os valores medidos são comparados aos simulados. O método explícito ou direto têm como base a solução, em regime permanente, de equações e análise matricial em condições de contorno bem definidas utilizando como base as equações clássicas da energia e da continuidade. Para Bezerra (2018) método inverso, visa à atualização de dados computacionais calculados buscando se aproximar de dados físicos observados.

2.7 SISTEMA UFC E EPANET 2.0

O sistema UFC é composto por um conjunto de softwares escritos em diversas linguagens de programação, que auxilia no processo de traçado e dimensionamento hidráulico de redes de abastecimento de água, adutoras e redes de esgoto sanitário. Funcionando como uma extensão ao programa AUTOCAD, desenvolvido pela Autodesk e amplamente difundido no âmbito profissional da engenharia para o desenvolvimento de projetos (LAHC, 2023).

O EPANET 2.0 é um simulador de sistemas de abastecimento de água, feito para auxiliar na análise de estratégias alternativas de gestão, quem podem ir desde a melhorar a qualidade da água do sistema como a eficiência no processo de distribuição, como é o foco do estudo em questão, disponibilizado, em português, pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento - LENHS/UFPB (UFPB, 2020).

2.8 PYTHON

Python é uma linguagem com estruturas de dados de alto nível, eficiente e com uma abordagem simples, mas efetiva de programação orientada a objetos. A tipagem dinâmica de Python combinada com sua natureza interpretativa, torna a linguagem excepcional para o desenvolvimento de aplicações rápidas em diversas áreas e na maioria das plataformas (Python Software Foundation, 2023).

A linguagem Python de programação é vastamente utilizada em práticas da Web, desenvolvimento de software, ciência de dados e machine learning (ML). Muito escolhida pelos desenvolvedores por sua eficiência e facilidade de aprendizado, pode ser executada em muitas plataformas diferentes (Kalinowski et al., 2023).

Para a escrita e desenvolvimento de códigos na linguagem é possível contar com a assistência das bibliotecas. Uma biblioteca em Python é um conjunto de módulos e funções pré-definidos que podem ser utilizados para facilitar o desenvolvimento de programas. Elas contêm funções, classes e métodos que agilizam o desenvolvimento de aplicativos, proporcionando uma série de recursos prontos para serem utilizados. (Kalinowski et al., 2023)

Dentre as escolhas apontadas destaca-se a disponibilidade de bibliotecas de funções Epanet na linguagem Python para vinculação entre os programas, diferindo apenas no contexto da função e nos parâmetros de retorno, possibilitando assim o trabalho concomitante de simulações da rede e análise de resultados tornando o modelo mais eficiente e ágil.

2.9 APRENDIZADO DE MÁQUINA E REDES NEURAIS

A área de Aprendizado de Máquina dentro da Inteligência Artificial concentra-se em desenvolver técnicas computacionais para aprimorar o aprendizado e construir sistemas que possam adquirir conhecimento de maneira autônoma. Um sistema de aprendizado é um software que toma decisões com base em experiências acumuladas através da resolução bem-sucedida de problemas anteriores (Monard, Baranauskas, 2022).

É uma técnica de análise de dados que automatiza a criação de modelos analíticos, reconhece padrões e faz escolhas com pouca intervenção humana. Pertencente ao campo da inteligência artificial, utiliza entradas humanas para aprimorar seu desempenho por meio do processo de aprendizado (Monard, Baranauskas, 2022).

Entre as técnicas mais populares de Aprendizado de Máquina estão as Redes Neurais, que são modelos computacionais inspirados no funcionamento do cérebro humano e são utilizadas para resolver uma variedade de problemas, desde reconhecimento de padrões até tomada de decisões complexas. As redes neurais consistem em camadas de neurônios interconectados que processam informações e aprendem a partir dos dados de entrada, ajustando os pesos das conexões entre os neurônios durante o treinamento. Elas têm sido aplicadas com sucesso em diversas áreas, incluindo visão computacional, processamento de linguagem natural, reconhecimento de voz, entre outros (Furtado, 2019).

2.10 ENSINO PARA OS CURSOS DE GRADUAÇÃO

O ensino superior é um pilar essencial para o desenvolvimento de uma sociedade, fornecendo habilidades, conhecimentos e recursos necessários para impulsionar a economia, promover a inovação e contribuir para o progresso social. No entanto, a qualidade e a pertinência dos cursos oferecidos são elementos-chave que influenciam diretamente o sucesso dos estudantes e o impacto da educação no país como um todo. (UNESCO, Ministério da Educação, 2012)

O curso de graduação em Engenharia Civil desempenha um papel fundamental na formação de profissionais capacitados para projetar, construir, gerenciar e manter infraestruturas e edificações essenciais para o desenvolvimento e o bem-estar da sociedade. Dentre eles estão: planejamento e projeto, sustentabilidade e impacto ambiental, segurança e resiliência e desenvolvimento econômico e social.

No cenário educacional brasileiro, o Conselho Nacional de Educação (CNE) desempenha um papel fundamental na definição de diretrizes e normas para o funcionamento e a criação de cursos no ensino superior. Suas orientações não apenas garantem a qualidade e a relevância dos programas acadêmicos, mas também asseguram que os estudantes tenham acesso a uma formação consistente e alinhada às demandas do mercado e às necessidades sociais. (Ministério da Educação, 2018)

Dentro das atribuições do CNE, no que se refere aos cursos de graduação em engenharia a Resolução nº 1, de 26 de março de 2021, que altera e define o Art. 9º, § 1º da Resolução CNE/CES 2/2019, onde aponta que a responsabilidade pela definição da grade curricular dos cursos de Engenharia é das instituições de ensino superior que oferecem esses cursos. A forma de se trabalhar os conteúdos básicos, profissionais e específicos assim como os objetos de conhecimento e as atividades necessárias para o desenvolvimento das competências estabelecidas deve ser proposta e justificada no próprio Projeto Pedagógico do Curso.

3 REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218:2017 – Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ALMEIDA, D. R. de; MALHEIROS, A. F.; BAMPI, A. C. Percepção da equipe de saúde da família sobre degradação ambiental e relação com saúde. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, ed. 2, p. 138-146, 2019. DOI 10.6008/CBPC2179-6858.2019.002.0012. Disponível em: 336368169_Percepcao_da_equipe_de_saude_da_familia_sobre_degradacao_ambiental_e_relacao_com_saude. Acesso em: 18 jun. 2024.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: relatório pleno**. Brasília: ANA, 2022. 132 p. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdirec.pdf. Acesso em: 25 jul. 2024.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019. 75 p. ISBN 978-85-8210-057-8.

ANDRADE, D. F. de. **A efetivação do acesso à água potável enquanto direito fundamental pelo estado brasileiro**. 2021. Trabalho de conclusão de Curso (Bacharel em Direito) - Faculdade de Inhumas. Disponível em: <http://65.108.49.104/handle/123456789/229>. Acesso em: 13 jun. 2024.

ARAUJO, R. B. A. de; BEZERRA, A. de A.; CASTRO, M. A. H. de. Detecção de vazamentos em redes de distribuição de água pela aplicação do Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) para calibrar vazões mediante modelagem computacional. **Revista DAE**, São Paulo, v. 69, ed. 232, p. 45-56, 2021. DOI <https://doi.org/10.36659/dae.2021.060>. Disponível em: http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_232_n_1995.pdf. Acesso em: 9 dez. 2023.

AZEVEDO NETTO, J. M. de; FERNÁNDEZ, M. F. y. **Manual de Hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2018. 632 p. ISBN 978-85-212-0889-1.

BEZERRA, A. de A. **MODELAGEM NUMÉRICA COMPUTACIONAL APLICADA À CALIBRAÇÃO ATRAVÉS DE NOVAS EQUAÇÕES PARA O USO DO MÉTODO ITERATIVO DO GRADIENTE HIDRÁULICO/CONCENTRAÇÃO ALTERNATIVO (MIGHA) EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**. Orientador: Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, Ph.D. 2018. 974 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/30770>. Acesso em: 2 ago. 2023.

BRASIL. **Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934**. Decreta o Código de Águas. Regula a utilização das águas públicas e dá outras providências. Diário Oficial da União, Rio de Janeiro, 11 jul. 1934.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Da Política Nacional De Recursos Hídricos**, Brasília, 1997.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, 2012.

BRASIL. **Lei nº 14.546, de 4 de abril de 2023**. Altera a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (Lei de Saneamento Básico), para estabelecer medidas de prevenção a desperdícios, de aproveitamento das águas de chuva e de reúso não potável das águas cinzas. [S. l.], 4 abr. 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.546-de-4-de-abril-de-2023-475182230>. Acesso em: 28 set. 2023.

CAMBRAIS, M. R. **Diagnóstico e avaliação de um sistema abastecimento de água em município de médio porte: um estudo sobre perdas**. 2024 153 f. Dissertação (Mestrado em) Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2024.

CORRÊA, S. da S.; LIMA, P. H. L. de; OLIVEIRA, A. A. A. de; BEZERRA, S. de T. M. Modelo de otimização para a setorização de sistemas de distribuição de água. **XVII Congresso Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento, Saneamiento e Riego (SAREA23)**, 2023. Disponível em: <https://serea23.com/wp-content/uploads/2023/06/6294.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2024.

COSTA, F. A. dos S. Tratamento de água. **Conselho Regional de Química - Química Viva**, São Paulo, 28 jun. 2011. Disponível em: https://www.crq4.org.br/quimicaviva_tratamento_agua. Acesso em: 8 jun. 2023.

FURTADO, M. I. V. **Redes neurais artificiais: Uma abordagem para sala de aula**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. ISBN 978-85-7247-326-2.

GONZÁLEZ, J. A C.; PONCE, J. C. H. Cálculo hidráulico de la red entubada en el módulo tetameche, distrito de riego. 063 guasave, sinaloa. **VII Congreso Nacional de Riego, Drenaje y biosistemas**, Teziutlán, Puebla, 2022. Disponível em: https://www.riego.mx/congresos/comeii2022/assets/docs/ProtPonencias/PDF_Extensio/22016_Jorge_Castillo_extenso.pdf. Acesso em: 29 jul. 2024.

HANDAM, N. B.; SALLES, M. J.; SOTERO-MARTINS, A.; SANTOS, J. A. A. dos. Qualidade sanitária da água para consumo humano: educação ambiental e em saúde - cartilha “Água potável: cuidados e dicas” / Qualidade sanitária da água para consumo humano: educação ambiental e em saúde - cartilha “Água potável: cuidados e dicas”. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 23858–23867, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n4-075. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/46111>. Acesso em: 19 jul. 2024.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Brasil, 2023. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/>. Acesso em: 24 jul. 2023.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Benefícios econômicos e sociais da expansão do saneamento no Brasil. **Saneamento e Desenvolvimento humano**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/11/Beneficios-economicos-do-saneamento-no-Brasil.pdf>. Acesso em: 29 maio 2024.

JESUS, F. L. F. de; SANTOS, O. N. A.; TALAMINI JUNIOR, M. V.; GOMES, T. M.; ROSSI, F.; SÁNCHEZ ROMÁN, R. M. ÁGUAS RESIDUÁRIAS PARA IRRIGAÇÃO NO BRASIL: UMA ABORDAGEM QUÍMICA, FÍSICA E MICROBIOLÓGICA. **IRRIGA**, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 562–589, 2020. DOI: 10.15809/irriga.2020v25n3p562-589. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/2873>. Acesso em: 19 jul. 2024.

KADINSKI, L. *et al.* Machine learning methodologies to predict possible water quality anomalies as a support tool for online monitoring of organic parameters. **2nd International Join Conference on Water Distribution System Analysis (WDSA) & Computing and Control in the Water Industry (CCWI)**: Editorial Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2022. DOI 10.4995/WDSA-CCWI2022.2022.14703. Disponível em: <https://riunet.upv.es/handle/10251/205984>. Acesso em: 29 jul. 2024.

KALINOWSKI, Marcos *et al.* **Engenharia de Software para ciência de dados**: Um guia de boas práticas com ênfase na construção de sistemas de machine learning. 1. ed. São Paulo: Aovs Sistemas de Informática, 2023. ISBN 978-85-5519-335-4.

LAHC - LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL. **Manuais do UFC**. [S. l.], 2023. Disponível em: <http://www.lahc.ufc.br/manual/>. Acesso em: 3 ago. 2023.

LIMA, M. S. da C. *et al.* **Educação ambiental e a conscientização sobre a utilização racional dos recursos hídricos**. In: OPEN SCIENCE RESEARCH X. [S. l.]: Editora Científica Digital, 2023. v. 10, cap. 143, p. 2059-2074. ISBN 978-65-5360-270-0. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/230111764.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2024.

LUCIANO, B. H.; CAPINGANA, I. N. C.; COSTA, E. C. C. da; MANUEL, M. N. B.; XIXI, J. G.; CHIMUCO, A. P. A.; CAMBUNDA, A. P.; NHIME, J. E. L. Qualidade da água para o abastecimento público no município do Lobito: Water quality for public supply in the municipality of Lobito. **Brazilian Journal of Business**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 321–337, 2024. DOI: 10.34140/bjbv6n1-024. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJB/article/view/68125>. Acesso em: 18 jul. 2024.

MARTINS, D. V. R.; ROCHA, J.; SILVA, T. M.; CAMPIOLO, S. Avaliando a relação entre a qualidade e os custos de tratamento de água e a alteração dos usos do solo em múltiplas escalas espaciais: um caso de estudo de bacias hidrográficas do sul da Bahia, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 773-782,

Jul/Ago 2022. DOI 10.1590/S1413-415220200132. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/SKyWVTMnF8Ych6WRC49xtYF/?lang=pt>. Acesso em: 28 jul. 2023.

MACÊDO, J. E. S. DE.; AZEVEDO, J. R. G. DE.; BEZERRA, S. DE T. M.. Hybrid particle swarm optimization and tabu search for the design of large-scale water distribution networks. **RBRH**, v. 26, p. e11, 2021.

MEDINA, M. M. G.; REIS, L. F. R. Detecção de vazamentos em redes de distribuição de água para abastecimento: estado da arte. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Maceió, 2021. Disponível em: https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=81&SUMARIO=1335&ST=deteccao_de_vazamentos_em_redes_de_distribuicao_de_agua_para_abastecimento_estado_da_arte. Acesso em: 8 jul. 2024.

MELESHKO, A. V.; DESNITSKY, V. A.; KOTENKO, I. V. Machine learning based approach to detection of anomalous data from sensors in cyber-physical water supply systems. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 709, ed. 3, 2020. DOI 10.1088/1757-899X/709/3/033034. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/709/3/033034>. Acesso em: 29 jul. 2024.

MICRO AMBIENTAL. Por que as oscilações de Cloro Residual Livre nos sistemas de água são um problema. **Programa Água Segura**, São Paulo, 18 fev. 2020. Disponível em: <https://microambiental.com.br/analises-de-agua/como-evitar-as-oscilacoes-de-cloro-residual-livre-na-agua/>. Acesso em: 8 jun. 2023.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO (Brasil). **Conselho Nacional de Educação – CNE**. [S. l.], 2018. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/conselho-nacional-de-educacao/apresentacao>. Acesso em: 27 maio 2024.

MINISTÉRIO DA SAÚDE (Brasil). Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**. Brasília: Funasa, 2014a. 112 p. Disponível em: [https://www.funasa.gov.br/documents/20182/38937/Manual+de+controle+da+qualidade+da+da+%C3%A1gua+para+t%C3%A9cnicos+que+trabalham+em+ETAS%202014.pdf](https://www.funasa.gov.br/documents/20182/38937/Manual+de+controle+da+qualidade+da+%C3%A1gua+para+t%C3%A9cnicos+que+trabalham+em+ETAS%202014.pdf). Acesso em: 25 set. 2023.

MINISTÉRIO DA SAÚDE (Brasil). Fundação Nacional de Saúde. **Redução de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água**. 2. ed. Brasília: Funasa, 2014b. 172 p. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br>. Acesso em: 5 out. 2023.

MINISTÉRIO DA SAÚDE (Brasil). Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. 5. ed. Brasília: [s. n.], 2019. 545 p. ISBN 978-85-7346-060-5.

MINISTÉRIO DA SAÚDE (Brasil). **Portaria GM/MS Nº888, 4 de Maio de 2021**. Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 4 maio 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_24_05_2021_rep.html. Acesso em: 29 maio 2023.

MENEZES, R. N; TEIXEIRA, V. A. P; BRAGA, L. G. S. e. Relação entre saneamento básico e a saúde pública. **Rede de Ensino Doctum-Dom Orione**, 2023. Disponível em: <https://dspace.doctum.edu.br/handle/123456789/4608?mode=full>. Acesso em: 21 jun. 2024.

MONARD, M. C; BARANAUSKAS, J. A. Conceitos sobre Aprendizado de Máquina. *In*: REZENDE, Solange Oliveira *et al.* **Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações**. Barueri: Manole, 2022. cap. 4, p. 39-56. ISBN 98520416837.

NOVAIS, D. B. B.; MELO, F. M.; SANTOS, M. X.; ABREU, J. A. de. Monitoramento dos vazamentos não visíveis com o uso de haste de escuta e o controle de perdas em um sistema de distribuição de água. **XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Sergipe, 2023. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15439>. Acesso em: 8 jul. 2024.

PAGANO, A.; GARLISI, D.; GIULIANO, F.; CATTAL, T.; CUOMO, F. SWI-FEED: Smart Water IoT Framework for Evaluation of Energy and Data in Massive Scenarios. **IFIP/IEEE Networking 2024 - The International Federation for Information Processing Networking**, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2404.07692>. Acesso em: 28 jul. 2024.

PAZ, M. G. A. da; FRACALANZA, A. P.; ALVES, E. M.; SILVA, F. J. R. da. Os conflitos das políticas da água e do esgotamento sanitário: que universalização buscamos?. **Estudos Avançados**, v. 35, n. 102, p. 193-208, 2021. DOI: 10.1590/s0103-4014.2021.35102.012. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/190302>. Acesso em: 29 jun. 2023.

PENTEADO, T. B; BRANCHI, B. A. Água e Saneamento Básico: Os direitos humanos para o desenvolvimento sustentável. **Interfaces Científicas: Fluxo Contínuo**, Aracaju, v. 10, ed. 1, p. 414-427, 2023. DOI 10.17564/2316-3801.2023v10n1p414-427. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/humanas/article/view/11393/5402>. Acesso em: 22 jun. 2024.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **O tutorial de Python**. 2023. Disponível em: <https://docs.python.org/pt-br/3/tutorial/index.html>. Acesso em: 3 ago. 2023.

PORTO, R. de M. Redes de distribuição de água. *In*: PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos, SP: EESC - USP, 2006. cap. 6, p. 169-188. ISBN 85-7656-084-4.

RANKING coloca USP como melhor universidade da América Latina e entre top 100 do mundo. *In*: **CNN BRASIL**. [S. l.], 27 jun. 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/ranking-coloca-usp-como-melhor-universidade-da-america-latina-e-entre-top-100-do-mundo/>. Acesso em: 17 jul. 2024.

RIBEIRO, V. B. **Um estudo bibliográfico de revisão sistemática sobre realidade virtual na educação**. 2023. x, 31 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Computação) — Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

ROBINSON, B.; COHEN, J. S.; HERMAN, J. D. Detecting early warning signals of long-term water supply vulnerability using machine learning. **Environmental Modelling & Software**, v. 131, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104781>. Acesso em: 29 jul. 2024.

ROPELE, N. C. Afinal, colocar cloro na água durante o tratamento é uma boa opção?. **Saneamento em Pauta**, 2019. Disponível em: <https://blog.brkambiental.com.br/cloro-na-agua/>. Acesso em: 8 jun. 2023.

SALVINO, M. M.; CARVALHO, P. S. O. de; GOMES, H. P. Calibração multivariada de redes de abastecimento de água via algoritmo genético multiobjetivo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 503-512, Set. 2015. DOI 10.1590/S1413-41522015020000099484v. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/hMZS6stNHG47bt3rzcyYcvp/?lang=pt>. Acesso em: 28 jul. 2023.

SAMPAIO, A. S.; ARAÚJO, J. K. de. Avaliação dos parâmetros de calibração do algoritmo genético na detecção de vazamentos em rede de distribuição de água utilizando o método transiente inverso. **Revista DAE**, v. 67, n. 219, p. 159-175, 2019. DOI 10.4322/dae.2019.051. Disponível em: <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/dae.2019.051>. Acesso em: 26 jul. 2023.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Abastecimento de Água**. Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/>. Acesso em: 24 jul. 2023.

SOARES, S. S.; ARRUDA, P. N.; LOBÓN, G. S.; SCALIZE, P. S. Evaluation of methods for determination free available chlorine in public water supply. **Semin., Ciênc. Exatas Tecnol.**, v. 37, n. 1, p. 119–130, 2016. DOI: 10.5433/1679-0375.2016v37n1p119. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/view/21599>. Acesso em: 23 jun. 2023.

TONACO, L. Água, Estado e Inteligência: interseções, conflitos e desafios globais. In: FNU - FEDERAÇÃO NACIONAL DOS URBANITÁRIOS. **Água e Saneamento**. Minas Gerais, 19 fev. 2024. Disponível em: <https://www.fnucut.org.br/43704/agua-estado-e-inteligencia-intersecoes-conflitos-e-desafios-globais/#:~:text=A%20%C3%A1gua%20desempenha%20um%20papel,das%20economias%20nacionais%20e%20globais>. Acesso em: 11 jul. 2024.

UNESCO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA; MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. CNE - Conselho Nacional de Educação. **Desafios e perspectivas da educação superior brasileira para a próxima década**. 2012. 164 p. ISBN 978-85-7652-171-6.

UNESCO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA; Programa Mundial de Avaliação da Água da UNESCO. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos 2019: não deixar ninguém para trás, fatos e dados**. 2019. 11 p. Disponível em:

https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367276_por/PDF/367276por.pdf.multi. Acesso em: 14 jun. 2023.

UNESCO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA; Programa Mundial de Avaliação da Água da UNESCO. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos 2021: o valor da água; fatos e dados**. 2021. 11 p. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_por Acesso em: 11 jul. 2024.

UNGA - United Nations General Assembly. Human Right to Water and Sanitation Geneva: UNGA; 2010. UN Document A/RES/64/292.

UFPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA. LENHS - Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento. **EPANET**. 12 set. 2020. Disponível em: <http://ct.ufpb.br/lenhs/contents/menu/assuntos/epanet>. Acesso em: 7 jul. 2023.

WALSKI, T. M. Technique for Calibrating Network Models. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. Health and sustainable development - Housing and health - Housing and health risks - Waterborne disease related to unsafe water and sanitation, 2019a.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION; UNICEF - UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2017: Special focus on inequalities**. New York, 2019b. 140 p. ISBN 978-92-415-1623-5.

4 ARTIGO I: DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA MONITORAMENTO E CONTROLE DE VAZAMENTOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Resumo: A redução de perdas de água em Sistemas de Distribuição de Água (SDA) é fundamental para a segurança hídrica global. Este estudo propõe um modelo computacional integrado para a localização precisa de vazamentos, utilizando o monitoramento rotineiro de dados de pressão. A metodologia empregou uma estrutura de Aprendizado de Máquina (ML) Supervisionado acoplada a simulações hidráulicas via EPANET 2.0. Padrões de pressão indicativos de vazamentos foram gerados através da calibração de desvios de consumo da rede em diversos cenários de demanda, utilizando duas configurações distintas de rede. A Regressão Linear foi identificada como o algoritmo de melhor desempenho, evidenciado por valores ótimos de Erro Quadrático Médio (MSE) e Coeficiente de Determinação (R^2). Os resultados estabeleceram que a acurácia do modelo é altamente sensível ao limite percentual de consumo, exigindo calibração específica por rede para minimizar efetivamente as indicações de falsos positivos. O modelo resultante oferece uma ferramenta de diagnóstico complementar acessível e replicável para a gestão operacional, reduzindo significativamente os esforços de busca em campo e aumentando a eficiência e a resiliência dos SDA.

Palavras-chave: Detecção de Vazamentos; Aprendizado de Máquina Supervisionado; EPANET; Calibração Hidráulica; Gestão de Perdas de Água.

Abstract: Water loss reduction in Water Distribution Systems (WDS) is critical for global water security. This study proposes an integrated computational model for precise leak localization, leveraging routine pressure data monitoring. The methodology employed a Supervised Machine Learning (ML) framework coupled with hydraulic simulations via EPANET 2.0. Leak-indicative pressure patterns were generated by calibrating network consumption deviations across various demand scenarios, utilizing two distinct network configurations. Linear Regression was identified as the top-performing algorithm, evidenced by optimal Mean Squared Error

(MSE) and Coefficient of Determination (R^2) values. The results established that model accuracy is highly sensitive to the consumption percentile threshold, requiring specific calibration per network to effectively minimize false-positive indications. The resulting model offers an accessible and replicable complementary diagnostic tool for operational management, significantly reducing field search efforts and enhancing the efficiency and resilience of WDS.

Keywords: Leak Detection; Supervised Machine Learning; EPANET; Hydraulic Calibration; Water Loss Management.

4.1 INTRODUÇÃO

Nas sociedades contemporâneas, os sistemas de distribuição de água desempenham um papel essencial ao garantir o fornecimento contínuo e eficiente desse recurso vital, atendendo às demandas básicas da população com agilidade e comodidade (Bezerra, Castro e Araújo, 2017). Apesar dessa importância, dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SINISA, 2024) indicam que aproximadamente 39,9% da água potável distribuída no Brasil é perdida ao longo do sistema de abastecimento ou consumida sem medição.

As perdas de água ao longo dos sistemas de abastecimento representam um desafio vital para o meio ambiente e a sustentabilidade, uma vez que o desperdício de recursos hídricos implica no consumo desnecessário de energia, no aumento das emissões de gases de efeito estufa e na degradação de ecossistemas aquáticos (Lehtoranta; Laukka; Silvennoinen, 2025).

Em áreas onde o recurso já é escasso, essas perdas intensificam a exploração de aquíferos e mananciais, comprometendo a qualidade da água e reduzindo a resiliência dos ecossistemas frente às mudanças climáticas (AbuEltayef; AbuAlhin; Alastal, 2023). Esse cenário evidencia a necessidade de aprimorar os métodos de monitoramento e controle de perdas nos sistemas de abastecimento (Taloma et al., 2025).

Nesse contexto, reduzir perdas hídricas não é apenas uma medida de eficiência operacional: é uma estratégia essencial para assegurar o uso racional dos

recursos, proteger habitats naturais e promover um ciclo hídrico mais sustentável e equilibrado.

Entre as estratégias adotadas, a calibração hidráulica tem se destacado como uma ferramenta essencial para ajustar modelos computacionais às condições reais da rede (Leinæs; Simukonda; Farmani, 2024). Inicialmente realizada por meio de métodos empíricos, baseados em tentativa e erro, a calibração evoluiu com a incorporação de algoritmos de otimização, que permitiram maior precisão e eficiência na representação dos parâmetros hidráulicos (Shoarinezhad et al., 2023). Com a crescente complexidade das redes e a disponibilidade de dados em tempo real, esse processo tornou-se ainda mais relevante, permitindo a integração entre dados de sensores e simulações dinâmicas, aumentando a acurácia das decisões operacionais (Shiu; Chung; Chiang, 2024)

Além disso, a calibração bem executada é fundamental para o desempenho de técnicas modernas de detecção de anomalias, como vazamentos (Zanfei et al., 2023), pois fornece uma base confiável para comparação de padrões hidráulicos simulados e observados (Shi et al., 2024). A tendência atual aponta para o uso de tecnologias que combinam dados operacionais, como pressão e vazão, com métodos computacionais avançados (Lima et al., 2018).

No que se trata de modelagem hidráulica, observa-se destaque para o software desenvolvido pela U. S. *Environmental Protection Agency* (USEPA) o EPANET 2.0, frequentemente utilizado por pesquisadores de diversas partes do mundo, como pode ser visto nos trabalhos dos autores Ciraane et al. (2022), Safitri; Wahyudi; Soedarsono, (2023) e Li; Pan, (2024). Atendendo de maneira ampla e relevante no avanço tecnológico para o progresso dos sistemas de abastecimento de água, sobretudo pela disponibilidade gratuita e interface otimizada, tornando as elaborações e simulações acessíveis.

De acordo com Jayakumar, Bouhoula e Al-Zubari (2024), a incorporação de técnicas de inteligência artificial (IA) no contexto do gerenciamento de recursos hídricos revela um potencial expressivo para a promoção de práticas mais eficientes e sustentáveis.

Estudos recentes, como os de Ávila et al. (2022), Silva; Goulart; Barros (2018), Diaz-Ortiz et al. (2023), Zaman et al. (2022) e Moreira; Villanueva; Gomes (2025) apontam uma tendência no uso de simulações computacionais combinadas com algoritmos de aprendizado para aprimorar os processos de calibração e detecção de vazamentos. No campo interdisciplinar, autores como, Liu et al. (2024), Świątochowski et al. (2023) e Dadebo et al. (2023) destacam a integração entre técnicas de modelagem hidráulica e inteligência computacional, contribuindo para uma gestão mais eficiente das redes de distribuição.

A biblioteca *Scikit-learn*, desenvolvida em Python, destaca-se por disponibilizar uma ampla variedade de algoritmos de aprendizado supervisionado e não supervisionado, além de ferramentas para pré-processamento de dados, seleção de variáveis e avaliação de modelos. Sua relevância está associada à ampla adoção na ciência de dados, pesquisa acadêmica e aplicações industriais, resultado de sua facilidade de uso, robustez e eficiência computacional. Trabalhos como os de Meleshko, Desnitsky e Kotenko (2020), Kadinski et al. (2022) e Robinson, Cohen e Herman (2020) evidenciam a importância da *Scikit-learn*, aplicando-a em estudos voltados a sistemas de abastecimento de água.

Diante desse panorama, este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo computacional voltado para a identificação de perdas de água em redes de distribuição, com base na análise de medições de pressão. A proposta busca explorar a relação entre variações de pressão ao longo da rede e a presença de vazamentos, oferecendo uma alternativa eficaz aos métodos tradicionais de detecção. Ao utilizar dados rotineiramente monitorados nos sistemas de abastecimento, com auxílio do modelador hidráulico EPANET, o modelo visa aprimorar a gestão operacional e contribuir para a redução das perdas no sistema.

4.2 METODOLOGIA

Foi desenvolvido um código computacional voltado à detecção de vazamentos em redes de abastecimento de água, fundamentado na calibração dos consumos da rede. O modelo utiliza como dados de entrada as pressões aferidas em pontos de monitoramento, de modo a estabelecer a relação entre as variáveis hidráulicas e os

desvios de consumo. Essa estratégia permite identificar discrepâncias associadas à ocorrência de perdas.

Para a implementação do método, empregou-se aprendizado de máquina na modalidade supervisionada. Foram adotadas duas configurações de rede: a primeira destinada à etapa de concepção do modelo e execução dos testes preliminares, e a segunda utilizada para ampliar a análise e validar a aplicabilidade da abordagem em cenários mais complexos.

4.2.1 REDES DE ABASTECIMENTO

No desenvolvimento do estudo foi necessário a aplicação de redes de abastecimento de água genéricas para as devidas simulações. Foi elaborada uma rede base fictícia para os testes iniciais e adotada uma rede de maior proporção para testes posteriores.

A rede que será utilizada como base no estudo, possui configuração de rede malhada, que conta com 15 nós, 23 trechos e um reservatório, apresentada na Figura 1.

O dimensionamento levou em consideração as seguintes restrições hidráulicas e exigências para a rede pública de abastecimento de água, seguindo a como ordem de prioridade, pressão mínima 10 mca, diâmetro mínimo 54,6mm, perda de carga unitária máxima de 10m/km e velocidade mínima de 0,4 m/s. O cálculo da perda de carga distribuída foi feito pela Fórmula Universal (ou Fórmula de Darcy-Weisbach), as características da rede são apresentadas nas tabelas 1 com especificações dos nós e 2 dos trechos.

Figura 1- Rede base fictícia.

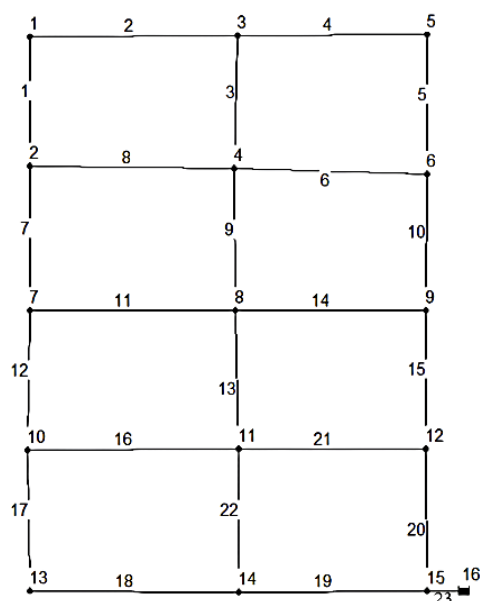


Tabela 1. Tabela da rede - Nós

Tabela da Rede - Nós				
Nós	Elevação m	Demanda LPS	Carga hidráulica m	Pressão m
Nó 1	85.05	0.713963	100.46	15.41
Nó 2	85.035	1.013428	100.47	15.43
Nó 3	85.542	1.125079	100.58	15.03
Nó 4	87.128	1.424084	100.7	13.57
Nó 5	86.174	0.699361	100.85	14.67
Nó 6	88.022	0.992559	100.94	12.92
Nó 7	85.047	1.035664	100.5	15.46
Nó 8	87.933	1.431517	100.83	12.9
Nó 9	89.22	0.98352	101.15	11.93
Nó 10	86.066	1.038406	100.54	14.48
Nó 11	87.846	1.43926	100.91	13.06
Nó 12	89.972	0.991574	101.21	11.24
Nó 13	87.05	0.73942	100.58	13.53
Nó 14	87.556	1.144904	100.98	13.42
Nó 15	89.972	0.852263	101.33	11.36
RNF 16	101.379	#N/A	101.38	0

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 2. Tabela da Rede - Trechos

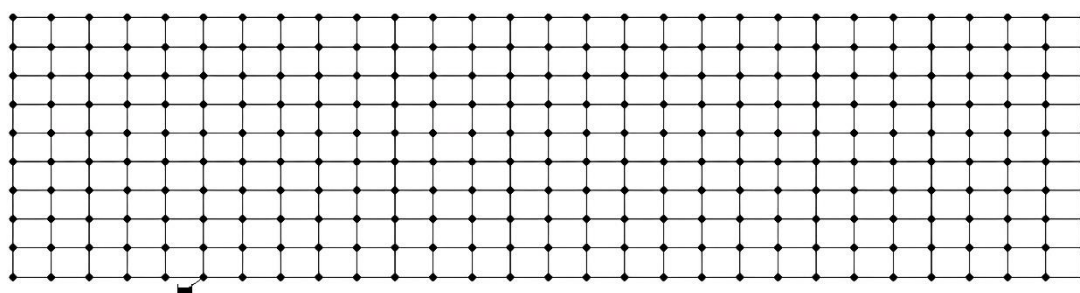
Tabela da Rede - Trechos						
Trecho	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade mm	Vazão LPS	Velocidade m/s	Perda de Carga m/km
Tubulação 23	11.9201	156.4	0.06	15.63	0.81	4.16
Tubulação 22	47.81	54.6	0.06	0.52	0.22	1.44
Tubulação 21	63.3601	77.2	0.06	2.54	0.54	4.72
Tubulação 20	47.8413	156.4	0.06	12	0.62	2.55
Tubulação 19	63.7101	77.2	0.06	2.77	0.59	5.52
Tubulação 18	70.3607	54.6	0.06	1.11	0.47	5.65
Tubulação 17	47.1045	54.6	0.06	0.37	0.16	0.78
Tubulação 16	71.0111	54.6	0.06	1.05	0.45	5.15
Tubulação 15	46.3212	156.4	0.06	8.47	0.44	1.34
Tubulação 14	64.05	77.2	0.06	2.6	0.56	4.93
Tubulação 13	46.4614	54.6	0.06	0.57	0.24	1.7
Tubulação 12	46.8468	54.6	0.06	0.38	0.16	0.83
Tubulação 11	69.18	54.6	0.06	1	0.43	4.71
Tubulação 10	45.872	100	0.06	4.88	0.62	4.39
Tubulação 9	47.7212	54.6	0.06	0.74	0.32	2.73
Tubulação 8	68.8444	54.6	0.06	0.83	0.35	3.33
Tubulação 7	48.5	54.6	0.06	0.34	0.15	0.7
Tubulação 6	64.8464	77.2	0.06	2.25	0.48	3.78
Tubulação 5	46.9607	77.2	0.06	1.64	0.35	2.11
Tubulação 4	64.1407	54.6	0.06	0.94	0.4	4.19
Tubulação 3	44.8196	54.6	0.06	0.74	0.32	2.75

Tubulação 2	69.771	54.6	0.06	0.56	0.24	1.64
Tubulação 1	43.65	54.6	0.06	0.16	0.07	0.17

Fonte: Autora, 2023.

Como forma de ampliar e verificar o alcance do modelo computacional, foi adotada para testes a rede de distribuição apresentada por Bezerra (2018), denominada “Rede MIGHA”, desenvolvida e utilizada para a calibração de rugosidades através do método de mesmo nome da rede, no entanto, não houve calibração realizada para busca de vazamentos na rede. Apresentada na Figura 2, a rede possui 542 trechos, 290 nós e um reservatório. Dentre as características da rede, os diâmetros dos trechos variam de 54,6mm a 252mm e cotas topográficas variando entre 192,36m e 235,67m

Figura 2-Rede MIGHA



Fonte: Bezerra, 2018.

Como ferramenta base para análise e simulação hidráulica das redes utilizadas para estudo foi utilizado o programa EPANET 2.0. A escolha do *software* Epanet se dá a partir da boa aceitação e frequente utilização no meio acadêmico, como mostrado por autores como González e Ponce (2022), Pagano et al. (2024) e Corrêa et al. (2023).

4.2.2 MODELO COMPUTACIONAL

No desenvolvimento do modelo, elaborou-se uma rotina computacional em linguagem Python, com suporte de suas principais bibliotecas. Essa rotina foi associada ao simulador hidráulico EPANET, possibilitando a simulação do comportamento da rede sob diferentes condições operacionais. A partir das pressões

conhecidas nos pontos da rede, o sistema foi projetado para detectar padrões indicativos de perdas de água, permitindo a identificação de ocorrência de vazamentos.

Destacam-se entre as bibliotecas utilizadas na escrita do modelo, a EPANETTOOLS que fornece uma interface para interagir com o software de simulação de redes de água EPANET 2.0. Reiteradamente aplicada entre autores que utilizam o software Epanet como González e Ponce (2022), Pagano et al. (2024) e Corrêa et al. (2023) e a biblioteca *Scikit-learn* voltada ao aprendizado de máquina.

O desenvolvimento do algoritmo tem seu funcionamento baseado em uma sequência lógica de comandos que com auxílio da biblioteca Epanettools extrai informações de simulação hidráulica da rede em estudo de forma simultânea com a execução do código. Com a identificação dos trechos e nós da rede e a demanda e pressão dos mesmos, estes definem o intervalo para a geração de demandas aleatórias, onde o valor mínimo é de $1/3$ da vazão média da rede e o valor máximo o dobro da vazão média da rede, garantindo que as demandas geradas estejam dentro de um intervalo plausível para a capacidade da rede e o Epanet calcula os valores de pressão para esses pontos.

Esses valores são armazenados em uma variável em formato de banco de dados, com 1000 variações, que é utilizado como entrada para o treinamento nos modelos de aprendizagem de máquina, para que os mesmos identifiquem o padrão de variação, sendo capaz de apontar, consumos maiores que os medidos pela companhia, indicando possíveis vazamentos.

Com essa programação um novo banco é gerado para cada rede, tornando-o mais preciso, uma vez que ele se ajusta ao padrão de cada rede em estudo. Foram utilizados os 3 modelos de aprendizado supervisionado disponibilizados na biblioteca *Scikit-learn*, para testar qual se ajustaria melhor aos dados das redes, sendo eles: Random Forest Regressor, Decision Tree Regressor e Linear Regression.

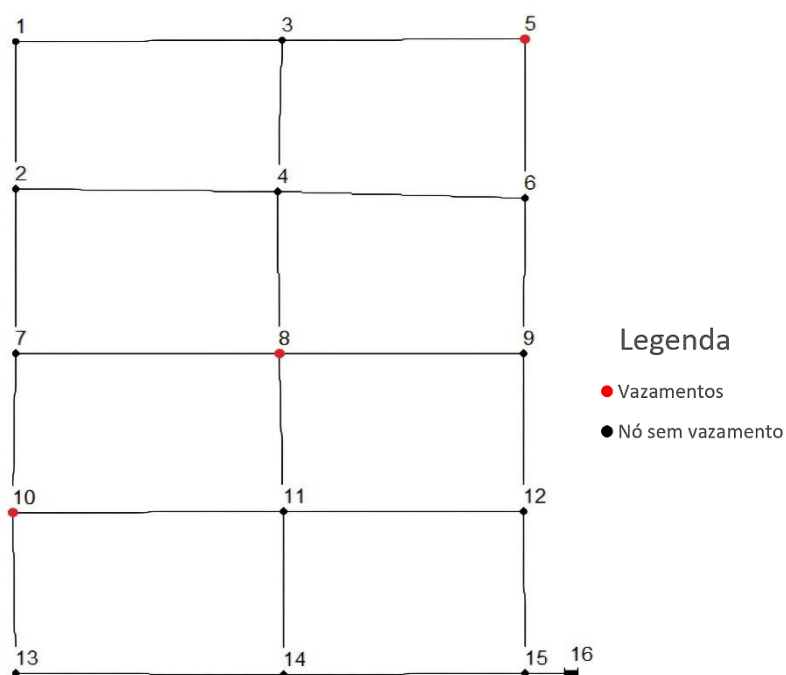
Como forma de avaliação são utilizadas as métricas de Erro quadrático médio (MSE) e coeficiente de determinação R^2 . Onde o primeiro mede a diferença média ao quadrado entre os valores reais e os valores previstos pelo modelo, no qual quanto menor o MSE, melhor o desempenho do modelo. E o segundo, mede a proporção da

variância dos dados que é explicada pelo modelo, indo de $-\infty$ a 1, quanto mais próximo a 1 melhor o desempenho. Entre os 3 modelos testados o que teve melhor desempenho dentro desses parâmetros foi adotado.

Para realizar as simulações foram inseridos pontos com vazões que representam os vazamentos nas redes. Esses pontos são inseridos em locais distintos e com acréscimos nos valores de vazões diferentes para uma verificação mais precisa da eficiência do modelo. Os valores e locais dos pontos nas redes podem ser observados nas figuras 3 e 4.

Na rede base, foram inseridos 3 pontos de vazamentos no nós 5 com acréscimo de 0,2 l/s, no nó 8 com acréscimo de 0,4 l/s e no nó 10 com acréscimo de 0,6 l/s.

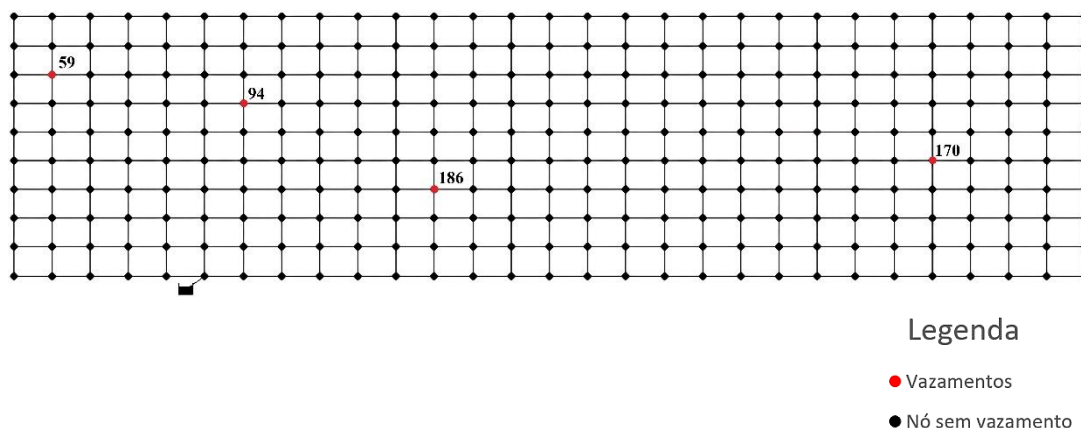
Figura 3- Rede Base - Pontos com inserção de vazamentos



Fonte: Autora, 2023.

Na rede MIGHA, foram inseridos 4 pontos de vazamentos, nos nós 59 com acréscimo de 0,3 l/s, no nó 94 com acréscimo de 0,6 l/s, no nó 170 com acréscimo de 0,8 l/s e no nó 186 com acréscimo de 0,4 l/s.

Figura 4- Rede MIGHA - Pontos com inserção de vazamentos



Fonte: Autora, 2023.

Visto que, haverá normalmente uma variação nos valores por se tratar de uma previsão, define-se um “limite de vazamento” que determina se a diferença do valor previsto quando comparado com o esperado se trata de um vazamento ou não, e o modelo alerta sobre a presença do vazamento e indica o nó detectado. Esse limite é definido por uma porcentagem com base na média dos consumos da rede e pode ser ajustado pelo usuário do modelo de forma que melhor se adapte à rede em estudo.

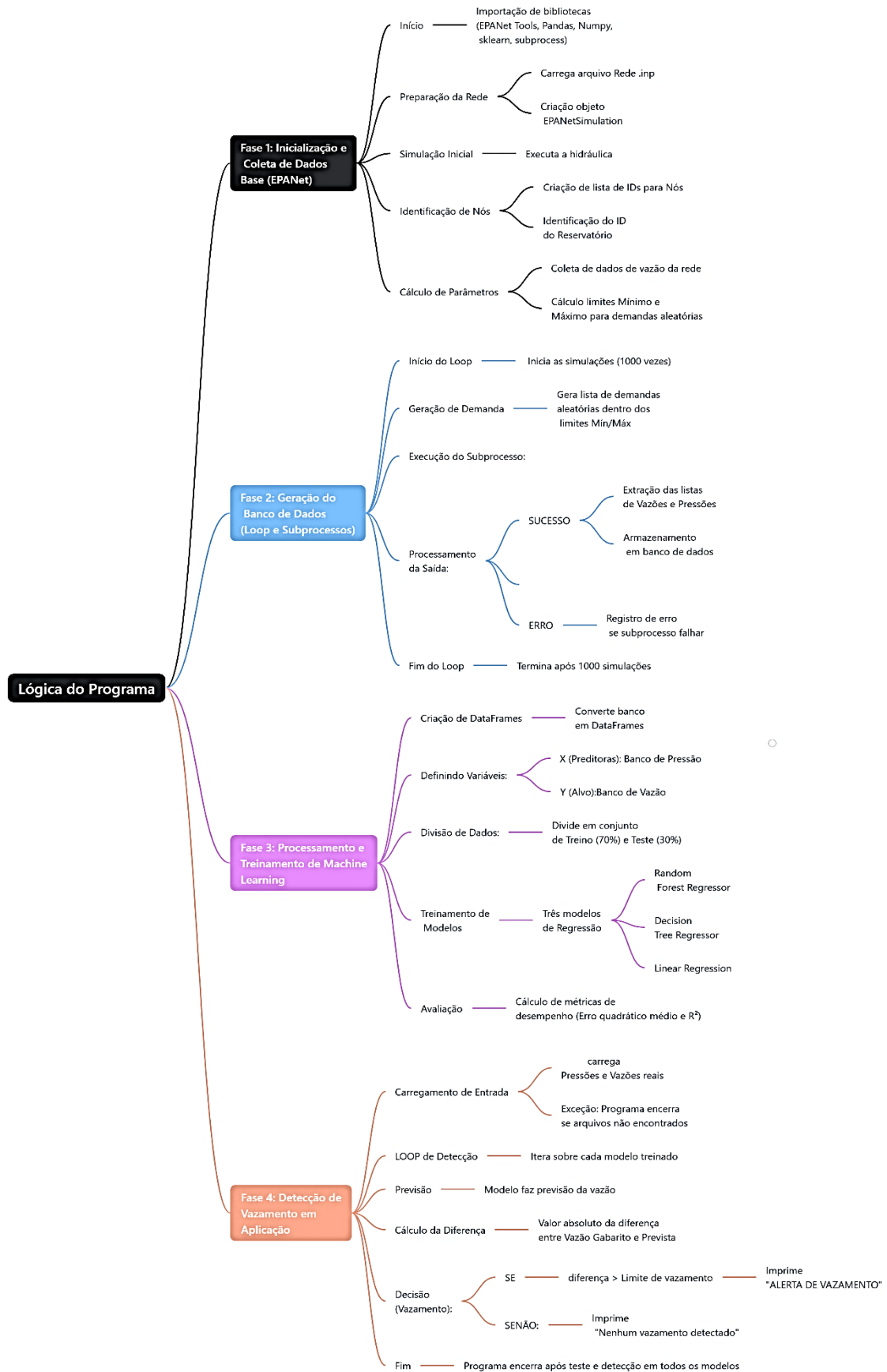
Mediante a inserção desses pontos foram realizadas as simulações com valores diferentes de “limite de vazamento” onde observou-se as previsões de variações de vazão e detecção de vazamentos. Visto que, a metodologia desenvolvida sempre dará resultados aproximados, porém diferentes, optou-se por realizar a simulação mais de uma vez com os mesmos dados e convergir os resultados.

Para verificação são realizados testes controlados, no qual tem-se as informações conhecidas e as esperadas. Com os dados de entrada de pressão, no caso de redes reais, medidos em campo, o modelo prevê as vazões estimadas e compara com as reais/gabarito que as companhias de saneamento possuem. Esse processo está apresentado no fluxograma da Figura 5.

Para cada rede foi realizada a mesma simulação 2 vezes para cada valor. Dessa forma, na rede base foram executadas 6 simulações, com os valores “limite de vazamento” de 100%, 50% e 10% do valor médio de consumo da rede. Enquanto que na rede MIGHA executou-se 10 simulações, com os “limites de vazamento” sendo eles 100%, 95%, 90%, 80% e 50% do valor médio de consumo da rede. Ou seja, se a

diferença entre o consumo encontrado na calibração e o valor gabarito (Consumo medido pela companhia de saneamento) for maior que o “limite de vazamento” é considerado um vazamento neste nó.

Figura 6- Fluxograma de funcionamento do modelo computacional



Fonte: Autora, 2024.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na calibração das duas redes, foi criado um banco de dados para as redes, e os resultados para cada um dos três modelos de aprendizado foram obtidos a partir da execução, conforme mostrado nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3- Métricas de desempenho de cada modelo de aprendizado treinado para rede MIGHA

Modelos de aprendizado supervisionado			
Erros	Random Forest	Árvore de Decisão	Regressão Linear
Erro quadrático médio	0.01192	0.02321	0.00128
coeficiente de determinação R^2	0.01631	-0.98079	0.88977

Fonte: Autora, 2024.

Tabela 4- Métricas de desempenho de cada modelo de aprendizado treinado para rede Base

Modelos de aprendizado supervisionado			
Erros	Random Forest	Árvore de Decisão	Regressão Linear
Erro quadrático médio	0.01192	0.02321	0.00128
coeficiente de determinação R^2	0.01631	-0.98079	0.88977

Fonte: Autora, 2024.

Mediante as informações apontadas anteriormente sobre as métricas e com os resultados apresentados, o modelo de regressão linear possui o melhor ajuste aos dados, uma vez que seus valores em ambos os métodos apresentaram resultados mais satisfatórios com R^2 mais próximo de 1 e MSE mais próximo de 0.

Para as simulações executadas na rede base, observou-se que com o valor de limite de vazamento estabelecido em 100% do valor médio de consumo da rede em condições “reais”, que corresponde a 1.01l/s, não foram identificados possíveis vazamentos em ambas as simulações. Isso era esperado do modelo, uma

vez que o valor “limite de vazamento” se encontra muito acima dos vazamentos inseridos na rede.

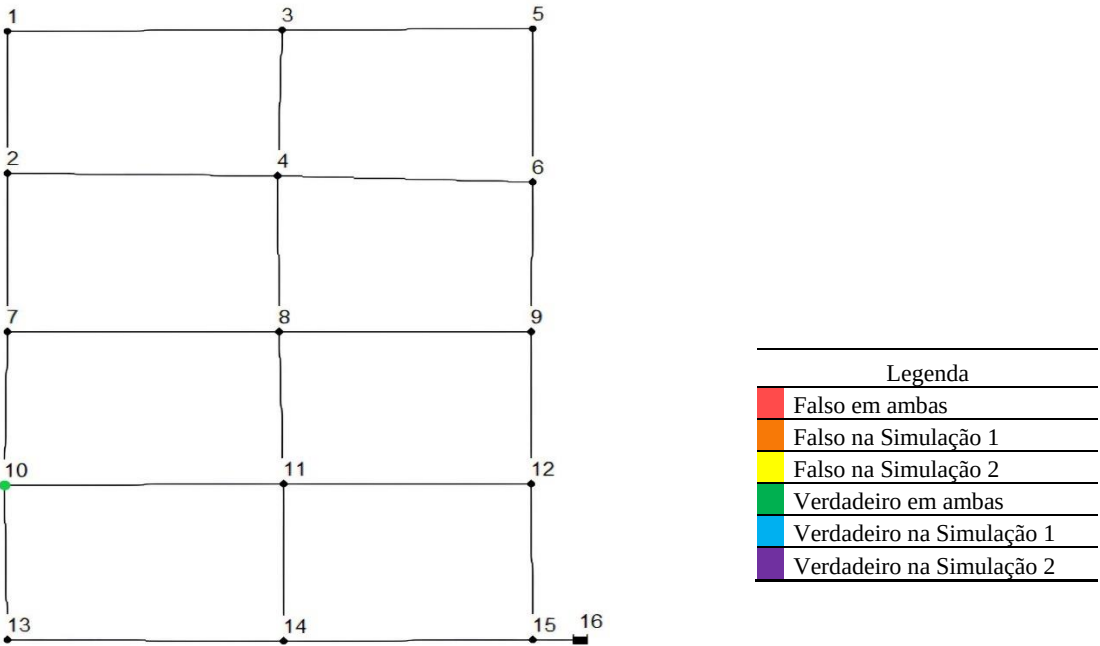
Nas simulações realizadas com o valor “limite de vazamento” estabelecida em 50% resultando em 0.505l/s, foi identificado apenas 1 alerta de vazamento no nó 10 em ambas as simulações, que indica um vazamento real. O que era esperado, visto que os valores dos outros vazamentos inseridos se encontram abaixo do valor “limite”. Os dados podem ser observados na tabela 5 e Figura 6.

Tabela 5 - Vazamentos identificados com limite em 50%

Alertas de vazamentos - 50% (Limite: 0.505)						
			Simulação 1		Simulação 2	
Nó	Gabarito	Vazamento inserido	Demanda encontrada	Diferença absoluta	Demanda encontrada	Diferença absoluta
10	1.04	0.6	1.5820	0.542	1.5785	0.5385

Fonte: Autora, 2024.

Figura 6 - Distribuição de vazamentos identificados com limite a 50%.



Fonte: Autora, 2024.

Nas simulações realizadas com o valor “limite de vazamento” estabelecida em 10% resultando em 0.101l/s, foram identificados 4 vazamentos, dos quais 1 é falso

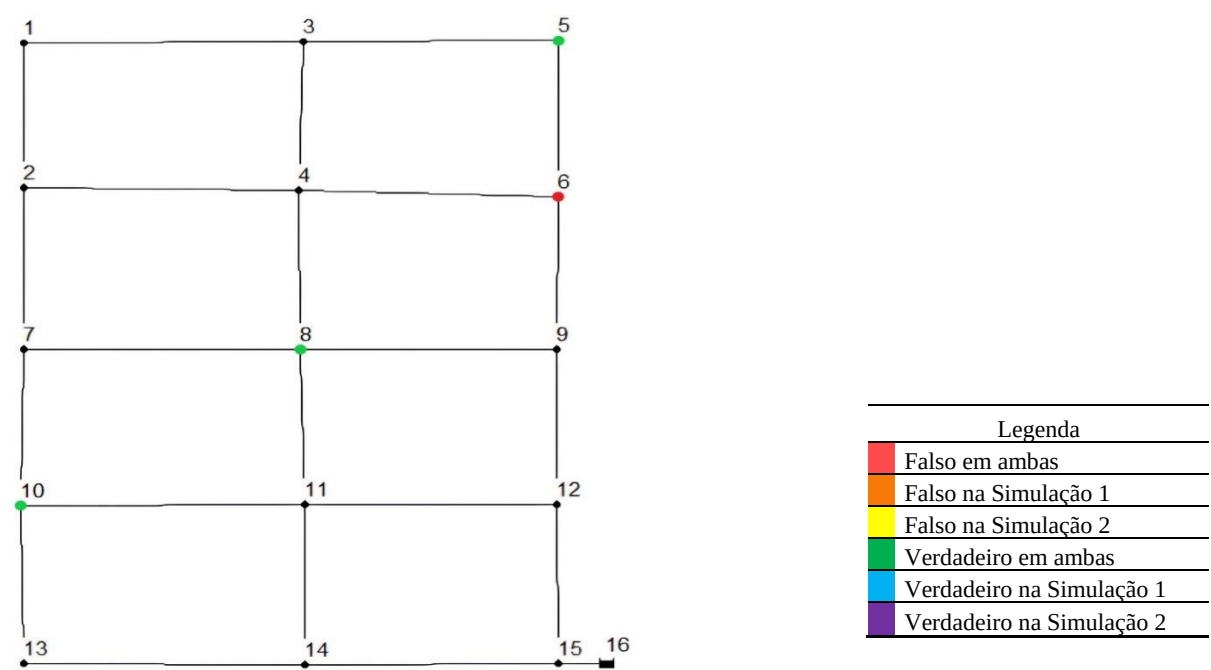
alerta apontado em ambas. Os 3 vazamentos reais foram identificados em ambas as simulações. Os dados podem ser observados na tabela 6 e Figura 7.

Tabela 6 - Vazamentos identificados com limite em 10%

Alertas de vazamentos - 10% (Limite: 0.101)						
			Simulação 1		Simulação 2	
Nó	Gabarito	Vazamento inserido	Demanda encontrada	Diferença absoluta	Demanda encontrada	Diferença absoluta
5	0.7	0.2	0.8537	0.1537	0.8388	0.1388
6	0.99	-	1.1524	0.1624	1.1584	0.1684
8	1.43	0.4	1.7949	0.3649	1.8058	0.3758
10	1.04	0.6	1.5916	0.5516	1.6173	0.5773

Fonte: Autora, 2024.

Figura 7 - Distribuição de vazamentos identificados com limite a 10%.

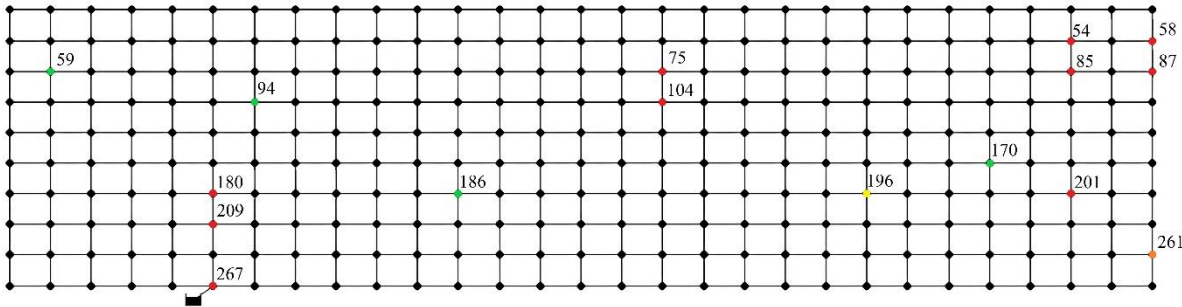


Fonte: Autora, 2024.

No caso da rede MIGHA, para as simulações realizadas com o valor de limite de vazamento estabelecido em 100% do valor médio de consumo da rede, que corresponde a 0.2193l/s, identificou-se 16 possíveis vazamentos, dos quais 4 são verdadeiros, e 12 são alertas falsos, sendo 1 deles encontrado apenas na simulação 1 e outro apenas na simulação 2. Na figura 8 é mostrada a distribuição dos

vazamentos apontados e na tabela 7 são descritos esses alertas e apontadas as diferenças entre o valor previsto e o valor do gabarito (medido pela companhia).

Figura 8 - Distribuição de vazamentos identificados com limite a 100%.



Legenda			
	Falso em ambas		Verdadeiro em ambas
	Falso na Simulação 1		Verdadeiro na Simulação 1
	Falso na Simulação 2		Verdadeiro na Simulação 2

Fonte: Autora, 2024.

Tabela 7- Vazamentos identificados com limite em 100%

Alertas de vazamentos - 100% (Limite: 0.2193)						
Nó	Gabarito	Vazamento inserido	Simulação 1		Simulação 2	
			Demanda encontrada	Diferença absoluta	Demanda encontrada	Diferença absoluta
54	0.09	-	-0.207215028	0.2972	-0.180794484	0.2708
58	0.1	-	-0.213934199	0.3139	-0.167601636	0.2676
59	0.583	0.3	0.899559505	0.3166	0.92198971	0.339
75	0.8	-	0.546754788	0.2532	0.561038909	0.239
85	0.9111	-	1.27224627	0.3611	1.220430333	0.3093
87	0.125	-	0.379167137	0.2542	0.406661445	0.2817
94	0.1583	0.6	0.672610737	0.5143	0.666464515	0.5082
104	0.2323	-	0.4939359	0.2616	0.474632257	0.2423
170	0.2483	0.8	1.162724025	0.9144	1.023436268	0.7751
180	0.2222	-	0.477814384	0.2556	0.47708826	0.2549
186	0.1313	0.4	0.487696426	0.3564	0.48190844	0.3506
196	0.2583	-		0.2402	0.018105722	0.2402
201	0.1183	-	-0.20712453	0.3254	-0.13998071	0.2583
209	0.2581	-	-0.039542924	0.2976	-0.038921419	0.297
261	0.1845	-	0.504832277	0.3203		
267	0.3337	-	0.950399675	0.6167	0.951184863	0.6175

Fonte: Autora, 2024.

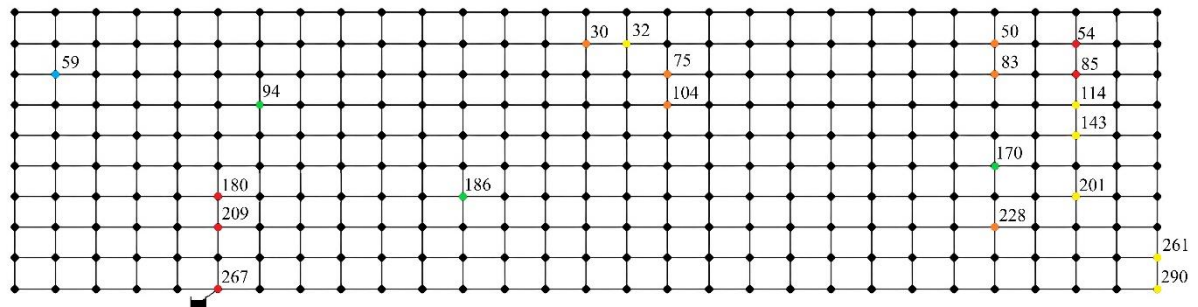
Nas simulações realizadas com o valor “limite de vazamento” estabelecida em 95%, resultando em 0.2083l/s, foram identificados 21 vazamentos, dos quais 17 são falsos alertas, sendo 5 apontados em ambas, 6 apenas na simulação 1 e 6 apenas na simulação 2. Os 4 vazamentos reais foram identificados, sendo 1 deles apenas na primeira simulação. Os dados podem ser observados na tabela 8 e Figura 9.

Tabela 8- Vazamentos identificados com limite em 95%

Alertas de Vazamentos - 95% (Limite: 0.208335)						
Nó	Gabarito	Simulação 1			Simulação 2	
		Vazamento inserido	Demanda encontrada	Diferença absoluta	Demanda encontrada	Diferença absoluta
30	0.6183	-	0.3994	0.2189	-	-
32	0.83	-	-	-	0.5988	0.2312
50	0.19	-	-0.0677	0.2577	-	-
54	0.09	-	-0.2244	0.3144	-0.1862	0.2762
59	0.583	0.3	0.8662	0.2832	-	-
75	0.8	-	0.5492	0.2508	-	-
83	0.13	-	0.4569	0.3269	-	-
85	0.9111	-	1.2133	0.3022	1.3200	0.4089
94	0.1583	0.6	0.6754	0.5171	0.6759	0.5176
104	0.2323	-	0.5063	0.274	-	-
114	0.2	-	-	-	-0.1312	0.3312
143	0.2582	-	-	-	0.5871	0.3289
170	0.2483	0.8	1.0788	0.8305	0.9651	0.7168
180	0.2222	-	0.4696	0.2474	0.4816	0.2594
186	0.1313	0.4	0.4807	0.3494	0.4790	0.3477
201	0.1183	-	-	-	-0.2013	0.3196
209	0.2581	-	-0.0435	0.3016	-0.0427	0.3008
228	0.1583	-	-0.0690	0.2273	-	-
261	0.1845	-	-	-	0.5237	0.3392
267	0.3337	-	0.9460	0.6123	0.9608	0.6271
290	0.1292	-	-	-	-0.1193	0.2485

Fonte: Autora, 2024.

Figura 9- Distribuição de vazamentos identificados com limite a 95%.



Legenda			
■	Falso em ambas	■	Verdadeiro em ambas
■	Falso na Simulação 1	■	Verdadeiro na Simulação 1
■	Falso na Simulação 2	■	Verdadeiro na Simulação 2

Fonte: Autora, 2024.

Nas simulações realizadas com o valor “limite de vazamento” estabelecida em 90%, resultando em 0.1973l/s, foram identificados 19 vazamentos, dos quais 15 são falsos alertas, sendo 8 identificados em ambas, 4 apenas na simulação 1 e 3 apenas na simulação 2 e 4 são vazamentos reais, dos quais 1 foi identificado apenas na simulação 1. Os dados podem ser observados na tabela 9 e Figura 10.

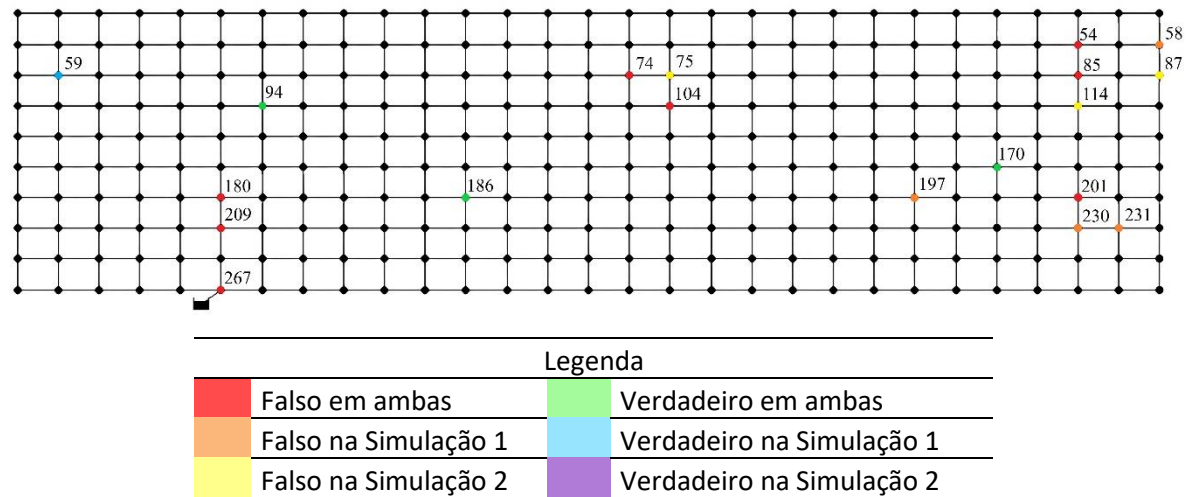
Tabela 2- Vazamentos identificados com limite em 90%.

Alertas de Vazamentos - 90% (Limite: 0.1973)						
Nó	Gabarito	Simulação 1			Simulação 2	
		Vazamento inserido	Demanda encontrada	Diferença absoluta	Demanda encontrada	Diferença absoluta
54	0.090	-	-0.1449	0.2349	-0.1473	0.2373
58	0.100	-	-0.1512	0.2512	-	-
59	0.583	0.3	0.9801	0.3971	-	-
74	0.160	-	0.3728	0.2128	0.3645	0.2045
75	0.800	-	-	-	0.5692	0.2308
85	0.911	-	1.1307	0.2196	1.2938	0.3827
87	0.125	-	-	-	0.3929	0.2679
94	0.158	0.6	0.6687	0.5104	0.6656	0.5073
104	0.232	-	0.4350	0.2027	0.4542	0.2219
114	0.200	-	-	-	-0.0299	0.2299
170	0.248	0.8	1.0621	0.8138	1.0491	0.8008
180	0.222	-	0.4796	0.2574	0.4759	0.2537
186	0.131	0.4	0.4797	0.3484	0.4881	0.3568
197	0.258	-	0.0068	0.2515	-	-
201	0.118	-	-0.1212	0.2395	-0.1030	0.2213

209	0.258	-	-0.0412	0.2993	-0.0366	0.2947
230	0.158	-	0.4576	0.2993	-	-
231	0.158	-	0.3945	0.2362	-	-
267	0.334		0.9545	0.6208	0.9576	0.9576

Fonte: Autora, 2024.

Figura 7- Distribuição de vazamentos identificados com limite a 90%.



Fonte: Autora, 2024.

Nas simulações realizadas com o valor “limite de vazamento” estabelecida em 80%, resultando em 0.1754l/s, foram identificados 30 vazamentos, dos quais 26 são falsos alertas, dos quais 9 foram identificados em ambas, 6 apenas na simulação 1 e 11 apenas na simulação 2. Os 4 vazamentos reais foram identificados em ambas as simulações. Os dados podem ser observados na tabela 10 e Figura 11.

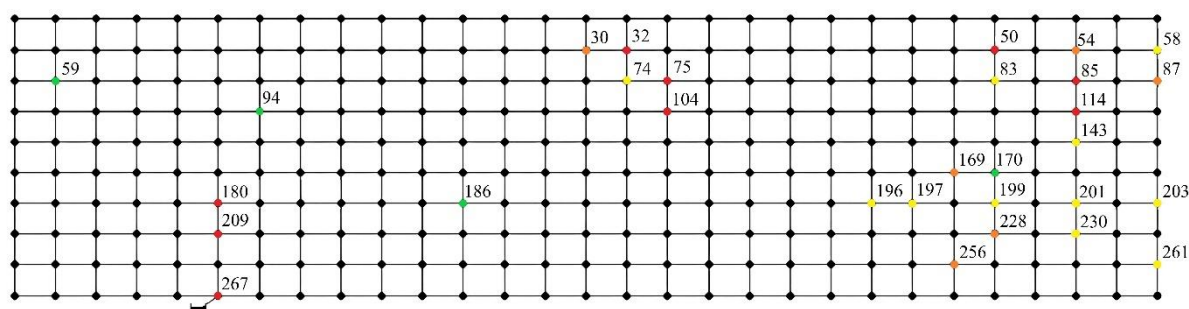
Tabela 30- Vazamentos identificados com limite em 80%.

Alertas de vazamentos - 80% (Limite: 0.1754)						
Nó	Gabarito	Simulação 1			Simulação 2	
		Vazamento inserido	Demanda encontrada	Diferença absoluta	Demanda encontrada	Diferença absoluta
30	0.6183	-	0.4085	0.2098	-	-
32	0.83	-	0.6463	0.1837	0.6339	0.1961
50	0.19	-	0.0021	0.1879	0.0133	0.1767
54	0.09	-	-0.2084	0.2984	-	-
58	0.1	-	-	-	-0.1009	0.2009
59	0.583	0.3	0.9351	0.3521	0.8609	0.2779
74	0.16	-	-	-	0.3638	0.2038
75	0.8	-	0.5313	0.2687	0.5895	0.2105
83	0.13	-	-	-	0.3384	0.2084
85	0.9111	-	1.2731	0.3620	1.2494	0.3383
87	0.125	-	0.3029	0.1779	-	-

94	0.1583	0.6	0.6730	0.5147	0.6697	0.5114
104	0.2323	-	0.4644	0.2321	0.4441	0.2118
114	0.2	-	-0.0149	0.2149	-0.0306	0.2306
143	0.2582	-	-	-	0.4606	0.2024
169	0.4583	-	0.2713	0.1870	-	-
170	0.2483	0.8	1.0140	0.7657	0.9816	0.7333
180	0.2222	-	0.4756	0.2534	0.4830	0.2608
186	0.1313	0.4	0.4824	0.3511	0.4817	0.3504
196	0.2583	-	-	-	0.0405	0.2178
197	0.2583	-	-	-	0.0678	0.1905
199	0.0183	-	-	-	0.2443	0.2260
201	0.1183	-	-	-	-0.0755	0.1938
203	0.1845	-	-	-	0.0085	0.1760
209	0.2581	-	-0.0387	0.2968	-0.0502	0.3083
228	0.1583	-	-0.0443	0.2026	-	-
230	0.1583	-	-	-	0.3506	0.1923
256	0.2513	-	0.4571	0.2058	-	-
261	0.1845	-	-	-	0.4366	0.2521
267	0.3337	-	0.9469	0.6132	0.9407	0.6070

Fonte: Autora, 2024.

Figura 81- Distribuição de vazamentos identificados com limite a 80%.



Legenda			
	Falso em ambas		Verdadeiro em ambas
	Falso na Simulação 1		Verdadeiro na Simulação 1
	Falso na Simulação 2		Verdadeiro na Simulação 2

Fonte: Autora, 2024.

Nas simulações realizadas com o valor “limite de vazamento” estabelecida em 50%, resultando em 0.1096l/s, foram identificados 65 vazamentos, dos quais 61 são falsos alertas, onde foram identificados 24 em ambas, 15 apenas na simulação 1 e 22 apenas na simulação 2. Os 4 vazamentos reais foram identificados em ambas as simulações. Os dados podem ser observados na tabela 11 e Figura 12.

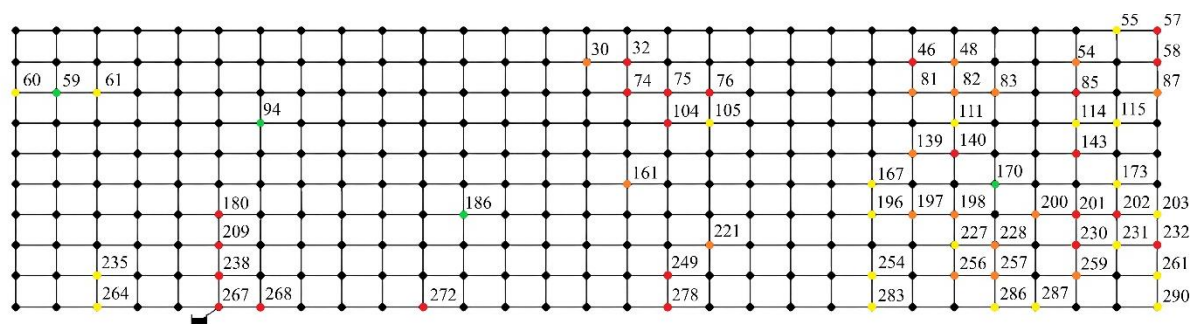
Tabela 41- Vazamentos identificados com limite em 50%.

Alertas de vazamentos - 50% (Limite: 0.1096)						
Nó	Gabarito	Simulação 1			Simulação 2	
		Vazamento inserido	Demanda encontrada	Diferença absoluta	Demanda encontrada	Diferença absoluta
30	0.6183		-	-	0.4653	0.1530
32	0.83		0.6521	0.1779	0.6069	0.2231
46	0.243		0.0768	0.1662	0.1202	0.1228
48	0.11		0.3537	0.2437	-	-
54	0.09		-0.2705	0.3605	-0.2619	0.3519
55	0.203		-	-	0.0803	0.1227
57	0.2		0.3495	0.1495	0.3196	0.1196
58	0.1		-0.1558	0.2558	-0.0512	0.1512
59	0.583	0.3	0.8320	0.2490	0.8588	0.2758
60	0.15		-	-	-0.0267	0.1767
61	0.25		-	-	0.4162	0.1662
74	0.16		0.4058	0.2458	0.3883	0.2283
75	0.8		0.5648	0.2352	0.6437	0.1563
76	0.2		0.3149	0.1149	0.4045	0.2045
81	0.19		0.3187	0.1287	-	-
82	0.21		0.0307	0.1793	-	-
83	0.13		0.2945	0.1645	-	-
85	0.9111		1.1850	0.2739	1.3056	0.3945
87	0.125		0.3912	0.2662	-	-
94	0.1583	0.6	0.6706	0.5123	0.6744	0.5161
104	0.2323		0.4551	0.2228	0.4695	0.2372
105	0.209		-	-	0.0681	0.1409
111	0.2583		-	-	0.1359	0.1224
114	0.2		-	-	0.0076	0.1924
115	0.2		-	-	0.3911	0.1911
139	0.2511		0.3707	0.1196	-	-
140	0.2583		0.4260	0.1677	0.4325	0.1742
143	0.2582		0.5036	0.2454	0.4754	0.2172
161	0.2573		0.1445	0.1128	-	-
167	0.2593		-	-	0.4140	0.1547
170	0.2483	0.8	0.9687	0.7204	1.0695	0.8212
173	0.4483		-	-	0.3025	0.1458
180	0.2222		0.4746	0.2524	0.4798	0.2576
186	0.1313	0.4	0.4806	0.3493	0.4830	0.3517
196	0.2583		-	-	0.0648	0.1935
197	0.2583		0.1302	0.1281	-	-
198	0.2583		-0.0205	0.2788	-	-
200	0.0183		-0.1200	0.1383	-	-
201	0.1183		-0.1296	0.2479	-0.1400	0.2583
202	0.1183		-0.0552	0.1735	-0.0347	0.1530
203	0.1845		-	-	0.0389	0.1456
209	0.2581		-0.0413	0.2994	-0.0402	0.2983

221	0	0.1212	0.1212	-	-
227	0.1583	-	-	0.0333	0.1250
228	0.1583	-0.0003	0.1586	-	-
230	0.1583	0.5097	0.3514	0.4217	0.2634
231	0.1583	-	-	0.3231	0.1648
232	0.1845	0.3113	0.1268	0.3056	0.1211
235	0.2583	-	-	0.4091	0.1508
238	0.2583	0.0950	0.1633	0.0992	0.1591
249	0.2583	0.1428	0.1155	0.0995	0.1588
254	0.2533	-	-	0.1371	0.1162
256	0.2513	0.4676	0.2163	-	-
257	0.183	0.3155	0.1325	-	-
259	0.6583	0.3443	0.3140	-	-
261	0.1845	-	-	0.4119	0.2274
264	0.203	-	-	0.0548	0.1482
267	0.3337	0.9467	0.6130	0.9596	0.6259
268	0.203	0.0368	0.1662	0.0371	0.1659
272	0.1	0.2210	0.1210	0.2178	0.1178
278	0.2	0.3217	0.1217	0.3650	0.1650
283	0.33	-	-	0.4840	0.1540
286	0	-	-	0.1503	0.1503
287	0.203	-	-	0.3417	0.1387
290	0.1292	-	-	-0.0945	0.2237

Fonte: Autora, 2024.

Figura 92- Distribuição de vazamentos identificados com limite a 50%.



Legenda			
■	Falso em ambas	■	Verdadeiro em ambas
■	Falso na Simulação 1	■	Verdadeiro na Simulação 1
■	Falso na Simulação 2	■	Verdadeiro na Simulação 2

Fonte: Autora, 2024.

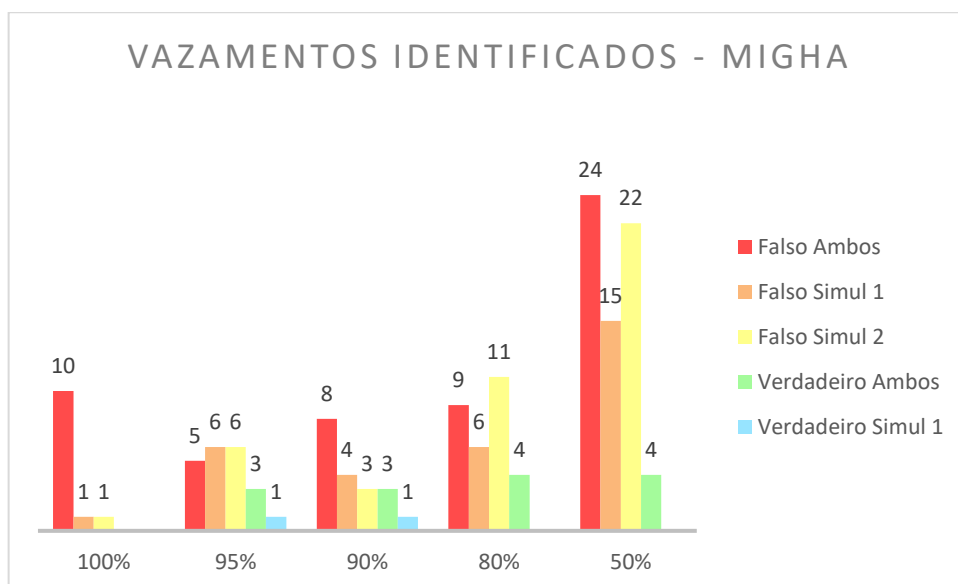
A aplicação de simulações com diferentes "limites de vazamento" se mostrou uma importante ferramenta, capaz de tornar o método aplicável a qualquer porte de rede, auxiliando, também, na identificação de vazamentos de pequeno à grande porte.

Foi possível perceber que as duas redes testadas apresentaram comportamentos diferentes em relação aos "limites de vazamento".

Na rede base, os melhores resultados são apresentados com um menor percentil da média. Já na rede MIGHA à medida que os percentis se afastam dos valores reais de consumo, verifica-se um aumento no número de erros, o que compromete a confiabilidade da detecção de vazamentos em condições reais.

Dessa forma, os testes com diferentes cenários de consumo contribuem para validar o desempenho da metodologia em contextos variados, evidenciando suas limitações e seu potencial de aplicação prática. Destaca-se ainda, a relevância da repetição de execução para os mesmos valores e convergência de resultados, uma vez que os resultados são aproximados e podem variar, permitindo um alcance maior de alertas verdadeiros como apresentados nas variações 95% e 90% na Rede MIGHA. Os gráficos 1 e 2 ilustram o comportamento do modelo no decorrer das simulações.

Gráfico 1- Vazamentos reais e falsos identificadores em cada simulação na rede MIGHA.

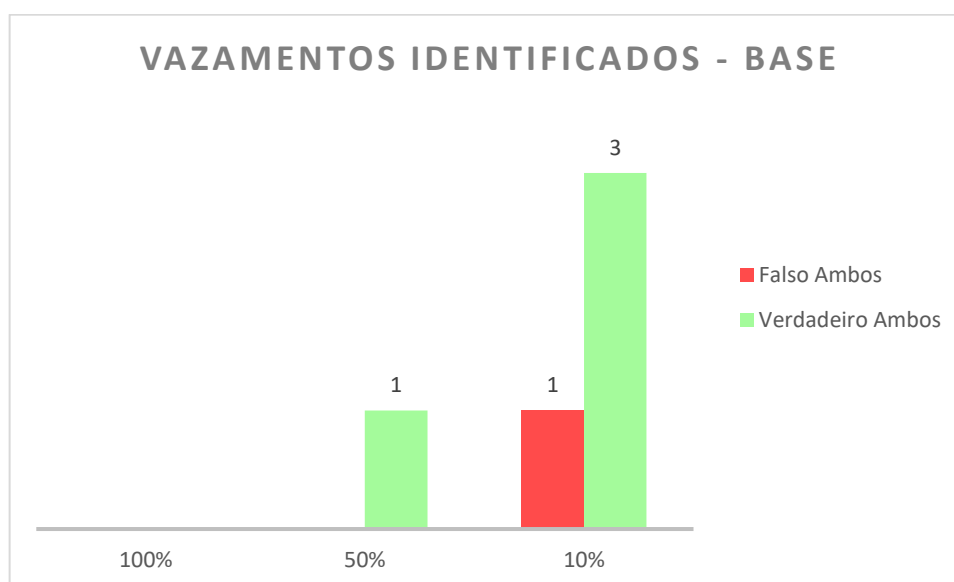


Fonte: Autora, 2024.

Na rede MIGHA, quando foram realizadas simulações para um limite de vazamento de 100% do consumo médio da rede, as duas simulações indicaram, para os mesmos nós, 10 pontos de vazamentos, 3,45% da rede, no entanto, nenhum vazamento real é encontrado. Já quando é considerado um limite de vazamento de

95%, ambas as simulações encontraram juntas 8 pontos de vazamentos, 2,76% da rede, mas nesse caso, 3 pontos são vazamentos reais. No caso do limite de vazamento em 90% do consumo médio da rede, ambas as simulações encontraram juntas 11 pontos de vazamentos, 3,79% da rede, dos quais, 3 pontos são vazamentos reais. Quando utilizado o limite de vazamento em 80%, ambas as simulações encontraram juntas 13 pontos de vazamentos, 4,48% da rede, mas nesse caso, 4 pontos são vazamentos reais, alcançando a totalidade de vazamentos inseridos. Enquanto que para um limite de vazamento em 50% do consumo médio da rede, ambas as simulações encontraram juntas 28 pontos de vazamentos, 9,66% da rede, dos quais, 4 pontos são vazamentos reais.

Gráfico 2 - Vazamentos reais e falsos identificadores em cada simulação na rede base.



Fonte: Autora, 2024.

Na rede base, quando foram realizadas simulações para um limite de vazamento de 100% do consumo médio da rede, as duas simulações não indicaram, nenhum alerta de vazamento. Já quando é considerado um limite de vazamento de 50%, ambas as simulações encontraram juntas 1 ponto de vazamentos, 6,67% da rede, sendo ele um vazamento real. Quando utilizado o limite de vazamento em 10%, ambas as simulações encontraram juntas 4 pontos de vazamentos, 26,67% da rede, mas nesse caso, apenas 1 ponto é um falso vazamento, alcançando a totalidade de 3 vazamentos inseridos.

4.4 CONCLUSÕES

A abordagem adotada no estudo mostrou-se promissora, permitindo a identificação de vazamentos com base em padrões anômalos de pressão, por meio da simulação hidráulica e da aplicação de modelos preditivos. A partir da criação de um banco de dados robusto com diferentes variações de demanda, foi possível treinar e testar os algoritmos, destacando-se a regressão linear como o modelo com melhor desempenho, com base nos indicadores de erro quadrático médio (MSE) e coeficiente de determinação (R^2).

As simulações realizadas com diferentes percentis do valor médio de consumo permitiram avaliar a sensibilidade do modelo aos limites estabelecidos para a detecção de vazamentos. O uso de duas redes distintas permitiu avaliar o comportamento do modelo com diferentes situações. Na rede base onde há um maior valor de vazão média e baixos valores de vazamentos, em relação a essa demanda, observou-se uma maior acurácia com um baixo percentil da média. Enquanto que, na rede MIGHA, com consumo menor e mais próximo das redes reais, constatou-se que valores mais próximos da média resultam em maior acurácia na identificação dos pontos reais de perda, enquanto percentis mais baixos aumentam a incidência de alertas falsos. Isso evidencia a importância de um ajuste adequado dos parâmetros de detecção para cada rede analisada, de modo a equilibrar a sensibilidade do modelo com a minimização de erros.

Dessa forma, o modelo desenvolvido contribui como uma ferramenta complementar no monitoramento e controle de perdas, com potencial de aplicação prática em sistemas reais, especialmente em contextos onde medições de pressão estão disponíveis, uma vez que, apesar de haver falsas indicações de vazamento, isso minimiza uma busca com uso de equipamentos de campo, diminuindo o tempo de busca. A flexibilidade do código, que se adapta à rede em análise, e a utilização de bibliotecas amplamente difundidas na área computacional, tornam a solução acessível e replicável.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a aplicação do modelo em redes reais com dados de campo, bem como o aperfeiçoamento dos algoritmos com técnicas mais avançadas de inteligência artificial, a fim de aumentar a precisão na

detecção de vazamentos e ampliar a aplicabilidade da ferramenta no setor de saneamento.

REFERENCIAS

ABUELTAYEF, H. T.; ABUALHIN, K. S.; ALASTAL, K. M. Addressing non-revenue water as a global problem and its interlinkages with sustainable development goals. **Water Practice and Technology**, [s. l.], v. 18, ed. 12, p. 3175–3202, 1 dez. 2023. DOI <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.157>. Disponível em: https://iwaponline.com/wpt/article/18/12/3175/98008/Addressing-non-revenue-water-as-a-global-problem?utm_source. Acesso em: 11 ago. 2025.

ÁVILA, C. A. M.; ROMERO, F. J. S.; JIMÉNEZ, P. A. L.; SÁNCHEZ, M. P. Improve leakage management to reach sustainable water supply networks through by green energy systems. Optimized case study. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 83, Agosto 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103994>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670722003146?via%3Dihub>. Acesso em: 5 ago. 2025.

BEZERRA, Al. de A.; CASTRO, M. A. H. de; ARAÚJO, R. S. de A. Absolute roughness calculation by the friction factor calibration using the Alternative Hydraulic Gradient Iterative Method on water distribution networks. **RBRH: Brazilian Journal of Water Resources**, Porto Alegre, v. 22, ed. 24, 2017. DOI <https://doi.org/10.1590/2318-0331.021720160018>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2318-03312017000100216&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 10 jul. 2025.

CIRAANE, U. D.; MUTUA, B. M.; ABDELBAKI, C.; BOUMAZZZA, T. Performance indicators of water supply network of Goma Township in the Democratic Republic of Congo: a tripartite assessment. **Applied Water Science**, [s. l.], v. 12, n. 158, 2022. DOI <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01676-6>. Disponível em: <https://link-springer-com.ez17.periodicos.capes.gov.br/article/10.1007/s13201-022-01676-6#citeas>. Acesso em: 10 ago. 2025.

DADEBO, D.; OBURA, D.; KIMERA, D. *Hydraulic modeling and prediction of performance for a drinking water supply system towards the achievement of sustainable development goals (SDGs): A system case study from Uganda*. Groundwater for Sustainable Development, v. 22, p. 100951, 2023. ISSN 2352-801X. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100951. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352801X23000516>. Acesso em: 6 ago. 2025.

DIAZ-ORTIZ, J.; ALVARADO-MEDELLIN, P.; RAMIREZ-AGUILERA, A. M.; BADILLO-ALMARAZ, H.; ORTIZ GOMEZ, R.; BAUTISTA CAPETILLO, C. Water distribution

system calibration using the Finite Element Method coupled to a Genetic Algorithm. *Journal of Water Process Engineering*, v. 54, p. 104017, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714423005366>. Acesso em: 6 ago. 2025.

JAYAKUMAR, D.; BOUHOULA, A.; AL-ZUBARI, W. K. Unlocking the Potential of Artificial Intelligence for Sustainable Water Management Focusing Operational Applications. **Water**, [s. l.], v. 11, ed. 22, p. 3328, 2024. DOI <https://doi.org/10.3390/w16223328>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/22/3328>. Acesso em: 5 ago. 2025

LEHTORANTA, S.; LAUKKA, V.; SILVENNOINEN, K. Climate change impacts of municipal water sector and mitigation pathways: A national scale analysis and perspectives to carbon neutrality. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 373, 2025. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123732>. Disponível em: [https://www.sciencedirect-com.ez17.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301479724037186?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com.ez17.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301479724037186?via%3Dihub). Acesso em: 11 ago. 2025.

LEINÆS, A.; SIMUKONDA, K.; FARMANI, R. Calibration of intermittent water supply systems hydraulic models under data scarcity. *Water Supply*, [s. l.], v. 24, ed. 5, p. 1626–1644, Maio 2024. DOI <https://doi.org/10.2166/ws.2024.075>. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article/24/5/1626/101601/Calibration-of-intermittent-water-supply-systems>. Acesso em: 5 ago. 2025.

Li, C., Pan, J. Impact Analysis of EPANET-Based Rural Water Supply Network Integration on Network Reliability. In: Han, D., Bashir, M.J.K. (eds) *Environmental Governance, Ecological Remediation and Sustainable Development*. ICEPG 2023. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham. 2024 https://doi-org.ez17.periodicos.capes.gov.br/10.1007/978-3-031-52901-6_139. Disponível em: https://link-springer-com.ez17.periodicos.capes.gov.br/chapter/10.1007/978-3-031-52901-6_139#citeas. Acesso em: 11 ago. 2025.

LIMA, G. M.; BRENTAN, B. M.; MANZI, D.; LUVIZOTTO, E. Metamodel for nodal pressure estimation at near real-time in water distribution systems using artificial neural networks. *Journal of Hydroinformatics*, [s. l.], v. 20, ed. 2, p. 486–496, 22 mar. 2018. DOI <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.036>. Disponível em: <https://iwaponline.com/jh/article/20/2/486/37912/Metamodel-for-nodal-pressure-estimation-at-near>. Acesso em: 6 ago. 2025.

LIU, J.; WU, D.; MOHAMMED, H.; SEIDU, R. A Novel Method for Anomaly Detection and Signal Calibration in Water Quality Monitoring of an Urban Water Supply System. **Water**, [s. l.], v. 16, p. 1238, 2024. DOI <https://doi.org/10.3390/w16091238>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/9/1238>. Acesso em: 6 ago. 2025.

MOREIRA, H. A. M.; VILLANUEVA, J. M. M.; GOMES, H. P. Modified hybrid particle swarm optimization: multivariate calibration of water supply networks:

RBRH. **Brazilian Journal of Water Resources**, Porto Alegre, v. 30, ed. 17, March 2025. DOI <https://doi.org/10.1590/2318-0331.302520240121>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/ZxdZg6W77PjpmXPSsZ5dvMP/?lang=en>. Acesso em: 6 ago. 2025.

SAFITRI, A.; WAHYUDI, S. I.; SOEDARSONO. Simulation of Pipe Networks Using EPANET to Optimize Water Supply: A Case Study for Arjawinangun Area, Indonesia. **Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics**, [s. l.], v. 70, p. 17 - 28, 2023. DOI <https://doi.org/10.2478/heem-2023-0002>. Disponível em: <https://sciencedirect.com/article/10.2478/heem-2023-0002?tab=authors>. Acesso em: 11 ago. 2025.

SHI, L.; ZHANG, J.; YU, X.; CHEN, S.; HE, W.; CHEN, N. Calibration of roughness coefficient for long-distance water supply systems with multi-branch pipelines. **Physics of Fluids**, [s. l.], v. 36, ed. 9, 1 set. 2024. DOI <https://doi.org/10.1063/5.0227260>. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/pof/article-abstract/36/9/097162/3314232/Calibration-of-roughness-coefficient-for-long?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 6 ago. 2025.

SHIU, CC.; CHUNG, CC.; CHIANG, T. Enhancing the EPANET Hydraulic Model through Genetic Algorithm Optimization of Pipe Roughness Coefficients. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 38, p. 323–341, 2024. DOI <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03672-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-023-03672-0>. Acesso em: 6 ago. 2025.

SHOARINEZHAD, V.; WIEPRECHT, S.; KANTOUSH, S. A.; HAUN, S. Applying optimization methods for automatic calibration of 3D morphodynamic numerical models of shallow reservoirs: comparison between lozenge- and hexagon-shaped reservoirs. **Journal of Hydroinformatics**, [s. l.], v. 25, ed. 1, p. 85–100, 1 jan. 2023. DOI <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.094>. Disponível em: https://iwaponline.com/jh/article/25/1/85/92012/Applying-optimization-methods-for-automatic?utm_. Acesso em: 6 ago. 2025.

SILVA, F. das G. B. da; GOULART, T. D.; BARROS, R. M. Application of routine calibration of real water supply network with adjustment of demand roughness parameters driven by applied pressure real network of Brazil. **EPiC Series in Engineering**: HIC 2018. 13th International Conference on Hydroinformatics, [s. l.], v. 3, p. 504-511, 2018. DOI <https://doi.org/10.29007/z3hq>. Disponível em: <https://easychair.org/publications/paper/11TK>. Acesso em: 6 ago. 2025.

SINISA - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO BÁSICO. **Relatório dos Serviços de Abastecimento de Água**. Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/resultados->

sinisa/copy_of_RELATORIO_SINISA_ABASTECIMENTO_DE_AGUA_2024.pdf?utm_. Acesso em: 10 ago. 2024.

ŚWIĘTOCHOWSKI, K.; ŚREDZIŃSKI, P.; MALMUR, R.; GWOŹDZIEJ-MAZUR, J. *Analysis of the possibility of energy self-sufficiency of water pumping stations with the use of PV installations*. International Communications in Heat and Mass Transfer, v. 143, p. 106683, 2023. ISSN 0735-1933. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106683. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193323000726>. Acesso em: 6 ago. 2025.

TALOMA, R. J. L.; CUOMO, F.; COMMINIELLO, D.; PISANI, P. Machine learning for smart water distribution systems: exploring applications, challenges and future perspectives. **Artificial Intelligence Review**, [s. l.], v. 58, 2025. DOI <https://doi.org/10.1007/s10462-024-11093-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-024-11093-7#citeas>. Acesso em: 6 ago. 2025.

ZAMAN, D.; GUPTA, A. K.; UDDAMERI, V.; TIWARI, M. K.; SEN, D. *Exploring the key facets of leakage dynamics in water distribution networks: experimental verification, hydraulic modeling, and sensitivity analysis*. Journal of Cleaner Production, v. 362, p. 132236, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132236. Disponível em: [https://www.sciencedirect-com.ez17.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0959652622018418](https://www.sciencedirect.com.ez17.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0959652622018418). Acesso em: 6 ago. 2025.

ZANFEI, A.; MENAPACE, A.; BRENTAN, B. M.; SITZENFREI, R.; HERRERA, M. Shall we always use hydraulic models? A graph neural network metamodel for water system calibration and uncertainty assessment. **Water Research**, [s. l.], v. 242, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120264>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135423007005>. Acesso em: 6 ago. 2025.

5 ARTIGO II: CALIBRAÇÃO DE MODELOS HIDRÁULICOS E CONTROLE DE PERDAS DE ÁGUA: ANÁLISE DA INSERÇÃO NOS CURRÍCULOS DE ENGENHARIA CIVIL NO BRASIL

Resumo: Apesar das recentes obrigações federais para a redução de perdas, a eficiência operacional nos Sistemas de Distribuição de Água (SDA) brasileiros permanece baixa, com um índice médio de perdas de 37,8% em 2022. Um fator crítico que impede o progresso é a carência de formação profissional específica em técnicas avançadas, como a calibração de modelos hidráulicos e o controle de perdas. Este estudo aborda a necessidade de alinhar o ensino de Engenharia Civil com as demandas técnicas da gestão de SDA e as metas nacionais de sustentabilidade. Esta pesquisa realizou uma análise sistemática dos currículos de cursos de Engenharia Civil em 100 universidades públicas (federais e estaduais) em todo o Brasil. O estudo examinou especificamente as ementas das disciplinas básicas e profissionalizantes relacionadas a recursos hídricos e saneamento, buscando a menção direta e a integração estruturada dos tópicos de calibração hidráulica e controle de perdas de água. A análise revelou uma lacuna curricular significativa. Apenas 26% dos cursos de universidades federais e 17% dos cursos de universidades estaduais apresentaram alguma menção direta aos temas investigados. Crucialmente, o tópico de calibração hidráulica mostrou-se quase inexistente nas ementas, limitando-se, muitas vezes, a menções superficiais em conteúdos mais amplos. Essa exposição limitada compromete a capacidade dos futuros engenheiros de gerir SDA urbanos complexos.

Palavras-chave: Controle de Perdas de Água; Calibração Hidráulica; Currículo de Engenharia Civil; Sustentabilidade.

Abstract: Despite recent federal mandates for loss reduction, the operational efficiency of Brazilian Water Distribution Systems (WDS) remains low, with an average loss rate of 37.8% in 2022. A critical factor hindering progress is the lack of specific professional training in advanced techniques, such as hydraulic loss models and loss control. This study addresses the need to align Civil Engineering education with the technical demands of WDS management and national sustainability goals. This

research conducted a systematic analysis of Civil Engineering curricula in 100 public universities (federal and state) throughout Brazil. The study specifically examined basic and professionalizing disciplines related to water resources and sanitation, seeking direct mention and structured integration of topics such as hydraulic wiring and water loss control. The analysis revealed a significant curricular gap. Only 26% of courses at federal universities and 17% of courses at state universities contained any direct mention of the investigated topics. Crucially, the theoretical content is almost nonexistent in the course materials, often limited to superficial mentions within broader topics. This limited exposure compromises the ability of future engineers to manage complex urban fire safety systems.

Keywords: Water Loss Control; Hydraulic Calibration; Civil Engineering Curriculum; Sustainability.

5.1 INTRODUÇÃO

O abastecimento de água potável configura-se como um dos pilares estruturais do saneamento básico e da saúde pública urbana (Silva et al. 2023). Como observado por Levallois & Villanueva (2019), a qualidade da água potável é indispensável à saúde humana, sendo responsável por prevenir doenças transmitidas pela água.

No Brasil, apesar dos avanços recentes, ainda persistem desafios significativos relacionados à eficiência operacional dos sistemas de distribuição e ao controle de perdas hídricas. Conforme Fagundes et al. (2024), mesmo com metas federais recentes, a eficiência operacional das concessionárias de água no Brasil continua limitada, impactando a redução das perdas e a acessibilidade tarifária. Em estudo de caso regional, De Santi et al. (2021) mostram que os desafios na gestão de perdas decorrem tanto de insuficiências operacionais quanto de limitações institucionais.

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a média nacional do índice de perdas na distribuição foi de aproximadamente 40,3 % em 2021 (SNIS, 2021). Já em 2022, o mesmo levantamento indicou perdas equivalentes a 37,8 % do volume total de água produzida, o que representa cerca de 7 bilhões de metros cúbicos de água tratada desperdiçados ao longo do ano — volume

superior 7 vezes à capacidade de armazenamento do Sistema Cantareira, em São Paulo (Brasil, 2025).

Esses números demonstram a distância do país em relação à meta de redução de perdas estabelecida pela Portaria n.º 490, de 20 de dezembro de 2021, do Ministério do Desenvolvimento Regional, que determina o limite de 25 % como condição para acesso a recursos federais (Brasil, 2021). Além disso, evidencia-se uma discrepância em relação aos países desenvolvidos, nos quais os índices de perdas tendem a ser inferiores a 15 % (Ávila et al., 2022).

A promoção da sustentabilidade nas redes de distribuição de água constitui um elemento estratégico para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Evaristo et al., 2023). A superação desse desafio requer atuação integrada dos gestores de sistemas de abastecimento, com foco na otimização da eficiência operacional, na redução de impactos ambientais e na contribuição efetiva para o avanço das metas estabelecidas na Agenda 2030 (Garcia et al., 2023).

Em um cenário onde a escassez hídrica, as ineficiências operacionais e os altos índices de perdas ainda são desafios recorrentes, torna-se indispensável o aprimoramento técnico dos profissionais responsáveis pela gestão dos sistemas de distribuição. Para Loureiro et al. (2022), a crescente complexidade dos sistemas urbanos de abastecimento impõe a necessidade de que engenheiros sejam treinados em tecnologias de simulação e calibração de modelos hidráulicos, de modo a apoiar a tomada de decisão baseada em evidências.

Estudos recentes como os de Moreira; Villanueva; Gomes, (2025), Liu et al., (2024), Diaz-Ortiz et al., (2023), Dadebo et al., (2023) e Świątochowski et al., (2023) evidenciam uma propensão crescente na adoção de metodologias de simulação hidráulica e soluções baseadas em inteligência computacional, como ferramentas para a solução de desafios recorrentes na prática profissional e potencializando a eficiência na gestão das redes de distribuição.

Nesse contexto, a calibração de modelos hidráulicos surge como uma ferramenta essencial para a gestão eficiente dos sistemas de distribuição (Zanfei et al., 2020), permitindo não apenas a detecção de vazamentos e a análise de

desempenho sob diferentes condições operacionais, mas também o planejamento de ações corretivas com maior embasamento técnico (Paulo, Pina, 2020). Entretanto, observa-se que, apesar de sua relevância prática, a abordagem desses conteúdos nos cursos de graduação em Engenharia Civil ainda é limitada, especialmente no que diz respeito à formação prática voltada à modelagem hidráulica e à gestão de perdas. (Pergher, Freitas, 2020).

Estudos apontam que a inovação curricular envolve a reorganização de práticas pedagógicas, a incorporação de tecnologias digitais e a atualização de competências diante das demandas sociais e produtivas atuais. Metodologias ativas, abordagens centradas no estudante e recursos tecnológicos contribuem para ampliar o engajamento e melhorar a aprendizagem (BURNS et al., 2023; ZHU; LIU; WANG, 2024).

Além disso, autores destacam a importância de currículos culturalmente inclusivos e alinhados às realidades locais, incorporando princípios de equidade e perspectivas decoloniais (MABUZA; KHUMALO, 2024). Modelos avaliativos recentes reforçam que a inovação deve ser analisada de forma sistêmica, considerando impactos acadêmicos, sociais e institucionais (NGUYEN; KIM, 2023).

Diante desse panorama, propõe-se uma análise das grades curriculares dos cursos de Engenharia Civil oferecidos por universidades federais e estaduais brasileiras, com o objetivo de identificar a presença de disciplinas que abordem a calibração de redes de abastecimento e o controle de perdas de água. Busca-se, com isso, contribuir para o debate sobre a inovação curricular acadêmica e para o fortalecimento da qualidade da formação de profissionais capacitados para enfrentar os desafios operacionais dos sistemas de abastecimento de água no país.

5.2 METODOLOGIA

Para compreender sobre a presença da abordagem das temáticas de perdas de água e calibração nos sistemas de abastecimento nos cursos de graduação em Engenharia Civil, buscou-se através dos sites das universidades federais e estaduais do Brasil além do distrito Federal, os projetos pedagógicos dos cursos.

Foram analisadas 100 universidades, 51 delas sendo universidades federais, distribuídas pelos 26 estados e o distrito federal, cobrindo todo o território brasileiro e 49 universidades estaduais distribuídas por 24 estados brasileiros, visto que, nem todos os estados disponibilizam de universidades estaduais.

As universidades analisadas podem ser vistas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Universidades Federais Analisadas

Universidades Federais Analisadas		
Estado	Sigla	Universidade
Acre	UFAC	Universidade Federal do Acre
Alagoas	UFAL	Universidade Federal de Alagoas
Amapá	UNIFAP	Universidade Federal do Amapá
Amazonas	UFAM	Universidade Federal do Amazonas
Bahia	UFAL	Universidade Federal da Bahia
Bahia	UFOB	Universidade Federal do Oeste da Bahia
Bahia	UFSB	Universidade Federal do Sul da Bahia
Ceará	UFCA	Universidade Federal do Cariri
Ceará	UFC	Universidade Federal do Ceará
Distrito Federal	UNB	Universidade de Brasília
Espírito Santo	UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
Goiás	UFG	Universidade Federal de Goiás
Maranhão	UFMA	Universidade Federal do Maranhão
Mato Grosso	UFMT	Universidade Federal do Mato Grosso
Mato Grosso do Sul	UFMS	Universidade Federal do Mato Grosso do Sul
Mato Grosso do Sul	UFGD	Universidade Federal da Grande Dourados
Minas Gerais	UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
Minas Gerais	UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
Minas Gerais	UFLA	Universidade Federal de Lavras
Minas Gerais	UFSJ	Universidade Federal de São João del-Rei
Minas Gerais	UFU	Universidade Federal de Uberlândia

Fonte: Autora, 2024.

Continuação da Tabela 1. Universidades Federais Analisadas.

Continuação		
Estado	Sigla	Universidade
Minas Gerais	UFV	Universidade Federal de Viçosa
Minas Gerais	UFVJM	Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Minas Gerais	UNIFAL	Universidade Federal de Alfenas
Minas Gerais	UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
Pará	UFPA	Universidade Federal do Pará
Pará	UNIFESSPA	Universidade Federal Sul e Sudeste do Pará
Paraíba	UFPB	Universidade Federal da Paraíba
Paraíba	UFCG	Universidade Federal De Campina Grande
Paraná	UFPR	Universidade Federal do Paraná
Paraná	UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Paraná	UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Pernambuco	UFPE	Universidade Federal do Pernambuco
Pernambuco	UNIVASF	Universidade Federal do Vale do São Francisco
Piauí	UFPI	Universidade Federal do Piauí
Rio de Janeiro	UFF	Universidade Federal Fluminense
Rio de Janeiro	UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio Grande do Norte	UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Rio Grande do Norte	UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Rio Grande do Sul	UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rio Grande do Sul	UFPEL	Universidade Federal de Pelotas
Rio Grande do Sul	UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
Rio Grande do Sul	FURG	Universidade Federal do Rio Grande
Rio Grande do Sul	UNIPAMPA	Universidade Federal do Pampa
Rondônia	UNIR	Universidade Federal de Rondônia
Roraima	UFRR	Universidade Federal de Roraima
Santa Catarina	UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
Santa Catarina	UFFS	Universidade Federal da Fronteira Sul
São Paulo	UFSCAR	Universidade Federal de São Carlos
Sergipe	UFS	Universidade Federal de Sergipe
Tocantins	UFT	Universidade Federal do Tocantins

Fonte: Autora, 2024.

Tabela 5. Universidades Estaduais Analisadas.

Universidades Estaduais Analisadas		
Estado	Sigla	Universidade
Alagoas	UNEAL	Universidade Estadual de Alagoas
Alagoas	UNCISAL	Universidade Estadual de Ciências da Saúde de Alagoas
Amapá	UEAP	Universidade Estadual do Amapá
Amazonas	UEA	Universidade do Estado do Amazonas
Bahia	UESB	Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Bahia	UNEB	Universidade do Estado da Bahia
Bahia	UEFS	Universidade Estadual de Feira de Santana
Bahia	UESC	Universidade Estadual de Santa Cruz
Brasília	UNDF	Universidade do Distrito Federal Jorge Amaury
Ceará	UVA	Universidade Estadual do Vale do Acaraú
Ceará	UECE	Universidade Estadual do Ceará
Ceará	URCA	Universidade Regional do Cariri
Espírito Santo	UNAC	Universidade Aberta Capixaba
Goiás	UEG	Universidade Estadual de Goiás
Maranhão	UEMA	Universidade Estadual do Maranhão
Maranhão	UEMASUL	Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão
Mato Grosso	UNEMAT	Universidade do Estado de Mato Grosso
Mato Grosso do Sul	UEMS	Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Minas Gerais	UNIMONTES	Universidade Estadual de Montes Claros
Minas Gerais	UEMG	Universidade do Estado de Minas Gerais
Pará	UEPA	Universidade do Estado do Pará
Paraíba	UEPB	Universidade Estadual da Paraíba
Paraná	UNICENTRO	Universidade Estadual do Centro-Oeste
Paraná	UENP	Universidade Estadual do Norte do Paraná
Paraná	UNESPAR	Universidade Estadual do Paraná
Paraná	UNICENTRO	Universidade Estadual do Centro-Oeste
Paraná	UNESPAR	Universidade Estadual do Paraná
Paraná	UENP	Universidade Estadual do Norte do Paraná
Paraná	UEM	Universidade Estadual de Maringá
Paraná	UEL	Universidade Estadual de Londrina
Paraná	UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
Paraná	UNIOESTE	Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Continuação da Tabela 6. Universidades Estaduais Analisadas.

Continuação		
Estado	Sigla	Universidade
Pernambuco	UPE	Universidade de Pernambuco
Piauí	UESPI	Universidade Estadual do Piauí
Rio de Janeiro	UEZO	Universidade Estadual da Zona Oeste
Rio de Janeiro	UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro	UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense
Rio Grande do Norte	UERN	Universidade do Estado do Rio Grande do Norte
Rio Grande do Sul	UERGS	Universidade Estadual do Rio Grande do Sul
Roraima	UERR	Universidade Estadual de Roraima
Santa Catarina	UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
São Paulo	UNIVESP	Universidade Virtual do Estado de São Paulo
São Paulo	FAMEMA	Faculdade de Medicina de Marília
São Paulo	FAMERP	Faculdade de Medicina de São José do Rio Preto
São Paulo	FATEC	Faculdade de Tecnologia de São Paulo
São Paulo	UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
São Paulo	UNESP	Universidade Estadual Paulista
São Paulo	USP	Universidade de São Paulo
Tocantins	UNITINS	Universidade Estadual do Tocantins

Fonte: Autora, 2024.

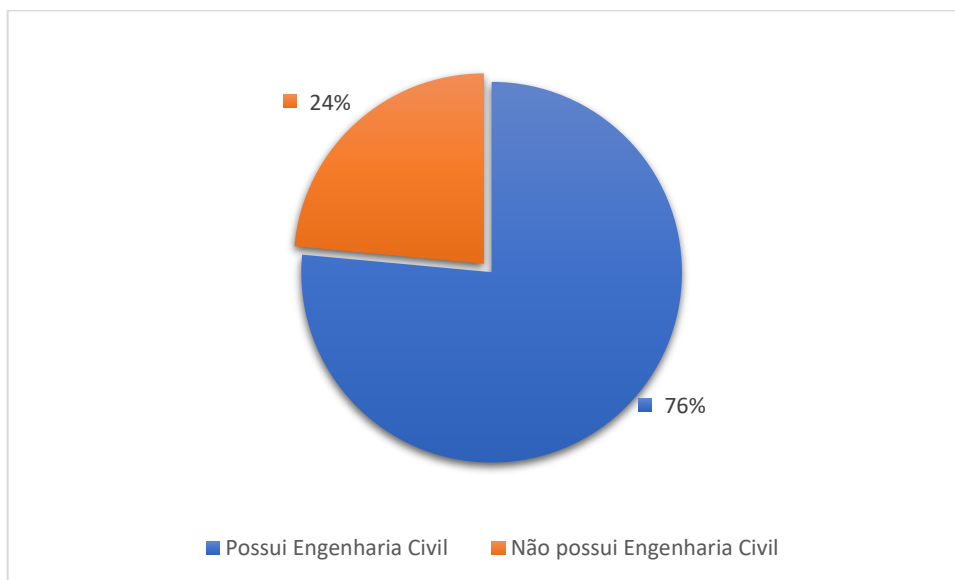
Com as informações de estrutura curricular de cada curso, examinou-se através das ementas das disciplinas voltadas aos recursos hídricos e ao saneamento, básicas e profissionalizantes, se haviam disciplinas que abordavam tais assuntos.

Mediante as informações obtidas, optou-se por organizar os dados em uma tabela possibilitando uma exposição de resultados através dos elementos: universidade, disciplina, se obrigatória ou optativa, a presença dos tópicos calibração e/ou perdas e os tópicos identificados nas referidas ementas.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

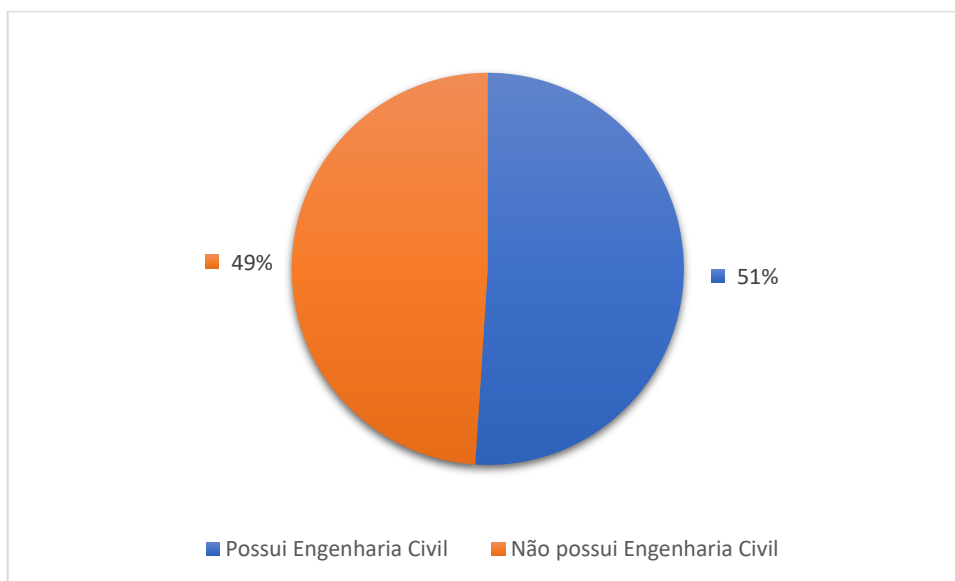
Nas universidades federais constatou-se que 24% das instituições não disponibilizam o curso como mostrado no gráfico 1. Enquanto foi observado nas universidades estaduais que esse número se mostrou sendo de 49% das instituições, como apresentado no gráfico 2.

Gráfico 1 - Presença do curso de Engenharia Civil nas universidades Federais.



Fonte: Autora, 2025.

Gráfico 2 - Presença do curso de Engenharia Civil nas universidades Estaduais.



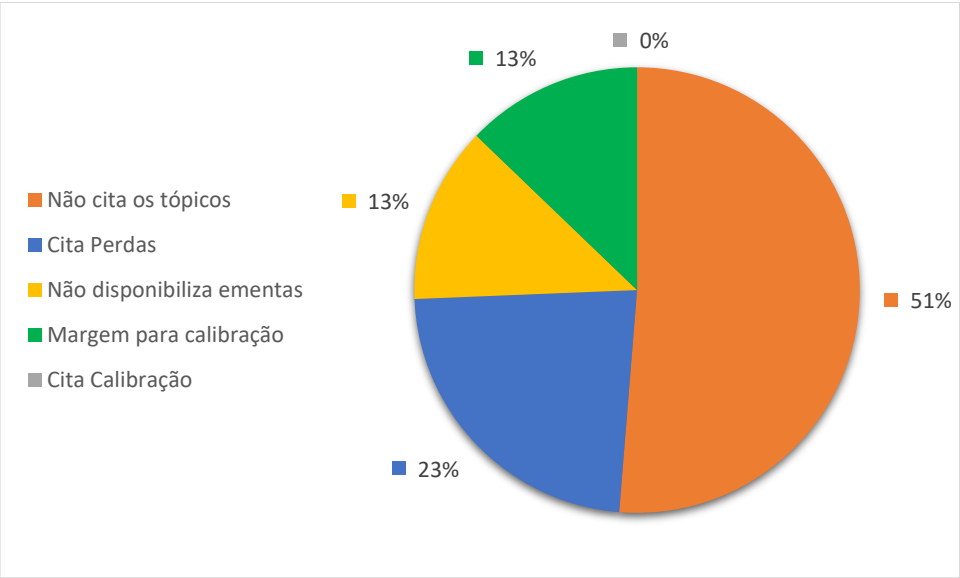
Fonte: Autora, 2025.

Diante da pesquisa nas instituições federais e estaduais de ensino superior, foi observado a carência significativa da inserção de tópicos que contemplem a exposição das temáticas de calibração e perdas de água nos sistemas de abastecimento de água.

Perante o exposto, buscou-se apontar também as disciplinas identificadas nas grades que trazem tópicos que se aproximam da área de pesquisa e nas quais

haveriam a possibilidade de inserção da temática em estudo com êxito. Os resultados podem ser vistos nos gráficos 3 e 4 nas tabelas 3 e 4.

Gráfico 3- Identificação das temáticas de perda de água e calibração na ementa dos cursos de Engenharia Civil em instituições Federais.



Fonte: Autora, 2025.

Gráfico 4 - Identificação das temáticas de perda de água e calibração na ementa dos cursos de Engenharia Civil em instituições Estaduais.



Fonte: Autora, 2025.

Tabela 3. Identificação das temáticas de perda de água e calibração na ementa dos cursos de Engenharia Civil em instituições Federais.

Universidade	Disciplina	Obrigatória	Optativa	Perdas	Calibração	Tópico
UFAL	Sistemas de abastecimento de água	X		Sim	Não	Controle e redução de perdas.
UFAM	Tópicos especiais em saneamento		X	-	-	*Sem ementa, definida mediante oferta
UFBA	Sistemas Urbanos de Água		X	Não	Não	Analisar a construção, operação e manutenção de Sistemas de Abastecimento de água
UFSB	Projeto de sistema de abastecimento de água		X	Sim	Não	Controle de perdas
UNB	Tópicos especiais em saneamento		X	Não	Não	*Ementa variável, disponível mediante oferta
UFC	Sistemas de Abastecimento de Água	X		Sim	Não	Automação e controle de perdas em SAA.
UFMS	Análise e Controle de Sistemas de Distribuição de Água		X	Sim	Não	Controle de perdas nos sistemas hidráulicos
UFTM	Abastecimento de Água	X		Sim	Não	Redução de perdas
UNIFEI	Análise de problemas hidráulicos em Engenharia Civil através de técnicas de modelagem e simulação computacional		X	-	-	Desenvolvimento de algoritmos e rotinas computacionais aplicadas a sistemas hidráulicos em engenharia civil

Fonte: Autora, 2025.

Continuação 1 da Tabela 7. Identificação das temáticas de perda de água e calibração na ementa dos cursos de Engenharia Civil em instituições Federais.

Universidade	Disciplina	Obrigatória	Optativa	Perdas	Calibração	Tópico
UFPB	Sistema de abastecimento de água	X		Sim	Não	Medição e controle de perdas dos Sistemas de Abastecimento de Água
UFPR	Saneamento Ambiental I	X		Sim	Não	Medidas de conservação de água no sistema de abastecimento.
UFFS	Sistemas de Água e Esgoto	X		Sim	Não	Controle e redução de perdas.
UFSCAR	Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água		X	Sim	Não	Disciplina voltada ao tema de perdas
UFT	Projeto de Sistema de Abastecimento de Água	X		Não	Não	Controle operacional dos sistemas de distribuição de água

Fonte: Autora, 2025.

Tabela 4. Identificação das temáticas de perda de água e calibração na ementa dos cursos de Engenharia Civil em instituições Estaduais.

Universidade	Disciplina	Obrigatória	Optativa	Perdas	Calibração	Tópico
UEMASUL	Sistema de abastecimento de água	X		Sim	Não	Operação, manutenção e medição (perdas) dos sistemas de abastecimento de água.
UNIOESTE	Saneamento I	X		Sim	Não	Controle e redução de perdas.
UESPI	Saneamento I	X		Sim	Não	Gerenciamento de perdas de água
UEMS	Hidráulica Computacional *		X	Não	Não	Projetar e operar sistemas de abastecimento de água.
USP	Saneamento 1	X	-	Sim	-	Controle e redução de perdas

Fonte: Autora, 2025.

Foi possível constatar que em nenhuma das ementas dos cursos nas universidades é trazido em sua estrutura curricular, tanto obrigatória quanto optativa, a abordagem do termo de calibração nos sistemas hidráulicos.

Dentre os cursos observados no estudo, na rede federal em apenas 9 foram identificadas o tópico de perdas nos planos de estudo das disciplinas, sendo 6 delas de caráter obrigatório e 3 optativa.

Dentre as obrigatórias, sendo 3 delas denominadas “Sistemas de Abastecimento de Água” encontradas na Universidade Federal de Alagoas (UFAL) com o tópico “Controle e redução de perdas”, na Universidade Federal do Ceará (UFC) com o tópico “Automação e controle de perdas em SAA.” e na Universidade Federal da Paraíba (UFPB) com o tópico “Medição e controle de perdas dos Sistemas de Abastecimento de Água”, 1 delas denominada “Abastecimento de Água” encontrada na Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) com o tópico “Redução de perdas”, 1 delas denominada “Saneamento Ambiental I” encontrada na Universidade Federal do Paraná (UFPR) com o tópico “Medidas de conservação de água no sistema de abastecimento” e 1 delas denominadas “Sistemas de Água e Esgoto” encontrada

na Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) com o tópico “Controle e redução de perdas”.

As disciplinas de caráter optativo foram identificadas na Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS) denominada “Análise e Controle de Sistemas de Distribuição de Água” com o tópico “Controle de perdas nos sistemas hidráulicos”, na Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB) denominada “Projeto de sistema de abastecimento de água” com o tópico “Controle de perdas” e destacou-se a disciplina identificada na Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR) denominada “Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água” que apesar de não possui a temática de calibração é pensada exclusivamente para as perdas.

Enquanto que, na Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e na Universidade de Brasília (UNB) foram identificadas as disciplinas denominadas “tópicos especiais em saneamento”, na qual a ementa tem possibilidade de personalização visto que é definida e divulgada mediante oferta, ficando a critério do professor responsável pela mesma. Sendo essa uma possibilidade de inserção de tópicos importantes como esses para a formação profissional do engenheiro. Ainda de forma indireta, na Universidade Federal da Bahia (UFBA) e na Universidade Federal do Tocantins (UFT) foi possível identificar as disciplinas de “Sistemas Urbanos de Água” ofertada de forma optativa que traz em sua ementa o tópico “Analisar a construção, operação e manutenção de Sistemas de Abastecimento de água” e a disciplina “Projeto de Sistema de Abastecimento de Água” ofertada de forma obrigatória, que traz em sua ementa o tópico “Controle operacional dos sistemas de distribuição de água” respectivamente, ambas apresentando margem para a inserção dos tópicos em questão na ministração. No que se trata da abordagem da temática de calibração identificou-se na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) uma disciplina denominada “Análise de problemas hidráulicos em Engenharia Civil através de técnicas de modelagem e simulação computacional” que traz em sua ementa o tópico “Desenvolvimento de algoritmos e rotinas computacionais aplicadas a sistemas hidráulicos em engenharia civil” que se trata do proposto no estudo.

Em 38 cursos foram identificadas disciplinas na área do estudo, com ênfase em sistemas de abastecimento de água, porém não trazem tópicos que abordassem alguma das temáticas, sendo elas a Universidade Federal do Rio Grande do Norte

(UFRN), Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), Universidade Federal do Sergipe (UFS), Universidade Federal do Maranhão (UFMA), a Universidade Federal do Piauí (UFPI), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Universidade Federal do Pará (UFPA), Universidade Federal Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), Universidade Federal do Acre (UFAC), Universidade Federal De Campina Grande (UFCG), Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) , Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Universidade Federal de Lavras (UFLA), Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Universidade Federal de Viçosa (UFV), Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Universidade Federal Fluminense (UFF), Universidade Federal de Goiás (UFG) e Universidade Federal de Roraima (UFRR), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UFTPR), Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Universidade do Amapá (UNIFAP), Universidade Federal do Pernambuco (UFPE), Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), Universidade Federal do Cariri (UFCA), e a Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT). Enquanto que no caso da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) não foi possível identificar nenhuma disciplina que abordassem a temática de redes de abastecimento de água nem de caráter obrigatório quanto optativo. As disciplinas identificadas nesses cursos estão dispostas na tabela 5.

Tabela 5. Identificação das disciplinas voltadas a área de rede de abastecimento de água dos cursos de Engenharia Civil em instituições Federais.

Universidade	Disciplina	Obrigatória	Optativa	Perdas	Calibração	Tópico
UFAC	Sistema Urbano de Abastecimento de Água	X		Não	Não	-
UNIFAP	Sistemas de Abastecimento de água		X	Não	Não	-
UFOB	Sistemas de Abastecimento de Água		X	Não	Não	-
UFCA	Saneamento I	X		Não	Não	-
UFES	Saneamento Básico	X		Não	Não	-
UFG	Saneamento Básico I	X		Não	Não	-
UFMA	Saneamento	X		Não	Não	-
UFMT	Saneamento Básico	X		Não	Não	-
UFMG	Sistemas de Abastecimento de água	X		Não	Não	-
UFGD	Saneamento	X		Não	Não	-
UFJF	Saneamento Básico	X		Não	Não	-
UFLA	Sistemas de Abastecimento de Água	X		Não	Não	-
UFSJ	Sistemas de Abastecimento de Água	X		Não	Não	-
UFU	Sistemas de Abastecimento de Água	X		Não	Não	-

Fonte: Autora, 2025.

Continuação 1 da Tabela 5. Identificação das disciplinas voltadas a área de rede de abastecimento de água dos cursos de Engenharia Civil em instituições Federais.

Continuação						
Universidade	Disciplina	Obrigatória	Optativa	Perdas	Calibração	Tópico
UFV	Sistemas de Abastecimento de Água	X		Não	Não	-
UNIFAL	Sistemas de Abastecimento de Água	X		Não	Não	-
UFVJM	NENHUMA DISCIPLINA COM REDE DE ABASTECIMENTO, NEM OBRIGATÓRIA E NEM OPTATIVA					
UFPA	Sistema de saneamento ambiental	X		Não	Não	-
UNIFESSPA	Sistemas de Abastecimento de Água	X		Não	Não	-
UFCG	Sistemas de Abastecimento de Água	X		Não	Não	-
UFTPR	Saneamento A	X		Não	Não	-
UNILA	Saneamento I	X		Não	Não	-
UFPE	Sistemas de Abastecimento d'Água		X	Não	Não	-
UNIVASF	Saneamento I	X		Não	Não	-
UFPI	Saneamento I	X		Não	Não	-
UFRJ	Saneamento Ambiental	X		Não	Não	-
UFF	Saneamento Ambiental I	X		Não	Não	-
UFRN	Sistemas Urbanos de Águas e Esgoto	X		Não	Não	-

Fonte: Autora, 2025.

Continuação 2 da Tabela 5. Identificação das disciplinas voltadas a área de rede de abastecimento de água dos cursos de Engenharia Civil em instituições Federais.

Universidade	Disciplina	Continuação		Perdas	Calibração	Tópico
		Obrigatória	Optativa			
UFERSA	Sistemas de Abastecimento de Água	X		Não	Não	-
UFRGS	Sistemas de Água e esgotos	X		Não	Não	-
UFPEL	Sistemas Urbanos de Água	X		Não	Não	-
UFSM	Abastecimento e Tratamento de Água	X		Não	Não	-
FURG	Saneamento Básico I	X		Não	Não	-
UNIPAMPA	Sistemas de Saneamento Básico	X		Não	Não	-
UNIR	Sistema de Abastecimento de Água	X		Não	Não	-
UFRR	Saneamento Geral	X	-	Não	Não	-
UFSC	Saneamento	X		Não	Não	-
UFS	Sistemas de Abastecimento de Água	X		Não	Não	-

Fonte: Autora, 2025.

Já dentre os cursos observados na rede estadual, em apenas 4 foram identificadas o tópico de perdas nos planos de estudo das disciplinas, sendo todas as delas de caráter obrigatório. Sendo 3 delas denominadas “Saneamento I”, 2 delas com o tópico “Controle e redução de perdas.” encontradas na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) e na Universidade de São Paulo (USP) e na Universidade Estadual do Piauí (UESPI) com o tópico “Gerenciamento de perdas de água”. Na Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL) observou-se a disciplina denominada “Sistema de abastecimento de água” com o

tópico “Operação, manutenção e medição (perdas) dos sistemas de abastecimento de água.”

Identificou-se ainda na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS) a disciplina denominada “Hidráulica Computacional” que traz em sua ementa o tópico “Projetar e operar sistemas de abastecimento de água.”, onde é possível enxergar margem para a abordagem da temática de calibração por direcionar-se ao ramo computacional.

Em 18 cursos foram identificadas disciplinas na área do estudo, com ênfase em sistemas de abastecimento de água, porém não trazem tópicos que abordassem alguma das temáticas, sendo elas a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Universidade do Estado da Bahia (UNEB), Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Universidade Estadual de Goiás (UEG), Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), Universidade Estadual de Londrina (UEL), Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Universidade de Pernambuco (UPE), Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) e a Universidade Estadual de Maringá (UEM). As disciplinas identificadas nesses cursos estão dispostas na tabela 6.

Tabela 6. Identificação das disciplinas voltadas a área de rede de abastecimento de água dos cursos de Engenharia Civil em instituições Estaduais.

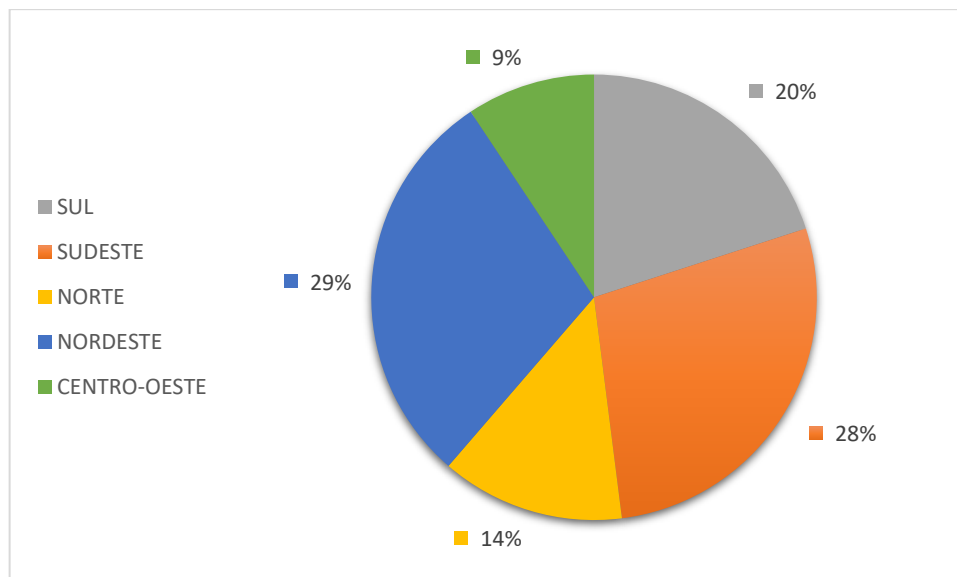
Universidade	Disciplina	Obrigatória	Optativa	Perdas	Calibração	Tópico
UNICAMP	Sistemas de Abastecimento de Águas	X		Não	Não	-
UNESP	Sistemas de abastecimento de água e coleta de esgoto	X		Não	Não	-
UEMG	Sistema de abastecimento de água	X		Não	Não	-

UERJ	Hidráulica Aplicada e Hidrologia	X		Não	Não	-
UENF	Gestão de Recursos Hídricos e Sistemas de Abastecimento		X	Não	Não	-
UNEB	Saneamento Básico	X		Não	Não	-
UEFS	Sistemas de abastecimento e tratamento de água	X		Não	Não	-
UESC	Sistemas de Água, Esgoto e Drenagem	X		Não	Não	-
UEG	Saneamento Básico I	X		Não	Não	-
UEMA	Sistema de Abastecimento de Água	X		Não	Não	-
UEL	Saneamento I	x		Não	Não	-
UEPG	Saneamento I	X		Não	Não	-
UDESC	Sistema de abastecimento de água	X	-	Não	Não	-
UPE	Saneamento I	X		Não	Não	
UEA	Sistema de Abastecimento e Tratamento de Água	X		Não	Não	-
UNEMAT	Sistemas de Abastecimento de Águas e Saneamento	X		Não	Não	-
UEPB	Saneamento I	X		Não	Não	-
UEM	Sistema de abastecimento de água	X		Não	Não	-

Fonte: Autora, 2025.

Dentre as universidades analisadas que ofertam o curso de engenharia civil, realizou-se um levantamento das regiões do Brasil em que se encontram essas instituições. O resultado pode ser observado no gráfico 5.

Gráfico 5. Distribuição das universidades que ofertam o curso de engenharia civil nas regiões do Brasil.

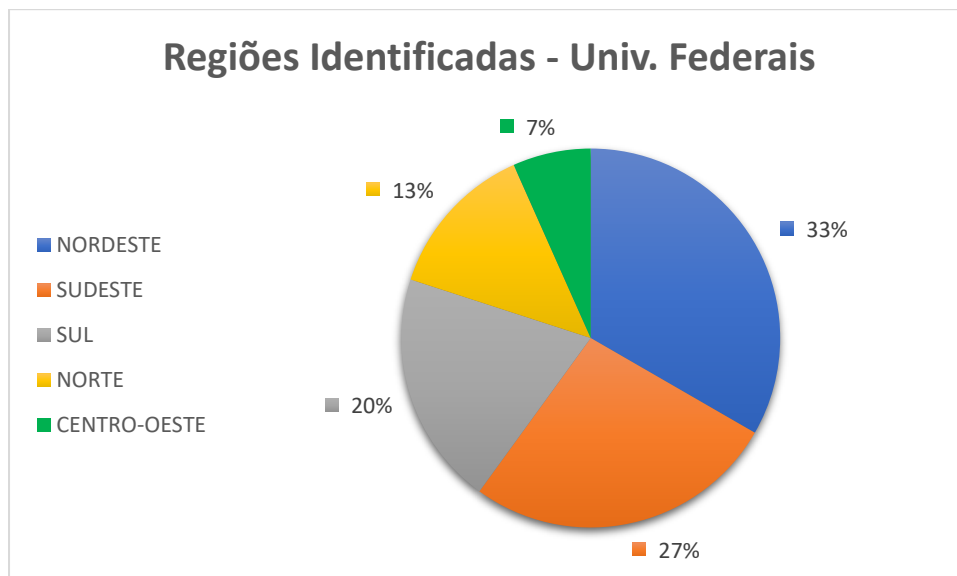


Fonte: Autora, 2025.

No que se trata da dispersão das universidades, observou-se que a maior parte dos cursos se encontram concentrados nas regiões nordeste e sudeste com 29% e 28% dos cursos, respectivamente. Seguido pelas regiões sul e norte que apresentam 20% e 14% respectivamente e a menor parcela está na região centro-oeste com apenas 9% dos cursos.

A partir da identificação dos cursos engenharia civil que apresentam em suas grades curriculares disciplinas que contemplem de alguma forma as temáticas de perda de água e calibração em suas ementas, realizou-se ainda um levantamento das regiões do Brasil em que se encontram essas instituições, federais e estaduais. Essa dispersão está representada nos gráficos 6 e 7.

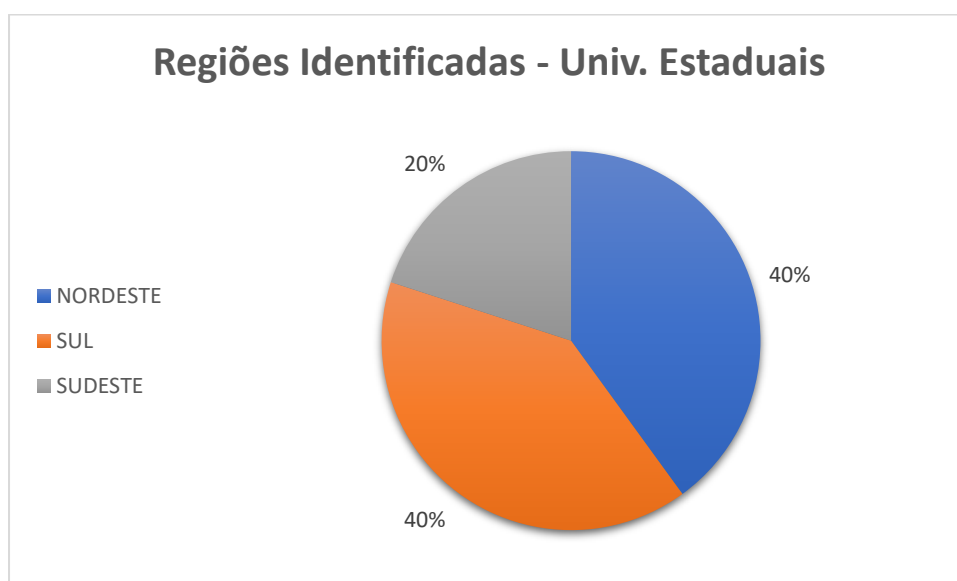
Gráfico 6 - Distribuição das universidades federais com abordagem das temáticas nas regiões do Brasil.



Fonte: Autora, 2025.

No que se trata das universidades federais, apesar de apenas 23% dos cursos apresentarem as temáticas que atendiam ao foco da pesquisa, foram identificados cursos em todas as regiões do Brasil. Predominando nas regiões Nordeste seguida pelo Sudeste com 33% e 27% respectivamente e com menor concentração na região centro-oeste com apenas 7%.

Gráfico 7 - Distribuição das universidades estaduais com abordagem das temáticas nas regiões do Brasil.



Fonte: Autora, 2025.

Enquanto que, nas universidades estaduais encontrou-se cursos com as temáticas em apenas em 3 regiões do país, Nordeste, Sudeste e Sul, ficando o Nordeste e Sul ambas com 40% dos cursos identificados e Sudeste com 20%. Acredita-se que o resultado pode estar ligado ao baixo número de cursos onde houve essa identificação com apenas 16% das universidades analisadas.

O destaque da região nordeste em na preocupação com as temáticas apontadas é especialmente relevante diante da elevada vulnerabilidade hídrica da região. A combinação de escassez estrutural, irregularidade das chuvas e sistemas urbanos frequentemente envelhecidos torna o impacto das perdas ainda mais crítico, comprometendo a segurança hídrica e elevando custos operacionais (ABUETAYEF; ABUALHIN; ALASTAL, 2023). Pesquisas internacionais destacam que áreas semiáridas dependem fortemente da eficiência dos sistemas de abastecimento, e reduções mesmo modestas nas perdas podem gerar ganhos significativos em disponibilidade hídrica, energia e sustentabilidade operacional (LAMBIOTTE; ROUSSEAU; GIUSTOLISI, 2024).

5.4 CONCLUSÕES

A partir da análise realizada nas grades curriculares dos cursos de Engenharia Civil das universidades federais e estaduais brasileiras, foi possível constatar uma lacuna significativa na abordagem das temáticas de calibração de redes de abastecimento e controle de perdas de água. Embora tais conteúdos sejam fundamentais para a formação de profissionais aptos a enfrentar os desafios técnicos e operacionais dos sistemas de abastecimento, sua presença ainda é restrita e pontual, muitas vezes limitada a tópicos secundários em disciplinas mais amplas.

A pesquisa revelou que, nas universidades federais, apenas 26 % dos cursos analisados apresentavam alguma menção direta às temáticas investigadas, com destaque para o controle de perdas, presente em maior número de disciplinas. A temática de calibração hidráulica, por sua vez, é quase inexistente nas ementas curriculares, sendo identificada de forma indireta em apenas uma instituição. Nas

universidades estaduais, o panorama é ainda mais restritivo, com apenas 17 % dos cursos abordando, de modo superficial, conteúdos relacionados às perdas.

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de adoção de práticas ligadas a inovação curricular, de modo a incorporar metodologias que visem disponibilizar e apresentar ao aluno conteúdos relevantes como os relacionados à modelagem computacional, calibração de sistemas hidráulicos e controle de perdas. Uma alternativa seria a oferta de minicursos que possam despertar o interesse do aluno ao tema e seguir com o curso de disciplinas.

Para isso, propõe-se a inclusão de uma disciplina específica de caráter optativo nas grades curriculares dos cursos de Engenharia Civil, com foco no desenvolvimento de competências voltadas ao controle de perdas e a calibração hidráulica de redes de abastecimento

A disciplina sugerida, denominada "Calibração e Detecção de Vazamentos em Redes de Distribuição de Água", tem como objetivo capacitar os estudantes a identificar e classificar perdas, utilizar ferramentas de modelagem e simulação, compreender o processo de calibração de redes hidráulicas, aplicar técnicas de detecção de vazamentos e propor soluções técnicas fundamentadas. A estrutura da disciplina contempla conteúdos teóricos e práticos, abordando desde os conceitos básicos até a aplicação de estudos de caso reais, com bibliografia atualizada e metodologia voltada ao uso de softwares e dados de campo.

Essa proposta visa preencher uma lacuna técnica na formação dos engenheiros civis e estimular a construção de um ensino mais alinhado com a sustentabilidade, a redução de perdas e a modernização da infraestrutura urbana, alinhando a formação acadêmica às necessidades reais do setor.

Assim, este estudo reforça a importância de uma atuação mais propositiva das instituições de ensino superior no alinhamento de seus currículos com as demandas reais do setor, incentivando a formação de engenheiros mais preparados para contribuir com soluções técnicas voltadas à sustentabilidade e à universalização dos serviços de abastecimento de água no país.

REFERENCIAS

ABUELTAYEF, H. T.; ABUALHIN, K. S.; ALASTAL, K. M. Addressing non-revenue water as a global problem and its interlinkages with sustainable development goals. **Water Practice and Technology**, v. 18, n. 12, 2023.

ÁVILA, C. A. M.; ROMERO, F. J. S.; JIMÉNEZ, P. A. L.; SÁNCHEZ, M. P. Improve leakage management to reach sustainable water supply networks through by green energy systems. Optimized case study. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 83, Agosto 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103994>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670722003146?via%3Dihub>. Acesso em: 5 ago. 2025.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Painel SNIS – Abastecimento de Água: dados de 2022**. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/ab>. Acesso em: 07 ago. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Portaria n.º 490, de 20 de dezembro de 2021**. Regulamenta os índices máximos de perda de água para concessão de recursos federais. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/mdr-regulamenta-indices-maximos-de-perda-de-agua-para-concessao-de-recursos-federais-para-saneamento>. Acesso em: 4 ago. 2025.

BURNS, T.; LODGE, J.; SPARROW, L. Rethinking curriculum innovation: evidence from technology-enhanced learning research. **Higher Education Research & Development**, v. 42, n. 6, p. 1123–1139, 2023.

DADEBO, D.; OBURA, D.; KIMERA, D. *Hydraulic modeling and prediction of performance for a drinking water supply system towards the achievement of sustainable development goals (SDGs): A system case study from Uganda*. Groundwater for Sustainable Development, v. 22, p. 100951, 2023. ISSN 2352-801X. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100951. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352801X23000516>. Acesso em: 6 ago. 2025.

DE SANTI, A. D.; CETRULO, T. B.; MALHEIROS, T. F. Water loss control practices in developing countries: a case study of a Brazilian region. *Water Supply*, 2021. DOI: 10.2166/ws.2020.351. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article/21/2/848/78550/Water-loss-control-practices-in-developing>. Acesso em: 6 ago. 2025

DIAZ-ORTIZ, J.; ALVARADO-MEDELLIN, P.; RAMIREZ-AGUILERA, A. M.; BADILLO-ALMARAZ, H.; ORTIZ GOMEZ, R.; BAUTISTA CAPETILLO, C. Water distribution

system calibration using the Finite Element Method coupled to a Genetic Algorithm. *Journal of Water Process Engineering*, v. 54, p. 104017, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714423005366>. Acesso em: 6 ago. 2025.

EVARISTO, J.; JAMEEL, Y.; TORTAJADA, C.; WANG, R. Y.; HORNE, J.; NEUKRUG, H.; PRIMO DAVID, C.; FASNAACHT, A. M.; ZIEGLER, A. D.; BISWAS, A. Water woes: the institutional challenges in achieving SDG 6. *Sustainable Earth Reviews*, v. 6, art. 13, 2023. doi:10.1186/s42055-023-00067-2. Disponível em: <https://sustainableearthreviews.biomedcentral.com/articles/10.1186/s42055-023-00067-2>. Acesso em: 08 ago. 2025.

FAGUNDES, T. S.; MARQUES, R. C.; MALHEIROS, T. F. Impact of efficiency on affordability: a study of the Brazilian new water loss goals. *Water Supply*, v. 24, n. 5, p. 1645–1657, 2024. DOI: 10.2166/ws.2024.098. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article/24/5/1645/102056>. Acesso em: 6 ago. 2025

FURG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE RIO GRANDE. **Projeto pedagógico do curso de engenharia civil**. Rio Grande 2021. Disponível em: https://ee.furg.br/images/PROJETO_PEDAGOGICO_EC_2021_2.pdf

GARCIA, C. A . M.; LÓPEZ-JIMÉNEZ, P. A.; SÁNCHEZ-ROMERO, F. J.; PÉREZ-SÁNCHEZ, M. Assessing water urban systems to the compliance of SDGs through sustainability indicators. Implementation in the valencian community. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 96, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104704>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670723003153>. Acesso em: 7 ago. 2025.

LAMBIOTTE, F.; ROUSSEAU, P.; GIUSTOLISI, O. Smart hydraulic modeling for leakage reduction in water distribution networks. **Water Research**, v. 245, 2024.

LEVALLOIS, P.; VILLANUEVA, C. M. Drinking water quality and human health: an editorial. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 4, art. 631, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16040631>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/16/4/631>. Acesso em: 6 ago. 2025.

LIU, J.; WU, D.; MOHAMMED, H.; SEIDU, R. A Novel Method for Anomaly Detection and Signal Calibration in Water Quality Monitoring of an Urban Water Supply System. **Water**, [s. l.], v. 16, p. 1238, 2024. DOI <https://doi.org/10.3390/w16091238>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/9/1238>. Acesso em: 6 ago. 2025.

MABUZA, N.; KHUMALO, T. Decolonial perspectives in curriculum innovation: transforming higher education through inclusive pedagogies. **Journal of Curriculum Studies**, v. 56, n. 2, p. 145–163, 2024.

MOREIRA, H. A. M.; VILLANUEVA, J. M. M.; GOMES, H. P. Modified hybrid particle swarm optimization: multivariate calibration of water supply networks: RBRH. **Brazilian Journal of Water Resources**, Porto Alegre, v. 30, ed. 17, March 2025. DOI <https://doi.org/10.1590/2318-0331.302520240121>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/ZxdZg6W77PjpmXPSsZ5dvMP/?lang=en>. Acesso em: 6 ago. 2025.

NGUYEN, H.; KIM, Y. Measuring curricular transformation: application of the Course Innovation Framework in higher education. **Studies in Higher Education**, v. 49, n. 1, p. 78–95, 2023.

PAULO, F. S.; PINA, A. A. L. Calibração hidráulica e o controle de perdas: um panorama das práticas adotadas no Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, n. 3, p. 1–12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190159>

PERGHER, R. D.; FREITAS, M. do C. D. *BIM currículo: levantamento nos cursos de Engenharia Civil e Arquitetura das universidades públicas brasileiras*. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE), 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/349038352_BIM_CURRICULO_LEVANTAMENTO_NOS_CURSOS_DE_ENGENHARIA_CIVIL_E_ARQUITETURA_DAS_UNIVERSIDADES_PÚBLICAS_BRASILEIRAS. Acesso em: 3 ago. 2025.

SILVA, J. A. et al. Water supply and wastewater treatment and reuse in future cities: a systematic literature review. **Water**, v. 15, n. 17, art.3064, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15173064>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/17/3064>. Acesso em: 6 ago. 2025.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Abastecimento de Água**. Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/>. Acesso em: 24 jul. 2023.

ŚWIĘTOCHOWSKI, K.; ŚREDZIŃSKI, P.; MALMUR, R.; GWOŹDZIEJ-MAZUR, J. *Analysis of the possibility of energy self-sufficiency of water pumping stations with the use of PV installations*. International Communications in Heat and Mass Transfer, v. 143, p. 106683, 2023. ISSN 0735-1933. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106683. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193323000726>. Acesso em: 6 ago. 2025.

UDESC - UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA. CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT. **PROJETO PEDAGÓGICO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**. Joinville, 2023. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cct/id_cpmenu/1444/Projeto_Pedagogico_do_Curso_1722279730458_1444.pdf

UEA - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS. **Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil.** Manaus, 2016. Disponível em: <https://est.uea.edu.br/upload/PPC59.pdf>

UEFS - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA. **Projeto de reformulação do curso de engenharia civil.** Feira de Santana, 2001. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1gvRjuEDLAp3g-T72t241z0BJho8aseM5/view>

UEG - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS. **Projeto pedagógico unificado do curso de bacharelado em engenharia civil.** Anápolis, 2023. Disponível em: https://cdn.ueg.edu.br/source/pro_reitoria_de_graduacao_26/conteudo_extensao/13111/Projeto_Pedagogico_Unificado_do_Curso_de_Bacharelado_em_Engenharia_Civil.docx_compressed.pdf

UEL - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA. Catálogo dos Cursos de Graduação **Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil.** Londrina, 2024. Disponível em: https://sites.uel.br/prograd/wp-content/uploads/documentos/resolucoes/2022/resolucao_73_22.pdf

UEM - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ. **Projeto pedagógico de curso engenharia civil.** Maringá, 2023. Disponível em: https://www.pen.uem.br/site/public/assets/files/19944F3D475A0C509C267FE117F4A9F8/20240909_083426-ppc_engenharia_civil.pdf

UEMASUL - UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO . **Projeto pedagógico do curso de engenharia civil bacharelado.** Açailândia, 2020. Disponível em: <https://sigaa.uemasul.edu.br/sigaa/verProducao?idProducao=72860&key=5dce0c56223d7e0569ebd29e20dd125e>

UEMG - UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil.** Divinópolis, 2023. Disponível em: <https://www.uemg.br/graduacao/cursos2/course/engenharia-civil>

UEMS - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL. **Projeto pedagógico de curso engenharia civil.** Nova Andradina, 2024. Disponível em: <https://www.uems.br/anexos/download/21805>

UENF - UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE. Centro de Tecnologia. **Projeto pedagógico curso de bacharelado em engenharia civil.** Campos dos Goytacazes, 2022. Disponível em: https://uenf.br/graduacao/wp-content/uploads/2024/01/PPC_Engenharia_Civil.pdf

UEPB - UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA. **Projeto Pedagógico de Curso Engenharia Civil.** Araruna, 2016. Disponível em: <https://uepb.edu.br/prograd/download/0139-2016-ppc-campus-viii-ccts-engenharia-civil-anexo-modificado-em-2018/#>

UEPG - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA. **Planos de Disciplinas.** Ponta Grossa, 2023. Disponível em: <https://www2.uepg.br/bacharelado-engenharia-civil/planos-de-disciplinas/>.

UERJ - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Departamento de Orientação e Supervisão Pedagógica.** Disponível em: https://www.ementario.uerj.br/ementa.php?cdg_disciplina=1393

UESC - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ. **Projeto Pedagógico Curricular do Curso de Engenharia Civil.** Santa Cruz, 2016. Disponível em: https://www.uesc.br/engenhariacivil/arquivos/ppc_engenharia_civil_2016.pdf

UESPI - UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PIAUÍ. Centro de Tecnologia e Urbanismo-CTU. **Estrutura Curricular.** Teresina, 2023. Disponível em: https://sigaa.uespi.br/sigaa/public/componentes/busca_componentes.jsf

UFAC - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE. Instituto de Tecnologia. **Projeto Pedagógico do Curso de Graduação de Bacharelado em Engenharia Civil.** Rio Branco, 2014. Disponível em: <http://www2.ufac.br/ccet/engenharia-civil/projeto-pedagogico-do-curso/projeto-pedagogico-do-curso.pdf/view>. Acesso em: 19 Abril 2024.

UFAL - UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS. Centro de Tecnologia. **Projeto político pedagógico do Curso de Engenharia Civil.** Maceió, Janeiro 2006. Disponível em: <https://ufal.br/estudante/graduacao/projetos-pedagogicos/campus-maceio/ppc-eng-civil.pdf>. Acesso em: 25 out. 2023.

UFAM - UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS. Faculdade de Tecnologia. **Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil.** Manaus. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1WrK2ul8QFF9a2BM4ZVSvQDelfsHk0Yp5/view>. Acesso em: 19 Abril 2024.

UFBA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA. Escola politécnica. **Estrutura Curricular do Curso de Engenharia Civil.** Salvador, 2000. Disponível em: <http://www.eng.ufba.br/curso-graduacao/engenharia-civil>. Acesso em: 27 out. 2023.

UFC - UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Centro de Tecnologia. **Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil.** Fortaleza, Agosto 2022. Disponível em:

https://si3.ufc.br/sigaa/public/curso/ppp.jsf?lc=pt_BR&id=657474. Acesso em: 24 out. 2023.

UFCA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS. **Projeto pedagógico do curso de bacharelado em engenharia civil**. Dourados, 2024. Disponível em: https://drive.google.com/drive/folders/1CNvAv3sRoXHI2oxrsWDRcG05rX_PfttG

UFCA - UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI. **Projeto pedagógico do curso de engenharia civil**. Juazeiro do Norte, 2023. Disponível em: https://documentos.ufca.edu.br/wp-folder/wp-content/uploads/2024/08/ppc_engenharia_civil_cariri_2023.1.pdf

UFCG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE. **Projeto pedagógico do curso de graduação em engenharia civil**. Campina Grande, 2013. Disponível em: <https://portal.ufcg.edu.br/graduacao/cursos-graduacao/297-engenharia-civil-2.html>

UFERSA - UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO. **Projeto político-pedagógico do curso de engenharia civil**. Mossoró, 2012. Disponível em: <https://engcivil.ufersa.edu.br/wp-content/uploads/sites/38/2020/10/PPC.pdf>

UFES - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Engenharia Civil. **Projeto Pedagógico e Estrutura Curricular**. Vitória, 2023. Disponível em: https://civil.ufes.br/sites/engenhariacivil.ufes.br/files/field/anexo/ppc_engenharia_civil.pdf. Acesso em: 19 Abril 2024.

UFF - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE. **Ementa e Conteúdo Programático**. Niterói, 2025. Disponível em: <https://www.uff.br/curso/engenharia-civil/>

UFFS - UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL. **Projeto pedagógico do curso de engenharia civil – bacharelado**. Cerro Largo, 2022. Disponível em: <https://www.uffs.edu.br/uffs/engenharia-civil/documentos>

UFG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. EECA - Escola de Engenharia Civil e Ambiental. **Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil**. Catalão, 2012. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/webby/up/620/o/ppc.pdf>. Acesso em: 19 Abril 2024.

UFG - UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL. **Estrutura Curricular – Curso de Graduação em Engenharia Civil**. Campo Grande, 2023. Disponível em: <https://engenhariacivil-faeng.ufms.br/curso/estrutura-curricular/>. Acesso em: 19 Abril 2024.

UFG - UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO. **Plano de Ensino - Curso de Graduação em Engenharia Civil**. Araguaia, 2023. Disponível em: https://www.ufmt.br/curso/engcivil/pagina/ensino/12676#top_page. Acesso em: 19 Abril 2024.

UFJF - UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. **Projeto pedagógico do curso de graduação em engenharia civil**. Juiz de Fora, 2023. Disponível em: https://www2.ufjf.br/engenhariacivil/wp-content/uploads/sites/372/2023/07/CCEC-PPC-2023.3-Compilacao_2023.07.24.pdf

UFLA - UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. **Projeto pedagógico do curso de engenharia civil (presencial)**. Lavras, 2023. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1Bf2EGmSK-uEyol2VPqa28zVK5nUPNzZO/view>

UFMA - UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO. Centro de Tecnologia. **Estrutura Curricular do Curso de Engenharia Civil**. Aracaju, 2020. Disponível em: <https://sigaa.ufma.br/sigaa/link/public/curso/curriculo/20619327>. Acesso em: 27 out. 2023.

UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Engenharia Civil. **Matriz Curricular**. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://colcivil.eng.ufmg.br/matriz-curricular/>. Acesso em: 19 Abril 2024.

UFNIR - UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA. Nucleo de Tecnologia. **Projeto Pedagógico do Curso de Graduação de Bacharelado em Engenharia Civil**. Porto Velho, 2022. Disponível em: <http://www2.ufac.br/ccet/engenharia-civil/projeto-pedagogico-do-curso/projeto-pedagogico-do-curso.pdf/view>. Acesso em: 19 Abril 2024.

UFOB - UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA. **Projeto Pedagógico de curso Engenharia Civil**. Barreiras, 2016. Disponível em: https://ufob.edu.br/ensino/graduacao/engenharia-civil/copy_of_PPC_EngenhariaCivil_sem_realces.pdf

UFPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. Instituto de Tecnologia. **Projeto Pedagógico**. Belém. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/10ghqyUMy-RrqRzGXbbAhRSi4XuM8oanD/view>. Acesso em: 19 Abril 2024.

UFPB - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA. Centro de Tecnologia. **Estrutura Curricular do Curso de Engenharia Civil**. João Pessoa, 2006. Disponível em: https://sigaa.ufpb.br/sigaa/public/curso/curriculo.jsf?lc=pt_BR&id=1626738. Acesso em: 25 out. 2023.

UFPE - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PERNAMBUCO. Centro de Tecnologia. **Projeto político pedagógico do Curso de Engenharia Civil Campus Recife.** Recife, setembro 2012. Disponível em: https://www.ufpe.br/documents/20181/0/PPC-Engenharia_Civil_UFPE_Perfil_3119_Versao_Final.pdf/935c886a-e26d-4fda-a33b-5244352b0916. Acesso em: 26 out. 2023.

UFPEL - UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS. **PPC ANEXOS.** Pelotas, 2017. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/engciv/files/2020/07/ANEXOS.pdf>

UFPI - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ. Centro de Tecnologia. **Proposta de reformulação curricular do curso de Engenharia Civil.** Teresina, 2008. Disponível em: file:///C:/Users/Cliente/AppData/Local/Temp/MicrosoftEdgeDownloads/a7c08616-53c1-4c8a-9318-40c5190d0283/PPPCivil_ufpi.pdf. Acesso em: 27 out. 2023.

UFPR - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Setor de Tecnologia - TC. **Plano de Ensino.** Curitiba, 2023. Disponível em: <https://tecnologia.ufpr.br/ccec/wp-content/uploads/sites/32/2022/05/Saneamento-Ambiental-I-TH028.pdf>. Acesso em: 19 Abril. 2024.

UFRGS - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil. **Grade Curricular.** Porto Alegre. Disponível em: <https://www1.ufrgs.br/RepositorioDigitalAbreArquivo.php?78F699285A62&115>. Acesso em: 19 Abril 2024.

UFRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. Engenharia Civil Poli-UFRJ. **Grade Curricular.** Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.siga.ufrj.br/sira/temas/zire/frameConsultas.jsp?mainPage=/repositorio-curriculo/D525E5A9-92A4-F79D-5F51-DA5557EC7326.html>. Acesso em: 19 Abril 2024.

UFRN - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. Centro de Tecnologia. **Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil.** Natal, Outubro 2011. Disponível em: https://sigaa.ufrn.br/sigaa/public/curso/ppp.jsf?lc=pt_BR&id=2000025. Acesso em: 24 out. 2023.

UFRR - UNIVERSIDADE FEDERAL DE RORAIMA. Centro de ciências e Tecnologia. **Curso de Engenharia Civil.** Boa Vista, 2024. Disponível em: <https://ufrr.br/engcivil/documentos-para-download/>. Acesso em: 19 Abril 2024.

UFS - UNIVERSIDADE FEDERAL DO SERGIPE. Centro de Tecnologia. **Projeto Pedagógico do Curso de Graduação em Engenharia Civil**. Aracaju, 15 nov. 2023. Disponível em: https://ccet.ufs.br/uploads/page_attach/path/9834/PPC_-_Engenharia_Civil__1_.pdf. Acesso em: 27 out. 2023.

UFSB - UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL DA BAHIA. **Projeto pedagógico do curso bacharelado em engenharia civil**. Teixeira de Freitas, 2020. Disponível em: https://ufsb.edu.br/cfdt/images/Documentos/PPC_Engenharia_Civil_v.Aprovada_no_CONSUNI.pdf

UFSC - UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO. **Projeto pedagógico do curso de engenharia civil bacharelado**. São Luis, 2024. Disponível em: <https://www.prog.uema.br/wp-content/uploads/2025/03/Projeto-Pedagogico-do-curso-de-Engenharia-Civil-do-CCT-2024-1.pdf>

UFSC - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Curso de graduação em Engenharia Civil - ECV/CTC - UFSC. **Currículo do Curso**. Florianópolis, 2020. Disponível em: https://ecv.grad.ufsc.br/files/2023/11/Curriculo_atualizado2023_2.pdf. Acesso em: 19 Abril. 2024.

UFSCAR - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS. **Projeto pedagógico do curso de bacharelado em engenharia civil (PPC 2025)**. São Paulo, 2025. Disponível em: https://www.prograd.ufscar.br/pt-br/assets/arquivos/cursos/cursos-oferecidos/engenharia-civil/ppc_eciv_2025_versao_3_7_11_2024_enviado_para_didped-1.pdf

UFSJ - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI. **Projeto pedagógico de curso engenharia civil**. Disponível em: https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ccivi/PPC/PPC2023/Res023Conep2023_ppc_engenharia_civil_-_primeira_reviso_-_final.pdf

UFMS - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. **Projeto pedagógico do curso de engenharia civil**. Santa Maria, 2023. Disponível em: <https://portal.ufsm.br/websevice/itemPPP/item/arquivo.html?item=64115>

UFT - UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS. Centro Engenharias. **Ementas de Civil**. Palmas, 2009. Disponível em: <https://www.uft.edu.br/centroengenharias/ementas/>. Acesso em: 19 Abril 2024.

UFTM - UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIANGULO MINEIRO. **Projeto pedagógico do curso de graduação em engenharia civil**. Uberaba, 2024. Disponível

em:<https://sistemas.uftm.edu.br/integrado/?to=magic%3A9299d1ba9d7fa89a5de0a01a&secret=uftm>

UFTPR - UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **Projeto Pedagógico do Curso de Graduação em Engenharia Civil**. Toledo, 2014. Disponível em: <https://www.uftpr.edu.br/cursos/coordenacoes/graduacao/toledo/td-engenharia-civil/documentos/projeto-pedagogico-matriz-45.pdf/@@download/file>

UFU - UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. **Projeto pedagógico do curso de graduação em engenharia civil**. Uberlândia, 2022. Disponível em:https://feciv.ufu.br/sites/feciv.ufu.br/files/media/documento/ppc_eng._civil_versao_final.pdf

UFV - UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **Projeto pedagógico do curso de graduação em engenharia civil**. Viçosa, 2022. Disponível em:https://drive.google.com/file/d/16sa7swNQ63C2-96KnmpsHmXF_y0F5hhS/view

UFVJM - UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI. **Projeto pedagógico do curso de graduação em engenharia civil**. Teófilo Otoni, 2023. Disponível em: http://site.ufvjm.edu.br/icet/files/2022/02/PPC-Engenharia-Civil-27-03-23_compressed.pdf

UNB - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. **Estrutura Curricular - Curso de Graduação em Engenharia Civil**. Brasília, 2016. Disponível em: <https://sigaa.unb.br/sigaa/public/curso/curriculo.jsf>. Acesso em: 2 Julho 2024.

UNEB - UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA. Centro de Tecnologia. **Ementário Engenharia**. Salvador, 2024. Disponível em: <https://www.dcet1.uneb.br/wp-content/uploads/2021/03/EMENTARIO-ENGENHARIA.pdf>

UNEMAT - UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO. **Projeto Pedagógico do Curso Turma Fora de Sede de Bacharelado em Engenharia Civil**. Rondonópolis, 2021. Disponível em: https://sigaa.unemat.br/sigaa/public/curso/ppp.jsf?lc=pt_BR&id=22616431

UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Civil**. Ilha Solteira, 2013. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/Graduacao/cursos/projeto-pedagogico--civil-2019.pdf>

UNICAMP - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. **Engenharia Civil - Proposta para Cumprimento de Currículo**. Campinas, 2022. Disponível em:

<https://www.dac.unicamp.br/sistemas/catalogos/grad/catalogo2022/cursos/12g/sugestao.html>

UNIFAL - UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS. **Projeto pedagógico do curso de graduação em engenharia civil.** Poços de Caldas, 2022. Disponível em: <https://academico.unifal-mg.edu.br/sitecurso/arquivositecurso.php?arquivoid=514>

UNIFAP - UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ. Curso de Engenharia Civil. **Matriz Curricular.** Macapá, 2024. Disponível em: https://www2.unifap.br/engcivil/files/2014/01/MATRIZ_CURRICULAR_ENG_CIVIL_UNIFAP_OPTATIVAS1.pdf. Acesso em: 19 Abril 2024.

UNIFEI - UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ. **Projeto pedagógico do curso de graduação em engenharia civil.** Itajubá, 2021. Disponível em: <https://sigaa.unifei.edu.br/sigaa/verProducao?idProducao=2095847&&key=9190eff7abd54bd8090f87d7d5e70b80>

UNIFESSPA - UNIVERSIDADE FEDERAL SUL E SUDESTE DO PARÁ. **Projeto pedagógico do curso de engenharia civil.** Marabá, 2017. Disponível em: <https://civil.unifesspa.edu.br/images/Legislacao/PPC-CIVIL-2018-compressed.pdf>

UNILA - UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA. **Projeto pedagógico do curso de graduação em engenharia civil de infraestrutura.** Foz do Iguaçu, 2019. Disponível em: https://portal.unila.edu.br/graduacao/engenharia-civil-infraestrutura/copy2_of_PPCdeECI3VersoPadronizaodareadaMatemticaSiteoptativasasPPC.pdf

UNIOESTE - UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ. **Projeto Político-Pedagógico do curso de graduação em Engenharia Civil - Bacharelado, do campus de Cascavel.** Cascavel, 2023. Disponível em: <https://midas.unioeste.br/sgav/arqVrtConteudo/download?arqCntCodigo=592008>

UNIPAMPA - UNIVERSIDADE FEDERAL DE PAMPA. **PROJETO PEDAGÓGICO DO CURSO ENGENHARIA CIVIL 2010 Revisado em dezembro de 2018.** Alegrete, 2010. Disponível em: <https://cursos.unipampa.edu.br/cursos/engenhariacivil/files/2021/06/ppc-revisao-2018.pdf>

UNIVASF - UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO. **Projeto pedagógico do curso de engenharia civil.** Petrolina, 2008. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1OkFdMzNfIZYE7vL_UCgCOL73QTbaT7w8/view

UPE - UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO. Centro Engenharias. **Projeto pedagógico do curso de graduação**. Recife, 2020. Disponível em: https://upe.br/anexos/graduacao/PPC_ENGENHARIA_CIVIL.pdf

USP - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Grade Curricular - Engenharia Civil**. Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://uspdigital.usp.br/jupiterweb/listarGradeCurricular?codcg=18&codcur=18023&codhab=0&tipo=N>. Acesso em: 18 Abril 2024.

ZANFEI, A.; MENAPACE, A.; SANTOPIETRO, S.; RIGHETTI, M. Calibration procedure for water distribution systems: comparison among hydraulic models. *Water*, v. 12, n. 5, art. 1421, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12051421>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/5/1421>. Acesso em: 08 ago. 2025.

ZHU, X.; LIU, Q.; WANG, L. Digital transformation and competency-based curriculum innovation: a systematic review. **Computers & Education**, v. 205, e105312, 2024.

Disciplina Proposta: Calibração e Detecção de Vazamentos em Redes de Distribuição de Água

Carga Horária Sugerida:

60 horas (4 créditos)

Natureza: Optativa

Ementa

Conceitos fundamentais de perdas de água em sistemas de abastecimento. Classificação e causas de perdas reais e aparentes. Modelagem hidráulica de redes de distribuição. Fundamentos e aplicação da calibração hidráulica. Métodos de detecção de vazamentos em redes pressurizadas. Integração de softwares de simulação (ex: EPANET) com dados de campo. Estudo de casos reais. Aspectos operacionais e econômicos da redução de perdas.

Objetivos da Disciplina

- Capacitar o aluno a identificar e classificar perdas de água em sistemas de abastecimento.
 - Apresentar os fundamentos da calibração hidráulica como ferramenta para a detecção de vazamentos.
 - Desenvolver competências práticas no uso de ferramentas computacionais e análise de dados hidráulicos.
 - Propor estratégias de controle e redução de perdas em redes urbanas, com foco na eficiência hídrica e sustentabilidade.
-

Conteúdo Programático

- 1. Introdução às perdas em sistemas de abastecimento**
 - Tipos de perdas: reais e aparentes
 - Impactos operacionais, econômicos e ambientais
- 2. Modelagem hidráulica de redes pressurizadas**
 - Conceitos básicos: nós, trechos, reservatórios, bombas, válvulas
 - Introdução ao EPANET: construção de modelos, entrada de dados e interpretação de resultados
- 3. Calibração hidráulica**
 - Definições e etapas do processo
 - Parâmetros de calibração (rugosidade, consumos, pressões)
 - Métodos de calibração: tentativa e erro, algoritmos e otimização
 - Importância dos dados de campo

4. **Deteção de vazamentos**
 - Métodos acústicos, correlacionadores, balanço hídrico
 - Integração com modelos hidráulicos
 - Identificação de anomalias em redes simuladas e reais
 5. **Estudos de caso e aplicação prática**
 - Análise de redes reais
 - Projetos e simulações com base em dados sintéticos ou reais
 6. **Normas e diretrizes técnicas**
 - Marco Legal do Saneamento
 - Normas da ABNT, Portaria n.º 490/2021 e SNIS
-

Metodologia

- Aulas expositivas com uso de recursos audiovisuais
 - Atividades práticas em laboratório de informática
 - Estudos dirigidos com base em dados reais ou simulados
 - Trabalhos em grupo e seminários temáticos
 - Projeto final com proposta de análise e calibração de rede fictícia ou real
-

Bibliografia Básica

- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Portaria n.º 490, de 20 de dezembro de 2021.
 - WALSKI, T. M. et al. *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Bentley Institute Press, 2003.
 - ROSSMAN, L. A. *EPANET 2 Users Manual*. U.S. Environmental Protection Agency, 2000.
 - MARTINS, Pedro. *Redes de Distribuição de Água: Projeto, Operação e Manutenção*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.
 - PAULO, F. S.; PINA, A. A. L. Calibração hidráulica e o controle de perdas: um panorama das práticas adotadas no Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, n. 3, 2020.
-

Bibliografia Complementar

- TUCCI, C. E. M. *Águas Urbanas: gestão e projeto de drenagem*. 4. ed. Porto Alegre: ABRH, 2018.
 - RAMALHO, R. S. *Introdução ao Tratamento de Águas de Abastecimento*. 5. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2017.
 - ALEGRE, H. et al. *Performance Indicators for Water Supply Services*. IWA Publishing, 2016.
 - MAYS, L. W. *Water Distribution Systems Handbook*. McGraw-Hill, 2000.
-

6 CONCLUSÕES GERAIS

O presente trabalho alcançou seu objetivo central de desenvolver um modelo computacional capaz de identificar a localização de perdas de água em redes de distribuição a partir da análise de pressões. O modelo, implementado com suporte de técnicas de aprendizado de máquina, demonstrou capacidade satisfatória de identificar padrões associados a vazamentos, confirmando seu potencial como ferramenta de apoio à gestão operacional de sistemas de abastecimento.

As simulações realizadas, contemplando distintas hipóteses de perdas, evidenciaram que a análise de dados de pressão, quando aliada à calibração hidráulica, oferece resultados precisos na detecção de anomalias. Os experimentos mostraram que a integração entre o software EPANET e algoritmos de inteligência computacional possibilita a redução do tempo de diagnóstico e o aprimoramento das ações corretivas, contribuindo para a eficiência operacional e a sustentabilidade do sistema.

Paralelamente, a análise das grades curriculares de cursos de Engenharia Civil em universidades federais e estaduais revelou que a abordagem prática sobre calibração e controle de perdas ainda é limitada no ensino superior. Esse cenário reforça a necessidade de modernização dos currículos, de modo a contemplar de forma mais abrangente conteúdos que unam teoria, simulação e aplicação prática. Nesse sentido, foi elaborada a proposta de uma disciplina específica sobre busca de vazamentos por meio de calibração, acompanhada de ementa e bibliografia, visando fortalecer a formação de profissionais aptos a lidar com os desafios atuais da gestão de redes de abastecimento.

Em síntese, os resultados obtidos demonstram que a aplicação de técnicas de modelagem hidráulica combinadas com aprendizado de máquina pode ampliar significativamente a capacidade de monitoramento e controle de perdas de água. Ao mesmo tempo, evidenciam que o avanço tecnológico deve caminhar em paralelo com a atualização da formação acadêmica, garantindo que os futuros engenheiros civis disponham de ferramentas e competências adequadas para promover sistemas de distribuição mais eficientes, resilientes e sustentáveis.