UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL OLIVEIRA CORREIA DE SOUSA

TÉCNICAS PARA PESQUISA DE VAZAMENTOS DE ÁGUA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

João Pessoa – PB
2024

GABRIEL OLIVEIRA CORREIA DE SOUSA

TÉCNICAS PARA PESQUISA DE VAZAMENTOS DE ÁGUA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Universidade Federal da Paraíba como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Gilson Barbosa Athayde Júnior

João Pessoa - PB

2024

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S725t Sousa, Gabriel Oliveira Correia de.
Técnicas para pesquisa de vazamentos de água em sistemas de abastecimento / Gabriel Oliveira Correia de Sousa. - João Pessoa, 2024.
45 f. : il.

Orientação: Gilson Barbosa Athayde Júnior.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Perdas de água. 2. Sistema de abastecimento. 3. Vazamentos. I. Athayde Júnior, Gilson Barbosa. II. Título.

UFPB/CT/BSCT CDU 62(043.2)

Elaborado por ONEIDA DIAS DE PONTES - CRB-15/198

FOLHA DE APROVAÇÃO

GABRIEL OLIVEIRA CORREIA DE SOUSA

TÉCNICAS PARA PESQUISA DE VAZAMENTOS DE ÁGUA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso em 09/05/2024 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br
GILSON BARBOSA ATHAYDE JUNIOR
Data: 10/05/2024 08:35:26-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

APROVADO

Prof. Dr. Gilson Barbosa Athayde Júnior
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Documento assinado digitalmente
gov.br
ANA CLAUDIA FERNANDES MEDEIROS BRAGA
Data: 10/05/2024 09:07:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

APROVADO

Profa. Dra. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Documento assinado digitalmente
gov.br
LEONARDO VIEIRA SOARES
Data: 10/05/2024 08:46:55-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

APROVADO

Prof. Dr. Leonardo Vieira Soares
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

À minha esposa, Deborah Kalynne, e meu filho, Guilherme Henrique.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado sabedoria e forças para estudar e poder realizar este curso.

A minha esposa, Deborah, por estar ao meu lado todos os dias, pelo apoio, pelo amor, carinho e paciência.

Aos meus pais, Wamberto e Lucélia. pelo incentivo, pela paciência, pelos cuidados e apoio em minha vida.

Ao meu irmão, Gustavo, pela amizade e companhia.

A minha tia, Lucy, pelos conselhos, sugestões e apoio durante essa jornada.

Aos meus amigos, Luiz Felipe, Rogério Netto, Vinícius Dantas e Cândido Alfredo, pela amizade, compreensão, conselhos e conversas que trouxeram leveza durante a graduação e fora dela.

Ao Prof. Dr. Gilson Barbosa, pela orientação e parceria.

Aos professores da Graduação, por todos os conhecimentos compartilhados.

“Há água suficiente para satisfazer as crescentes necessidades do mundo, mas não sem mudar a forma de geri-la.”.

Relatório Mundial sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos – ONU

Resumo

A detecção precoce e eficaz de vazamentos de água em sistemas de abastecimento é crucial para garantir a utilização sustentável dos recursos hídricos e reduzir as perdas financeiras das empresas responsáveis pelo saneamento. Foram exploradas várias técnicas e metodologias usadas para identificar vazamentos em redes de distribuição de água, com o intuito de oferecer uma visão abrangente das abordagens comuns e inovadoras atualmente disponíveis em artigos, monografias, teses e dissertações, a partir de palavras-chaves associadas ao título. Este projeto tem como objetivo colaborar com o progresso do entendimento e das práticas no campo da gestão de recursos hídricos, trazendo informações úteis para profissionais, pesquisadores e gestores que atuam na operação e manutenção de sistemas de distribuição de água. Destacou-se a importância estratégica da detecção de vazamentos, não apenas como medida para conservação da água, mas também como prática essencial na manutenção da infraestrutura de abastecimento hídrico e na garantia da qualidade dos serviços prestados à comunidade. Foram apresentados tanto os métodos tradicionais de detecção, como a escuta por haste e geofone, quanto tecnologias avançadas, incluindo radar de penetração no solo, injeção de gás, imagens térmicas por sensores infravermelhos, além de modelos baseados em software como redes neurais artificiais, análise por método inverso e transiente inverso. Por fim, foi possível identificar que a eficácia de cada método varia de acordo com as características específicas de cada sistema, dependendo não só do fluxo e pressão, mas, também, do tipo de solo e suas adjacências, bem como o material empregado na tubulação do trecho analisado.

Palavras-chave: Perdas de água, sistema de abastecimento, vazamentos.

Abstract

Early and effective detection of water leaks in supply systems is crucial to ensure the sustainable use of water resources and reduce financial losses for companies responsible for sanitation. Various techniques and methodologies used to identify leaks in water distribution networks were explored, with the aim of offering a comprehensive view of common and innovative approaches currently available in articles, monographs, theses and dissertations, based on keywords associated with the title. This project aims to collaborate with the progress of understanding and practices in the field of water resources management, providing useful information for professionals, researchers and managers who work in the operation and maintenance of water distribution systems. The strategic importance of leak detection was highlighted, not only as a measure for water conservation, but also as an essential practice in maintaining water supply infrastructure and guaranteeing the quality of services provided to the community. Both traditional detection methods, such as rod and geophone listening, and advanced technologies were presented, including ground-penetrating radar, gas injection, thermal imaging by infrared sensors, as well as software-based models such as artificial neural networks, analysis by inverse and inverse transient method. Finally, it was possible to identify that the effectiveness of each method varies according to the specific characteristics of each system, depending not only on flow and pressure, but also on the type of soil and its surroundings, as well as the material used in the piping. of the analyzed section.

Key words: Water losses, supply system, leaks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução do percentual de perdas na distribuição de água no Brasil. 15
Figura 2 – Unidade do sistema de abastecimento de água. 20
Figura 3 – Classificação dos vazamentos. 22
Figura 4 – Classificação de técnicas de detecção de vazamentos 23
Figura 5 – Esquema do geofone mecânico em operação.....27
Figura 6 – Método de detecção de vazamentos baseado no intervalo de tempo que o sinal acústico gerado leva para atingir diferentes sensores.....28
Figura 7 – Equipamentos para a injeção de gás.....29
Figura 8 – Dados obtidos para a busca de vazamentos pelo método da termografia. 31
Figura 9 – Princípio do radar de penetração no solo. 32
Figura 10 – Equipamento GPR: (1) Unidade de Controle; (2) Antena transmissora; (3) Antena Receptora; (4 e 5) Unidade de exibição/monitoramento; (6) Odômetro.....33

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Perdas físicas e aparentes 14
Quadro 2 – Impactos resultantes da redução de perdas. 16
Quadro 3 – Palavras-chave da pesquisa. 25
Quadro 4 – Identificação de peças e esquema de utilização da haste de escuta. ... 26
Quadro 5 – Vantagens e desvantagens dos métodos baseados em hardware. 38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequência Central X Profundidade máxima de penetração do GPR.....33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14
1.1. Objetivos 15
1.2. Justificativa 15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 17
2.1. Contextualização histórica 17
2.1.1. Contextualização histórica no Brasil 18
2.2. Sistema de abastecimento de água 20
2.3. Perda de água 22
3. METODOLOGIA 24
4. MÉTODOS BASEADOS EM *HARDWARE* 25
4.1. Métodos acústicos 25
4.1.1. Haste de escuta e geofone 25
4.1.2. Correlacionador de ruídos 28
4.2. Métodos não acústicos 29
4.2.1. Injeção de gás 29
4.2.2. Termografia 30
4.2.3. Radar de penetração no solo (GPR) 31
5. MÉTODOS BASEADOS EM *SOFTWARE* 34
5.1. Métodos de modelos numéricos 35
5.1.1. Método por análise inversa (MI) 35
5.1.2. Método por análise transiente inversa (MTI) 35
5.2. Métodos de modelos não-numéricos 36
6. ANÁLISE DE RESULTADOS 37
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS 38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 40

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso fundamental e de extrema valia para a vida no planeta Terra. Ela representa grande importância, não só biológica, como também econômica e social, para a sobrevivência humana (Miranda, 2018).

Segundo Cambrainha *et al.* (2015), o Brasil possui cerca de 12% de toda a água doce existente, entretanto, não há uma distribuição otimizada desse recurso. É possível exemplificar a região Norte do país, pois apresenta grande disponibilidade hídrica, mas uma pequena demanda devido à população baixa, porém, em outras regiões, como o Nordeste, a demanda de água é escassa em frente à quantidade de pessoas que necessitam desse recurso.

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, SNIS (2023), 37,8% da água captada para abastecimento não chega ao consumidor final e essa parcela é denominada “perda”.

Pode-se definir as perdas em dois tipos: as físicas ou reais, que envolvem a parcela de água não consumida, e as não físicas (aparentes), que se referem às águas consumidas, mas não registradas, como mostra o **Quadro 1** (Campos, 2023, p. 20).

Quadro 1 – Perdas físicas e aparentes

Perdas de água	
Perdas físicas	Perdas aparentes
Vazamento nas tubulações de bruta e no tratamento (quando aplicável); Vazamento nas adutoras ou rede de distribuição; Vazamento ou extravasamento nos reservatórios; Vazamento nos ramais (montante do ponto de medição).	Uso não autorizado (fraudes e falhas de cadastro) Erro de medição (micromedição)

Fonte: Adaptado Campos (2023 p. 20).

Fenzl, Mendes e Fernandes (2010) corroboram dizendo que as perdas físicas (reais), que ocorrem nas estruturas do sistema de abastecimento como tubulações, registros, extravasamento de reservatórios, ligações prediais, antes de alcançar o consumidor final, representando a parcela de água não consumida e as perdas não

físicas (aparentes), que correspondem ao volume de água utilizado e não faturado pela concessionária.

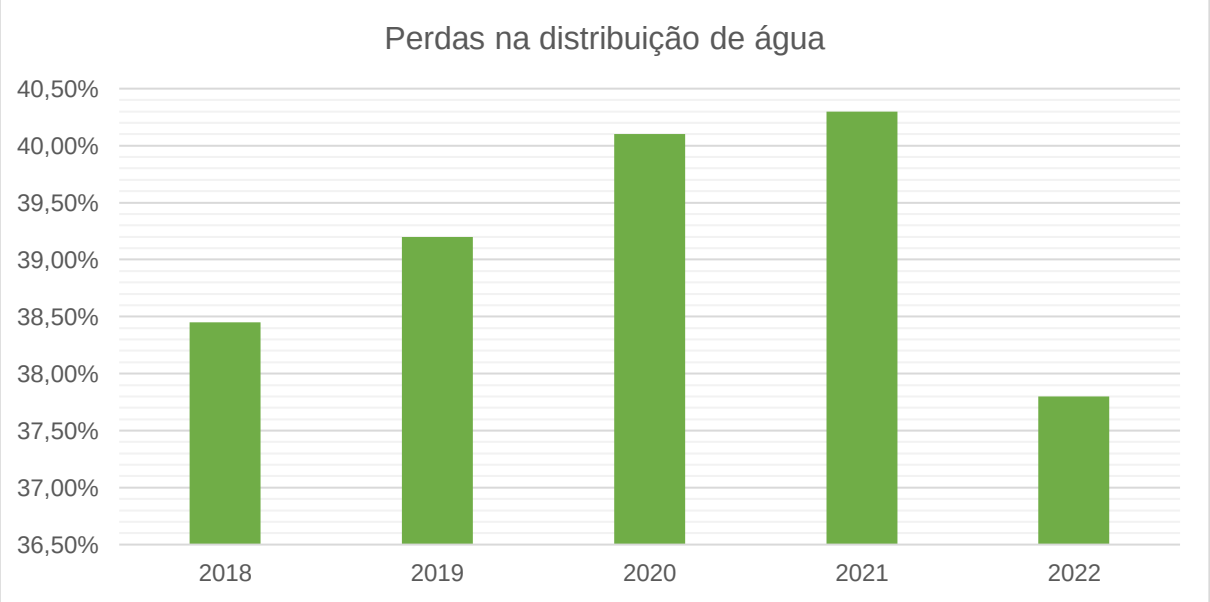
1.1. Objetivos

Descrever e analisar diferentes técnicas utilizadas na detecção de vazamentos de água em sistemas de abastecimento através de uma revisão bibliográfica abrangente.

1.2. Justificativa

Um dos principais problemas quando se trata de universalizar o acesso à água potável são as perdas de água. No Brasil, grande parte da água que é captada no abastecimento não chega ao consumidor final, devido às perdas, como mostra a **Figura 1** (SNIS, 2023).

Figura 1 – Evolução do percentual de perdas na distribuição de água no Brasil.



Fonte: Adaptado SNIS, 2023.

Segundo Kusterko *et al.* (2018), no cenário das iniciativas voltadas para a redução de perdas em sistemas de abastecimento de água, é estratégico no processo decisório, visando garantir a sustentabilidade e a competitividade da companhia em meio à concorrência atual. Dito isso, investir no controle e na diminuição de perdas traz benefícios em várias esferas, como mostra o **Quadro 2**:

Quadro 2 – Impactos resultantes da redução de perdas.

Esfera	Benefício
Ambiental	Diminuição dos impactos ambientais causados pela extração além do necessário.
Econômica	Redução dos custos operacionais; Aumento do faturamento a curto prazo.
Energética	Economia de energia; Eficiência energética.
Sociocultural	Ações e campanas sociais e educativas acerca da redução de perdas.
Tecnológica	Modernização de equipamentos; Capacitação técnica.

Fonte: Adaptado Kusterko (2018, p. 616).

A questão do desperdício de água, segundo Lima (2022), abrange não apenas práticas excessivas no âmbito doméstico, como a lavagem prologada de calçadas e banhos prolongados com registros abertos, mas também assume proporções mais significativas quando observada nos sistemas de abastecimento, como vazamentos em tubulações. Isso eleva consideravelmente a gravidade do problema.

A diminuição das perdas físicas, de acordo com Fenzl, Mendes e Fernandes (2010) e Corrêa (2018), resulta em uma redução nos custos de produção, graças à diminuição das despesas com energia, produtos químicos e mão de obra, permitindo um aumento na produção de água sem a necessidade de expandir o sistema. Já a redução das perdas não físicas contribui para o aumento na arrecadação, proporcionando uma prestação de serviço mais eficiente por parte da companhia, baseada em uma política tarifária mais justa. Além disso, essas medidas podem evitar custos associados ao aumento do consumo de energia, às demandas por combustível em usinas de energia, além de prevenir danos ambientais.

Gamboa-Medina e Reis (2009) destacam a relevância e a variedade dos impactos causados pelos vazamentos nas redes de distribuição, aliadas à sua alta incidência nos sistemas municipais ao redor do mundo, destacam o controle de vazamentos, especialmente sua detecção e localização, como um tema de considerável interesse no contexto dos recursos hídricos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A crescente demanda por água potável, aliada às mudanças climáticas e ao crescimento urbano, intensifica a necessidade de gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos. A pesquisa de vazamento em sistemas de abastecimento assume papel crucial para mitigar perdas e promover a sustentabilidade. Esta seção da fundamentação teórica visa estabelecer uma breve contextualização histórica da evolução dos sistemas de abastecimento de água no mundo e no Brasil, uma base conceitual sólida para compreender a importância dessa pesquisa, com conceitos fundamentais sobre sistema de abastecimento de água, como vazamento de água e sustentabilidade.

Esclarecendo os principais conceitos relacionados à gestão hídrica e às perdas de água nos sistemas de abastecimento é possível estabelecer uma base sólida para a análise e compreensão das metodologias de pesquisa de vazamento em sistemas de abastecimento com foco na eficiência e sustentabilidade.

De acordo com Misiunas (2005), as metodologias para a busca e detecção de vazamento podem ser divididas em dois grupos: inspeção e o monitoramento. A inspeção visa à manutenção preventiva e também pode ser uma ferramenta de gestão. Por outro lado, o monitoramento propõe detectar vazamentos em tempo real, garantindo a confiabilidade do sistema e a segurança da água.

2.1. Contextualização histórica

A história dos sistemas de abastecimento de água é intrinsecamente ligada à evolução das sociedades e à necessidade fundamental de acesso à água potável. Ao longo dos séculos, ocorreu uma progressão notável desde as primeiras formas rudimentares de distribuição até sistemas modernos altamente complexos. Essa evolução não apenas reflete avanços tecnológicos, mas também uma crescente conscientização sobre a importância da conservação da água e a redução das perdas hídricas.

De acordo com Klauck (2018), nos primórdios das civilizações, as comunidades dependiam de fontes naturais de água, como rios e poços, para atender às suas necessidades. Os sistemas de transporte e distribuição eram simples, muitas vezes

envolvendo aquedutos rudimentares e canais para levar a água até os centros populacionais.

Segundo Da Silva (1998) e Rocha (2018), as civilizações antigas, como a romana e a grega, introduziram avanços significativos na engenharia hidráulica. Aquedutos elaborados e sistemas de encanamento foram construídos para fornecer água a áreas urbanas. Entretanto, a preocupação predominante era mais com a oferta de água do que com as perdas associadas.

Durante a Idade Média, a escassez de água potável era comum, e as cidades frequentemente enfrentavam desafios significativos para fornecer água de maneira consistente, devido a muitas das realizações hidráulicas antigas tivessem sido esquecidas ou negligenciadas (Gonçalves, 2017).

Ainda de acordo com Da Silva (1998), com o Renascimento e a Revolução Industrial, houve um ressurgimento do interesse na gestão da água. Novas tecnologias, como bombas e tubulações de ferro fundido, permitiram avanços significativos nos sistemas de abastecimento. A preocupação com as perdas, no entanto, ainda não estava no centro das atenções.

Durante o século XIX, com o crescimento urbano acelerado, a necessidade de sistemas de abastecimento de água mais eficiente tornou-se evidente (Da Silveira, 2009). O surgimento de grandes cidades trouxe consigo desafios inéditos, incluindo perdas significativas de água devido a vazamentos e infraestruturas inadequadas.

Ainda segundo Da Silveira (2009), o século XX testemunhou avanços tecnológicos consideráveis nos sistemas de abastecimento, com a introdução de materiais mais duráveis e métodos mais avançados de distribuição. A preocupação com as perdas hídricas cresceu à medida que a consciência ambiental se tornou uma prioridade global.

2.1.1. Contextualização histórica no Brasil

O Brasil, ao longo de sua história, também testemunhou uma significativa evolução nos sistemas de abastecimento de água, influenciada por fatores sociais, econômicos e ambientais. A preocupação com as perdas hídricas, embora nem sempre estivesse em destaque, tornou-se uma questão crucial, especialmente diante dos desafios contemporâneos relacionados à gestão eficiente dos recursos hídricos.

Durante o período colonial, as primeiras tentativas de abastecimento de água estavam associadas principalmente às necessidades das elites urbanas. Sistemas rudimentares, como fontes e poços, eram utilizados, mas não havia uma preocupação central com as perdas (Murtha; Castro; Heller, 2015; Rückert, 2020).

Pinto (2010) diz que com o advento do Império e a transição para a República Velha, algumas cidades começaram a investir em sistemas mais estruturados. No entanto, a preocupação primordial era garantir o abastecimento, e as perdas de água ainda não eram prioritárias na agenda.

Whately e Campanili (2016) destacam que com o rápido crescimento urbano e a industrialização no século XX trouxeram desafios significativos para os sistemas de abastecimento de água no Brasil. Grandes cidades enfrentaram pressões para fornecer água a uma população em expansão, resultando em sistemas mais complexos. As perdas, embora presentes, não eram adequadamente abordadas.

Já durante as décadas de 1980 e 1990, segundo Souza *et al.* (2015), com o aumento da consciência ambiental e a necessidade de gestão mais eficiente, a preocupação com as perdas hídricas começou a ganhar destaque. Programas de saneamento básico passaram a incluir a redução de perdas como um componente essencial. No Brasil, este processo tem evoluído desde 1997, quando foi aprovada a legislação de recursos hídricos, mas tem apresentado algumas fragilidades relacionadas com a falta de sustentabilidade de governança, econômica, metodologia e ambiental (Curtarelli *et al.*, p. 2, 2018). Atualmente, segundo Corrêa (2021), o Brasil enfrenta desafios significativos relacionados à gestão sustentável da água. A busca por estratégias que reduzam as perdas hídricas, promova eficiência nos sistemas de abastecimento e garantam a disponibilidade de água potável para todos, tornou-se um objetivo central.

Essa visão histórica destaca como a preocupação com as perdas hídricas evoluiu em paralelo com o desenvolvimento dos sistemas de abastecimento de água, influenciando as abordagens utilizadas ao longo do tempo. A compreensão dessa trajetória é crucial para contextualizar a pesquisa de vazamento em um cenário mais amplo de gestão sustentável da água. A preocupação crescente com as perdas hídricas reflete não apenas uma necessidade prática, mas também uma resposta às demandas contemporâneas por práticas sustentáveis na gestão dos recursos hídricos.

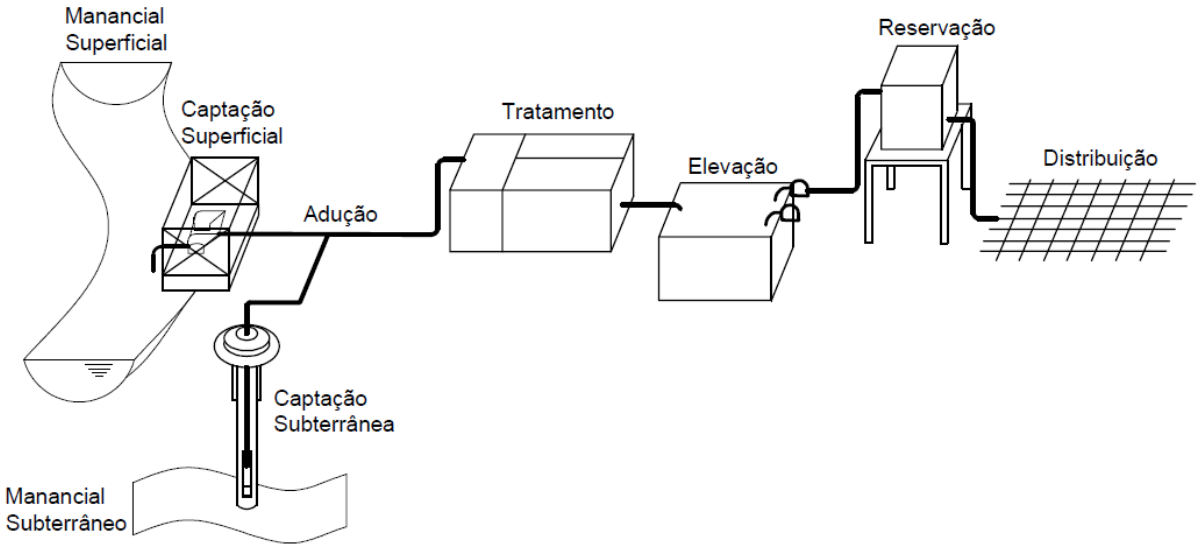
2.2. Sistema de abastecimento de água

A crescente escassez de recursos hídricos e a urgência em promover práticas sustentáveis na gestão da água colocam em evidência a importância da pesquisa de vazamento em sistemas de abastecimento. Esta seção busca contextualizar a necessidade de eficiência e sustentabilidade nas abordagens utilizadas para identificação e controle de vazamentos.

Fenzl, Mendes e Fernandes (2010) definem que o sistema de abastecimento de água potável é um conjunto de obras, instalações e serviços cujo propósito é captar, tratar e distribuir água para uma população. Essa distribuição deve ser realizada em quantidade e qualidade que estejam alinhadas com as demandas da comunidade, atendendo aos propósitos de consumo doméstico, comercial, público e industrial. Esses sistemas, em sua configuração típica, compreendem unidades de captação, tratamento, estações elevatórias, adução, reservatórios, redes de distribuição e conexões familiares.

A **Figura 2** ilustra as unidades do sistema de abastecimento de água convencional.

Figura 2 – Unidade do sistema de abastecimento de água.



Fonte: Ferreira, 2019, p. 17.

Para De Araujo *et al.* (2019), um sistema de abastecimento de água (SAA) desempenha um papel essencial na garantia de que a população receba água em conformidade com os padrões de potabilidade estabelecidos pelas normas. Com o

decorrer do tempo, enfrenta desafios operacionais, necessidades de manutenção e o impacto do envelhecimento da rede, resultando na demanda por reparos que podem interferir no curso normal do processo e originar pontos vulneráveis ao longo do percurso. Segundo Ferreira (2019), SAA's são concebidos e projetados para atender diversas escalas, desde localidades de pequeno porte, como povoados e vilarejos, até localidades de grande porte, como metrópoles. A adaptação dos SAA's é essencial, sendo ajustada de acordo com as necessidades específicas de cada localidade.

Manancial, de acordo com Ministério do Meio Ambiente "é a fonte de água doce superficial ou subterrânea utilizada para consumo humano ou desenvolvimento de atividades econômicas". As áreas contendo os mananciais devem ser alvo de atenção específica, contemplando aspectos legais e gerenciais (Brasil, [s.d.]).

Para Duarte (2018) a captação de água tem como objetivo estabelecer condições que permitam retirar o recurso do manancial abastecedor em uma quantidade suficiente para atender às demandas de consumo. Além disso, busca-se assegurar uma qualidade que dispensa a necessidade de tratamentos ou, quando necessário, reduza-os ao mínimo possível.

A estação elevatória, ainda de acordo com Duarte (2018) desempenha o papel crucial de fornecer a energia necessária para o transporte da água. Geralmente, utiliza-se o conjunto motor-bomba nesse contexto, uma vez que esse equipamento é capaz de operar com notável variação de vazão e pressão.

De Oliveira (2018) define adutora como o conjunto composto por tubulações, conexões e peças especiais projetadas para o transporte de água entre as diferentes unidades dos sistemas de abastecimento. A função da adução é conduzir a água do ponto de captação para o tratamento ou do tratamento para o sistema de distribuição de água.

A estação de tratamento de água é o conjunto de unidades destinado a adequar os parâmetros da água aos padrões de potabilidade (Duarte, 2018).

O reservatório, segundo Duarte (2018), tem como propósito principal assegurar a regularidade do abastecimento de água. Além disso, sua função inclui proporcionar condições para um fornecimento contínuo durante breves períodos de interrupção, armazenar água para uso em situações de combate a incêndios, regularizar as operações das estações elevatórias e controlar as pressões disponíveis nas redes hidráulicas.

A rede de distribuição SAA, de acordo com De Medeiros (2022), é composta por um conjunto de conexões, peças especiais e condutos instalados nas vias públicas ou passeios, aos quais os ramais domiciliares estão conectados. Sua função essencial é transportar as águas tratadas de maneira contínua até os pontos de consumo, garantindo qualidade, quantidade e pressões recomendadas.

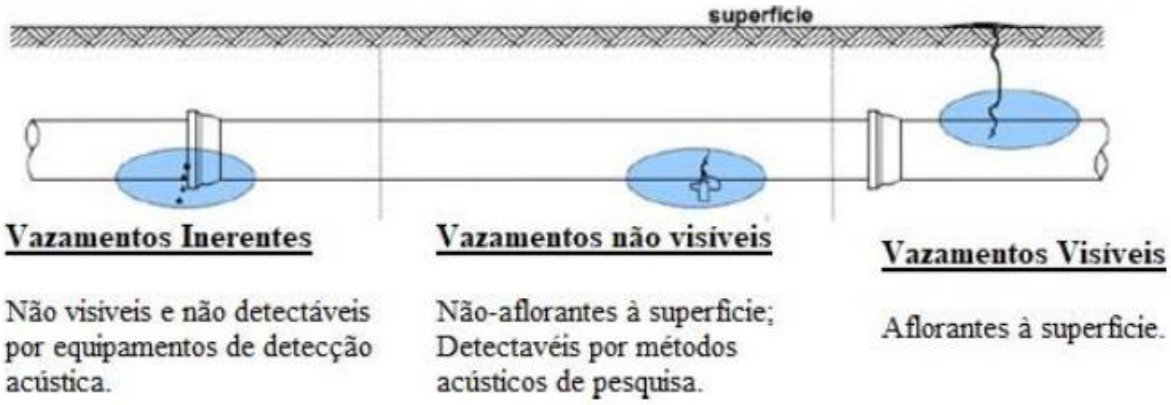
Souza, Nylander, Pereira (2021) afirmam que a estratégia de redução de perdas nos sistemas de abastecimento é multifacetada, oferecendo benefícios significativos em diversos segmentos do serviço, incluindo aspectos energéticos, socioculturais, ambientais e econômicos. Essa abordagem não apenas contribui para a diminuição dos custos operacionais, mas também tem o potencial de aumentar a receita em um curto período.

2.3. Perda de água

As perdas caracterizam-se pela diferença do volume de água produzido e por aquele micromedido nos pontos de consumo e podem ocorrer em qualquer etapa de um sistema de abastecimento de água, desde a captação até o ponto de consumo (Kusterko *et al.,* 2018, p. 615; Campos, 2023).

A **Figura 3** mostra que os vazamentos podem ser classificados com inerentes, não visíveis e visíveis (Campos, 2023, p. 23).

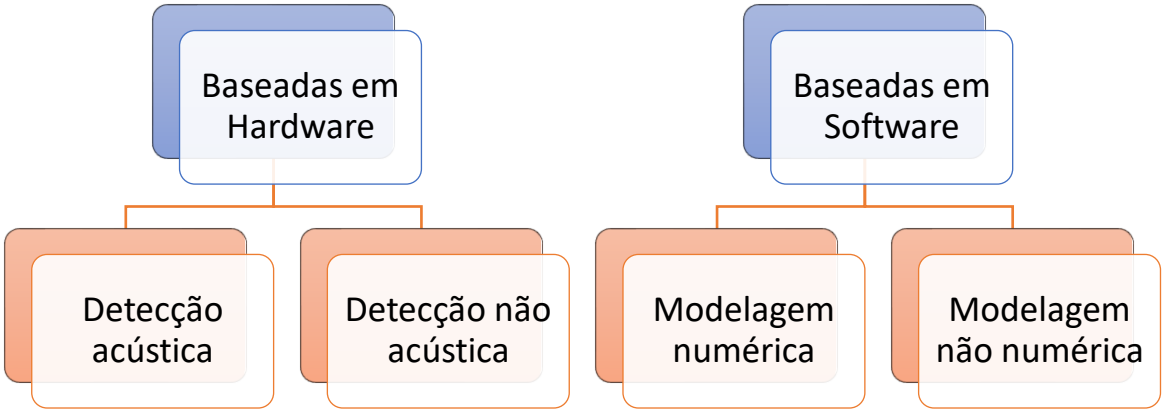
Figura 3 – Classificação dos vazamentos.



Fonte: Campos, 2023, p. 23.

De acordo com Li et al. (2015), os métodos de detecção de vazamentos podem ser classificados em duas categorias, hardware e software, e dentro dessas categorias, subcategorias, como mostra a **Figura 4** a seguir.

Figura 4 – Classificação de técnicas de detecção de vazamentos



Fonte: Adaptado Li et al., 2015.

Além das implicações financeiras para as companhias, segundo Moura Filho (2018), as perdas nos sistemas de abastecimento também acarretam um impacto ambiental significativo, pois o volume retirado dos mananciais para atender ao consumo de uma determinada população será maior que necessário, exacerbando o uso desnecessário de recursos hídricos e seus efeitos no meio ambiente.

Segundo Faria *et al.*(2023) a necessidade de maiores esforços com planos e ações efetivas focadas na redução de perdas torna-se ainda mais urgente com a crescente evolução do índice nacional de perda de água na distribuição que no último levantamento disponível chegou ao patamar de 39,2% de acordo com os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), dados de 2019.

Contudo, de acordo com Lima e Brentan (2020), devido às imperfeições no assentamento das tubulações, ao envelhecimento das juntas e às pequenas rupturas, vazamentos são uma ocorrência constante nas redes de distribuição.

Bezerra e Cheung (2013, p. 86) dizem que a metodologia mais empregada para a busca de vazamentos não visíveis no controle de perdas é pelos métodos acústicos, que consistem em aparelhos eletrônicos que aumentam a percepção para a escuta de determinados ruídos que podem ou não estarem ligados aos vazamentos nas tubulações.

Além dos métodos acústicos, podem ser utilizados métodos automatizados de monitoramento de pressão e controle de vazão nas redes visando auxiliar o processo de gestão das empresas e dos usuários, pois permite ganhos nos âmbitos econômicos, sociais e ambientais, principalmente em áreas vulneráveis em que há baixa disponibilidade de água (De Medeiros, 2022, p. 20).

A importância de reparar rapidamente vazamentos de água em sistemas de abastecimento é inquestionável. Em primeiro lugar, a pronta resolução desses problemas desempenha um papel crucial na preservação dos recursos hídricos, evitando o desperdício de água potável em meio à escassez global. Além disso, agir rapidamente ajuda a reduzir prejuízos financeiros tanto para as empresas responsáveis pelo abastecimento quanto os consumidores, diminuindo os custos relacionados ao desperdício e aos danos na infraestrutura.

Além da resolução das perdas econômicas e ambientais que a rápida resolução do vazamento pode proporcionar, também não se pode deixar de lado a qualidade da água potável, pois substâncias nocivas contaminam a água do sistema penetrando através dos vazamentos não corrigidos.

A rápida solução dos vazamentos também preserva a integridade da infraestrutura de abastecimento de água. Evitar danos adicionais causados por vazamentos não reparados, como erosão do solo e deterioração das tubulações, reduz custos de manutenção no longo prazo e assegura o bom funcionamento do sistema.

Por fim, resolver prontamente os vazamentos contribui para garantir a continuidade dos serviços de abastecimento de água, evitando interrupções que poderiam causar transtornos aos consumidores e impactar negativamente a rotina das comunidades atendidas pelo sistema.

3. METODOLOGIA

Realizou-se uma revisão bibliográfica abrangente através do *Google* Acadêmico para identificar as técnicas existentes para pesquisa de vazamento de água em sistemas de abastecimento, abordando tanto métodos tradicionais quanto inovadores em livros, artigos, teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso que apresentassem palavras-chave, conforme o **Quadro 3**.

Quadro 3 – Palavras-chave da pesquisa.

Palavras-chave em português	Palavras-chave em inglês
“Sistema de abastecimento”	“*Water supply system*”
“Perdas de água”	*“Water losses*”
“Detecção de vazamentos”	*“Leaks detection”*
“Controle de pressão”	*“Pressure control”*
“Gestão de água”	*“Water management”*
“Redes de distribuição de água”	*“Water distribution networks”*
“Vazamentos”	*“Leaks”*
“Uso racional de água”	*“Rational use of water”*

Fonte: Autoria Própria (2024).

Após a busca pelos métodos através da pesquisa com as palavras-chave do **Quadro 3**, foi pesquisado o nome de cada método como palavra-chave para aprofundamento do conteúdo.

4. MÉTODOS BASEADOS EM *HARDWARE*

4.1. Métodos acústicos

Quando ocorre um vazamento em uma tubulação, um som contínuo e, muitas vezes, inaudível para a percepção humana, é emitido pela abertura existente no tubo (ABENDE, 2002).

Segundo Mutikanga, Sharma e Vairavamoorthy (2013), os métodos acústicos mais utilizados atualmente são: haste de escuta, correlacionadores de ruídos e registradores de ruído de vazamento. Esses métodos são fundamentados nas características e no princípio do som para que possam detectar o vazamento (Li *et al.*, 2015).

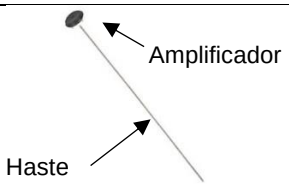
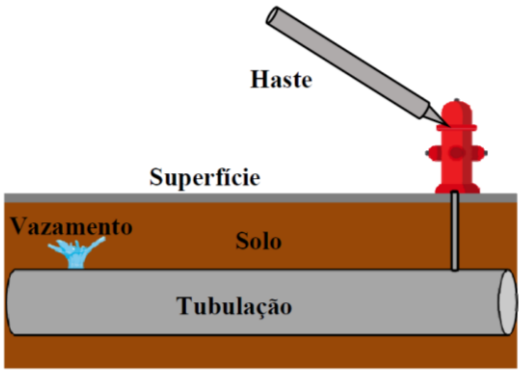
4.1.1. Haste de escuta e geofone

A haste de escuta é um método acústico empregado para detecção e medição da vibração de ruídos de vazamentos em ramais de ligação, pé no cavalete, válvulas, ventosas, hidrantes, torneiras e demais peças especiais e controle, além de auxiliar

na detecção de ligação clandestina à rede (Bezerra e Cheung, 2013, p. 87; Cézar, 2021, p. 7) e, ainda segundo Cézar (2021), a capacidade técnica do operador influência diretamente a detecção e localização do vazamento, uma vez que o mesmo interpreta o sinal auscultado.

Esse equipamento pode ser encontrado em duas formas, sendo analógica ou digital. A primeira consiste em uma haste de metal, com uma câmera acústica acoplada a extremidade a fim de amplificar o ruído do vazamento que se propaga na tubulação (Silva *et al.,* 2008), enquanto a segunda utiliza, além dos já apresentados no analógico, um sensor piezométrico e um potenciômetro, para refinar os dados (Cézar, 2021, p. 9). O **Quadro 4** ilustra os dois tipos de haste de escuta e esquematiza o seu uso.

Quadro 4 – Identificação de peças e esquema de utilização da haste de escuta.

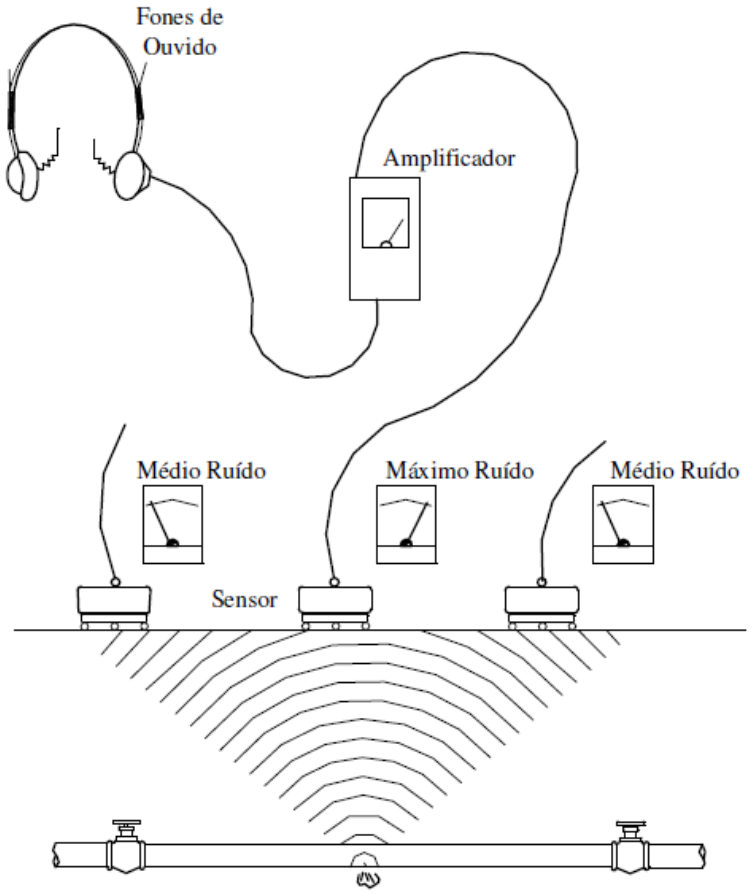
Tipo	Identificação de parte	Esquema
Analógico	 Fonte: Adaptado de Mecaltec, 2024c.	 Fonte: Cézar, 2021.
Digital	Fonte: Adaptado do manual do produto.	

Fonte: Adaptado de Cézar (2021).

A haste de escuta é um equipamento simples e de valor acessível, porém apresenta alguns pontos negativos em relação ao seu uso que, por se tratar de uma metodologia que fornece somente o ruído do sinal em forma de áudio, ele pode ser facilmente interferido por qualquer outro ruído nas intermediações analisadas, se fazendo necessário a presença de um profissional capacitado para a obtenção de resultados mais eficientes (De Paula e Lima, 2019).

Diferentemente da haste de escuta, no qual a medição deve ser feita em contato direto à tubulação do sistema, o geofone também pode ser analógico e digital, no entanto, ele é utilizado acima da superfície na qual a tubulação está instalada, não dependendo de pontos específicos da rede e é composto por sensores mecânicos, guias de onda e fones de ouvido (ABENDE, 2002; Cézar, 2021) (**Figura 5**).

Figura 5 – Esquema do geofone mecânico em operação.



Fonte: ABENDE, 2002

Esses equipamentos atuam em diferentes faixas de operação de frequência, sendo a haste de escuta com faixa operacional entre 200 e 1500 Hz com faixa ótima de trabalho entre 600 e 800 Hz (Zaniboni, 2009). Em se tratando do geofone, a faixa de operação desse equipamento depende da sensibilidade do sensor que fica no solo, sendo geralmente entre 30Hz e 3kHz (Cézar, 2021).

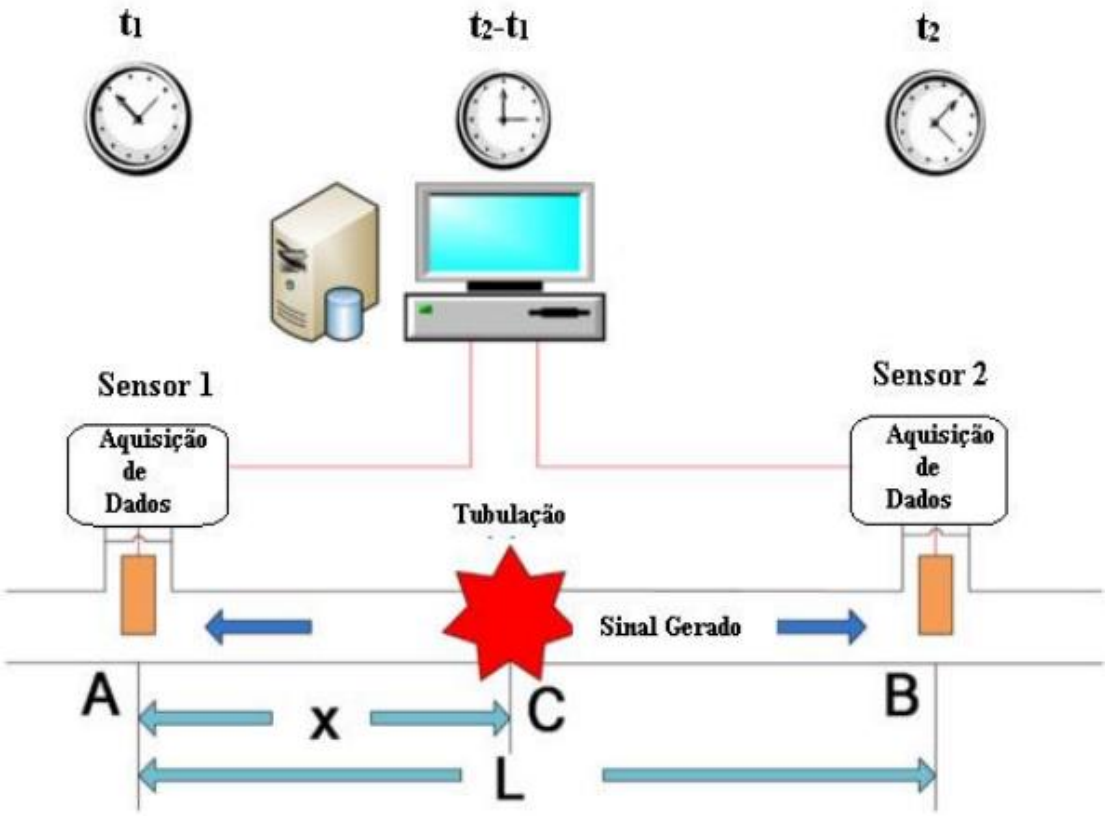
De Paula e Lima (2019) ainda afirmam que essas metodologias devem ser aplicadas em tubulações metálicas, apresentando baixa precisão quando se trata de tubos não metálicos.

4.1.2. Correlacionador de ruídos

O método acústico através do correlacionador de ruídos consiste em posicionar pelo menos dois sensores que detectam esse ruído causado pelo vazamento, posicionados nos extremos opostos da seção da tubulação monitorada, para que se possa medir os intervalos de tempo que o sinal provocado pelo vazamento atinja os sensores (Da Cruz, 2019, p. 29). A diferença de tempo (*Δt*) deve ser aplicada na equação 1 para a determinação da posição relativa a um dos sensores (*X*), além de necessitar dos dados de distância entre os sensores (*L*) e a velocidade de propagação do sinal (*α*), como apresentado na **figura 6** (Meng *et al*., 2011).

$$X = \frac{L-\alpha\Delta t}{2}, \qquad \text{Eq. 1}$$

Figura 6 – Método de detecção de vazamentos baseado no intervalo de tempo que o sinal acústico gerado leva para atingir diferentes sensores.



Fonte: Adaptado Meng et. al., 2011, p. 91.

Embora seja um método muito eficaz na busca de vazamentos de água por bloquear ruídos externos, o correlacionador de ruídos possui algumas limitações, pois, por se tratar de aproximações, a escolha dos sensores, bem como os problemas de

instrumentação, a dinâmica na qual o sistema está regido e o tipo de solo podem interferir e influenciar sua eficácia (Li *et al.*, 2015).

4.2. Métodos não acústicos

Os métodos não acústicos não dependem de ruídos para a localização de vazamentos, logo, não são afetados pelos diferentes ruídos que podem ser captados pelos métodos acústicos, nos quais podem não representar uma perda de água.

Segundo Monteiro (2006), as técnicas não acústicas mais utilizadas são: método de injeção de gás, radar de penetração no solo (GPR) e a termografia, nas quais serão mais especificadas a seguir.

4.2.1. Injeção de gás

Este método consiste na injeção de gases mais leves do que o ar na tubulação a fim de que o detector ultrassensível desse gás o capte para a localização do vazamento na tubulação (Li *et al.,* 2015) (**Figura 7**). Ainda segundo Li *et al.* (2015), o gás mais utilizado para esta metodologia seria o hidrogênio industrial (95% de N_2 e 5% de Hidrogênio). São utilizados também os gases hexafluoreto de enxofre e o gás hélio (Monteiro, 2006).

Figura 7 – Equipamentos para a injeção de gás.

Fonte: Hunaidi *et al.*, 2000.

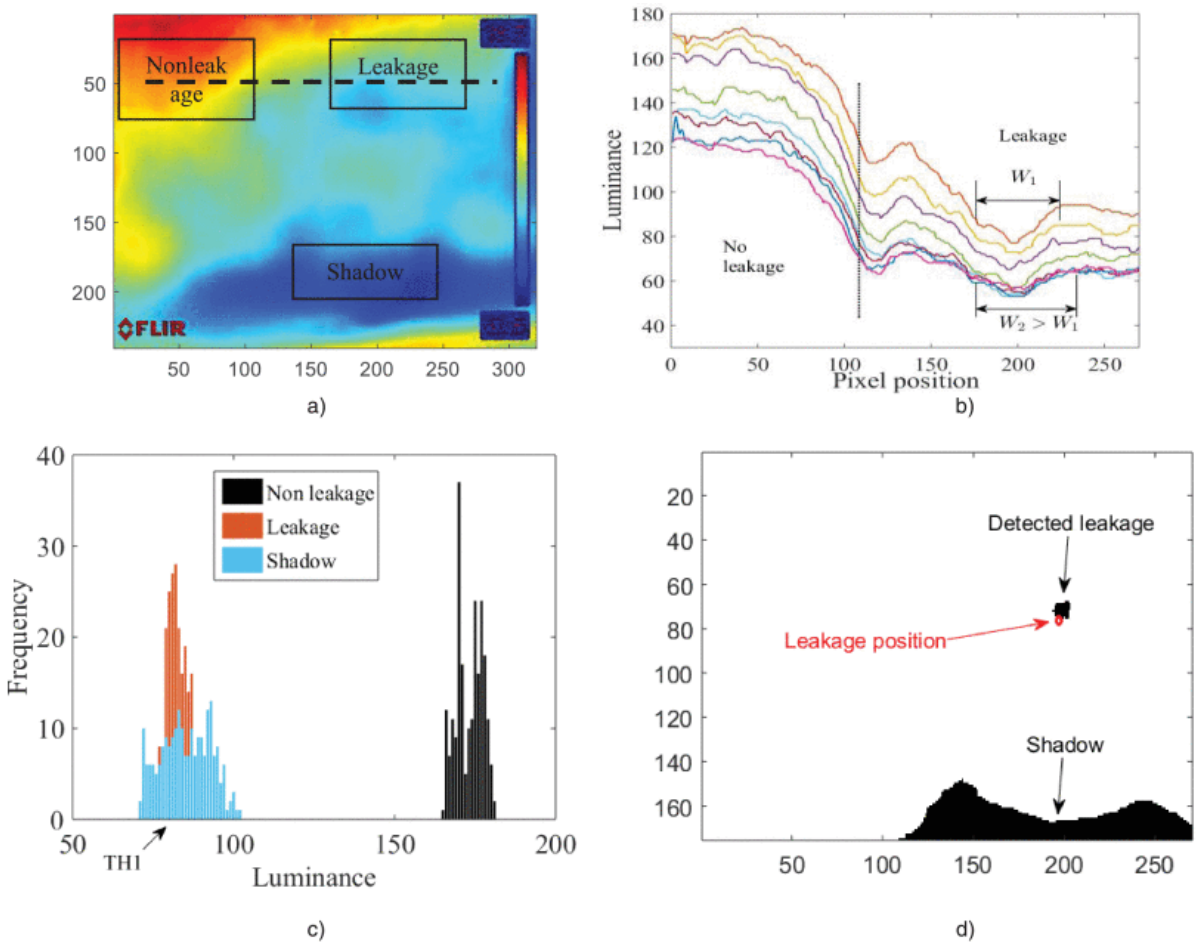
Essa metodologia para a localização de vazamentos possui algumas desvantagens técnicas, uma delas diz respeito à detecção somente de vazamentos localizados na parte superior do tubo, já que o gás não consegue fluir para a parte inferior. Li *et al.* (2015) ainda dizem que essa técnica é geralmente utilizada em larga escala pois apresenta um alto custo para ser implementada em pequena escala, mas apresenta uma boa precisão na detecção de vazamentos, desde que sejam na parte superior do tubo.

4.2.2. Termografia

De acordo com Li *et al.* (2015), o método consiste em uma câmera de infravermelho que gera imagens de infravermelho térmico. A priori, a água que se perde do sistema por vazamento reduz a temperatura do solo ao redor da tubulação, diferenciando-o do solo seco. Monteiro (2006) afirma que o scanner infravermelho pode detectar anomalias adjacentes à tubulação, nas quais podem ser indícios de um vazamento.

Segundo Hudaini *et al.* (1999), a termografia pode ser utilizada para localizar áreas delaminadas em vigas de concreto de pontes rodoviárias, mostrando que é possível utiliza-la em diversos materiais além de solos. A **Figura 8** mostra como seria a amostra de anomalia próximo à tubulação vista pelo sensor infravermelho.

Figura 8 – Dados obtidos para a busca de vazamentos pelo método da termografia.



Fonte: Yahia *et al.*, 2021.

A termografia é uma técnica não destrutiva que não requer escavações ou perturbações na superfície do solo, sendo possível a detecção de vazamentos em áreas pavimentadas ou onde a escavação seria impraticável, além de fornecer dados em tempo real (Aggelis *et al.,* 2010).

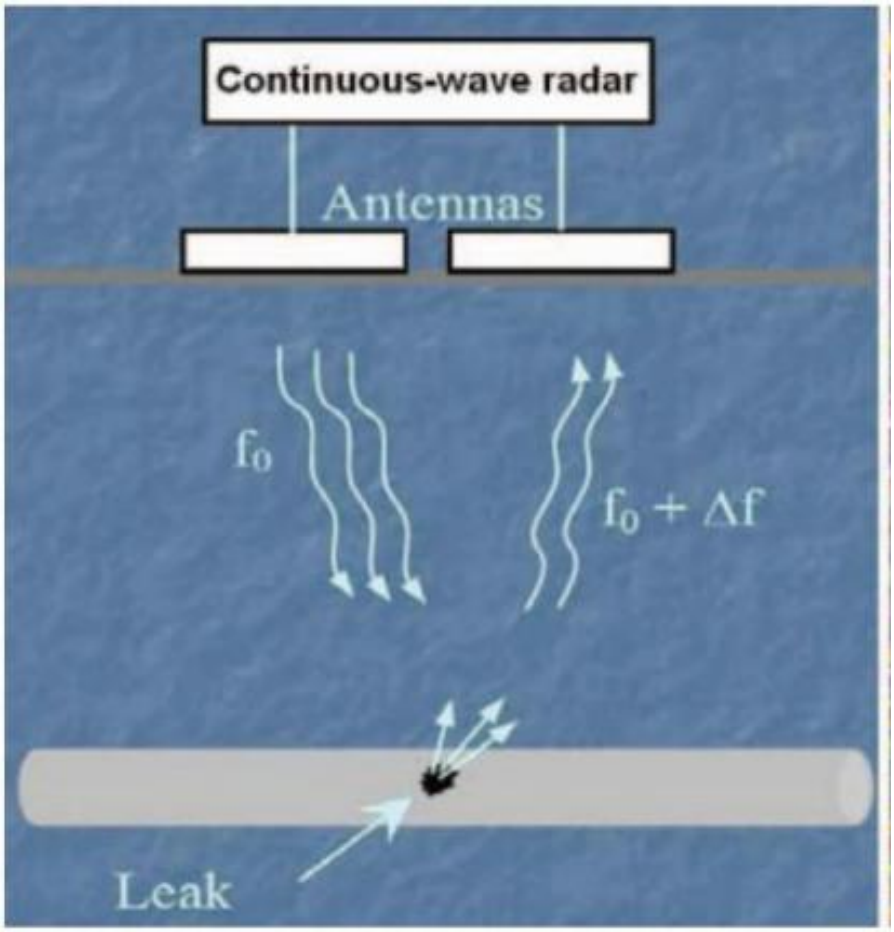
Barreira *et al.* (2012) afirmam que a termografia minimiza riscos e não interfere na vida dos usuários.

4.2.3. Radar de penetração no solo (GPR)

Segundo Borges (2007, p.69), o GPR (sigla em inglês para *Ground Penetration Radar*) consiste em um método eletromagnético que emprega onda de rádio em frequências altas, entre 10 MHz e 2,5 GHz, para a identificação de estruturas e feições geológicas próximas à superfície ou localizar objetos que foram enterrados pelo homem (apud Porsani, 1999).

O estudo por meio do radar de penetração no solo consiste em uma abordagem geofísica que não necessita de escavações, desenvolvendo um registro contínuo das características do solo de forma transversal por meio de antenas, como mostra a **Figura 9** (PUUST *et al.,* 2010).

Figura 9 – Princípio do radar de penetração no solo.



Fonte: Puust *et al.,* 2010.

Ainda conforme Puust *et al.*(2010), a técnica com uso de radar de penetração no solo pode ser utilizada detectando vazios subterrâneos que podem ser causados por vazamentos de água ou também detectando anomalias na profundidade da tubulação medida pelo radar. Isto se dá pela variação da frequência transmitida (f_0) pela unidade transmissora recepcionada pela unidade receptora ($f_0+\Delta f$).

Hunaidi (1999) afirma que o método pode ser utilizado na detecção de vazamentos de duas maneiras: na identificação de cavidades no solo que são criadas a partir do fluxo turbulento gerado pelo vazamento; e na identificação das tubulações que aparecem com profundidade maior que a esperada devido ao aumento dielétrico constante no solo adjacente que está saturado pela água que vazou.

Davis e Annan (1989) dizem que o equipamento utilizado consiste em uma unidade transmissora, uma unidade receptora, odômetro, uma unidade de controle e a unidade de monitoramento (**Figura 10**).

Figura 10 – Equipamento GPR: (1) Unidade de Controle; (2) Antena transmissora; (3) Antena Receptora; (4 e 5) Unidade de exibição/monitoramento; (6) Odômetro.

Fonte: Ramos, 2007.

Segundo Borges (2007), a profundidade de penetração do sinal do GPR é influenciada por diversos fatores, são eles: o espalhamento geométrico, a atenuação pelo terreno e a partição da energia nas interfaces, nos quais são relacionados à perda de energia durante a propagação da onda eletromagnética. A **Tabela 1** mostra qual a profundidade máxima de penetração em razão da frequência da antena do GPR.

Tabela 1 – Frequência Central X Profundidade máxima de penetração do GPR.

Frequência Central (MHz)	1000	500	400	250	200	100
Profundidade Máxima de Penetração (m)	0,8	1,5	1,6	2,3	3,4	4,5

Fonte: Borges (2007)

Li *et al.* (2015) ainda afirma que o GPR, em relação aos outros métodos já citados anteriormente, é rápido, com alta precisão e resolução, além de poder ser

aplicado na detecção de tubos não metálicos de baixa pressão e em larga escala, entretanto, climas frios e solos saturados podem inviabilizar seu uso.

5. MÉTODOS BASEADOS EM *SOFTWARE*

Por mais que os métodos baseados em hardware apresentem a vantagem de serem altamente precisos, eles apresentam diversos pontos negativos, entre eles estão:

- Baixa sensibilidade;
- Alcance limitado;
- Tempo hábil para detecção do vazamento;
- Podem apresentar alto custo operacional.

Devido a esses problemas, muitos estudos são realizados a fim de buscar métodos de baixo custo e eficientes para a localização de vazamentos. Tais técnicas são baseadas em algoritmos e/ou modelos matemáticos para serem operadas, realizando o monitoramento da rede através dos dados do fluxo e pressão.

De acordo com Li *et al.* (2005), os métodos baseados em software podem ser categorizados em métodos de modelagem numérica e métodos de modelagem não numérica.

Sampaio (2018) diz que regime permanente em um sistema de abastecimento de água é aquele em que a velocidade e pressão dentro da tubulação permanecem constantes ao longo do tempo. Isto é, o sistema é caracterizado pela conservação de massa, pois é considerado que a quantidade de água que entra no sistema permanece igual à água que sai.

Sobre o regime transiente, Sampaio (2018) considera como regime no qual a velocidade e a pressão, em um determinado ponto, variam perante o tempo, variando também de um ponto a outro, tornado o escoamento transiente mais complexo devido o envolvimento da variação do tempo, pois requer o uso de equações diferenciais, nas quais podem ser solucionadas através de métodos numéricos ou gráficos.

5.1. Métodos de modelos numéricos

Diversos autores propuseram métodos numéricos para a localização de vazamentos utilizando medidas de carga e vazão, diferenciando cada método da técnica de otimização.

Dentre as técnicas alternativas, é possível citar os métodos: análise inversa, análise transiente inversa (Kang e Lansey, 2012).

5.1.1. Método por análise inversa (MI)

Segundo Pudar e Liggett (1992), o método de análise inversa consiste em analisar a pressão e/ou fluxo do sistema de abastecimento, com isso, formulou-se o problema com áreas de orifício que podem ser equivalentes aos possíveis vazamentos e tratadas como incógnitas. A partir da minimização da diferença entre os pontos de medição com a calculada produz uma solução para as regiões de vazamento. A localização e magnitude da perda de água são sensíveis tanto a quantidade quanto a qualidade das medições de pressão e, também, a precisão dos parâmetros de atrito da tubulação.

Ainda de acordo com Pudar e Liggett (1992), esse método não substitui os métodos de vazamento tradicionais, como geofone, mas pode ser atribuído como um guia e complementar a pesquisa pelo vazamento.

5.1.2. Método por análise transiente inversa (MTI)

Kang e Lansey (2012) afirmam que a análise transiente inversa consiste na emissão de ondas em uma tubulação e essas ondas transitórias são medidas utilizando manômetros em outro local da rede. As diferenças de pressões são medidas e analisadas comparando os dados com a análise analítica do sistema.

Segundo Li *et al*. (2015), os métodos que utilizam a análise de transiente inversa incluem as seguintes etapas:

1. Os transientes são feitos artificialmente por meio de abertura ou fechamento da rede de maneira que a pressão ou fluxo mude significativamente. Entretanto, é importante observar que a pressão e

velocidade do fluxo causados pelo evento transiente devem ser controladas dentro da faixa permitida;

2. A pressão dos pontos de monitoramento selecionados deve ser medidas com a melhor precisão possível, evitando erros;
3. O modelo deve ser corrigido periodicamente até o fim da condição de convergência, comparando os dados medidos com os dados da simulação do modelo transiente.

As vantagens da utilização do Método Transiente Inverso são: a simplicidade de execução e poder ser aplicado em qualquer tipo de rede, teoricamente. Entretanto, suas desvantagens estão na dificuldade na execução de um modelo hidráulico transiente preciso, no fato do modelo requerer um grande número de sensores de alta sensibilidade e precisão e no problema de que não foi realizado um método eficaz para distinguir com precisão uma resposta de sinal causada por vazamento ou por quaisquer outros ruídos semelhantes.

Covas e Ramos (2010) afirmam que o MTI poderiam ser utilizados para detecção, localização e quantificação de vazamentos até certo ponto. Esse método é bem-sucedido em na detecção e localização de vazamentos de tamanhos razoáveis, de modo que as características físicas e hidráulicas sejam bem conhecidas. Entretanto, em vazamentos que ocorrem em sistemas enterrados reais, ele apresenta dificuldade para detecção devido o sinal apresentar diversas flutuações aleatórias e os recursos humanos limitados da concessionária para conhecer as características físicas e hidráulicas com exatidão.

5.2. Métodos de modelos não-numéricos

Grande parte dos métodos não-numéricos para a detecção de vazamentos de água consistem em aprendizado de máquina, baseando-se em dados históricos de pressão e fluxo.

Li *et al.* (2015) afirmam que os modelos não numéricos identificam possíveis áreas de vazamento através da mineração de dados ou à utilização de algoritmos de inteligência artificial, com base em determinadas regras, sem a necessidade de simulação de modelos hidráulicos numéricos.

Mounce, Boxall e Machell (2010) propuseram um método que combina redes neurais artificiais com um sistema de lógica difusa para detectar rompimentos de

tubulações. A lógica difusa consiste em uma previsão de séries temporais que classificam discrepâncias entre os valores reais e previstos durante um período de tempo. Esse método proposto realiza os seguintes passos:

1. Construção da função de probabilidade a fim de especular a curva do fluxo futuro;
2. Treinamento da rede neural artificial com os dados históricos e;
3. Classificação dos dados com a lógica difusa.

Ainda segundo Mounce, Boxall e Machell (2010), os resultados mostraram que essa metodologia pode ser utilizada no monitoramento e detecção de vazamentos no sistema de distribuição de forma online e de maneira eficaz e promissora.

Há diversas técnicas que utilizam o método não-numérico para o monitoramento de vazamentos. É possível citar alguns métodos como: Inferência Bayesiana; Método da Seção de Ouro; Algoritmo Genético; Filtro Adaptativo de Kalman.

Todos os métodos acima citados utilizam a técnica de análise de dados históricos de pressão e fluxo, contudo, com variações e combinações com modelos matemáticos.

Li *et al.* (2015) frisam que as metodologias de modelos não-numéricos são cada vez mais comuns, uma vez que a tecnologia de detecção hidrológica e de monitoramento online crescem a cada dia. Contudo, deve-se haver melhorias em questões de confiabilidade e pontualidade dos testes, devido a apresentarem possíveis áreas de vazamento.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

A partir da pesquisa realizada, foi possível identificar as vantagens e desvantagens dos métodos apresentados.

Os métodos baseados em *hardware* geralmente são associados a altos custos devido à necessidade de equipamentos relativamente caros e necessitarem também de um grande número de equipes para a detecção de grades áreas do sistema de abastecimento. Contudo, são métodos que apresentam maior precisão de dados. As vantagens e desvantagens dessas técnicas são apresentadas no **Quadro 5**.

Quadro 5 – Vantagens e desvantagens dos métodos baseados em hardware.

Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Haste de escuta e geofone	Simples operação e; baixo custo de operação.	Baixa precisão; depende da experiência do operador; pouco eficaz em tubos não-metálicos.
Correlacionador de ruídos	Alta precisão e; remove ruídos externos.	Alto custo; precisão depende do diâmetro da tubulação, material e sensores; pouco eficaz em tubos não-metálicos.
Injeção de gás	Alta precisão e não é suscetível a fatores externos.	Alto custo; não é capaz de detectar vazamentos no lado inferior do tubo.
Termografia	Detecção rápida; alta precisão e; baixo custo.	É afetado pelas condições climáticas, solo e superfície.
Radar de penetração do solo	Alta precisão; pode ser aplicado em larga escala e; não depende do material do tubo.	As condições do clima e solo afetam a detecção e; alto custo.

Fonte: Autoria Própria (2024).

Já se tratando dos métodos computacionais geralmente apresentam custos inferiores de operação, entretanto, não conseguem localizar com precisão o ponto de vazamento, delimitando uma área de “possível vazamento”. Contudo, podem detectar e delimitar o vazamento de maneira mais rápida que os métodos mais tradicionais.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa analisou as metodologias tanto tradicionais, como a haste de escuta, geofone, quanto as mais modernas, como radar de penetração do solo, análise de dados por métodos numéricos e não numéricos, e, com isso, foi possível identificar que a eficácia de cada método varia de acordo com as características específicas de cada sistema, dependendo não só do fluxo e pressão, mas, também, do tipo de solo e suas adjacências, bem como o material empregado na tubulação do trecho analisado.

O radar de penetração do solo se destacou por ser mais vantajoso perante as alternativas de equipamentos para a detecção de vazamentos, além de poder ser utilizado em larga escala dependendo de poucos equipamentos para a operação.

Em se tratando dos métodos computacionais baseados em software, poderíamos trata-los como métodos de monitoramento da rede, uma vez que é necessária à coleta de dados constante para a detecção de um vazamento.

Uma sugestão de operação das técnicas seria a combinação dos métodos computacionais com os métodos tradicionais. A rapidez com que os métodos baseados em *softwares* podem detectar e localizar a área de vazamento seriam relevantes para esse papel e a utilização de métodos baseados em *hardware* para a localização do ponto exato do vazamento.

É recomendado que futuras pesquisas sobre as perdas de água no sistema de abastecimento aborde sobre a viabilidade da combinação do uso das técnicas apresentadas, bem como a utilização em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGELIS, D. G. et al. Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 24, p. 1888-1897, 21 abr. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS – ABENDE. **Detecção de Vazamentos Não-Visíveis**: Métodos Acústicos. Apostila de Treinamento para Profissionais níveis 1, 2 e 3 (CETRE), São Paulo, 2001 ,2002.

BARREIRA, E. *et al.* **Thermography Applications in the Study of Buildings Hydrothermal Behavior**. LFC – Building Physics Laboratory, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Porto, 8. 171-182. Portugal, 2012.

BEZERRA, S. T. M.; CHEUNG, P. B. **Perdas de água**: tecnologias de controle. 1. ed. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013. 220 p. ISBN 978-85-237-0701-9.

BORGES, W. R. **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente**: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Porsani. 2007. 260 p. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2007.

BRASIL. **Mananciais**. Ministério do Meio Ambiente, [s.d.]. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/component/k2/item/8047-mananciais.html#:~:text=Manancial%20de%20abastecimento%20público%20é,contemplando%20aspectos%20legais%20e%20gerenciais>. Acesso em: 17 fev. 2024.

CAMBRAINHA, G. M. G.; FONTANA, M. E. Análise da aplicação de investimentos em perdas de água no nordeste brasileiro. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 983–994, 2015. DOI: 10.5902/2236117015520. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/15520>. Acesso em: 31 mar. 2024.

CAMPOS, V. C. **Análise comparativa do índice de perdas na distribuição no sistema de abastecimento público de água**: caso de Itaguatins-TO. 2023. 89f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2023.

CÉZAR, S. O. **Uso de Python e conceitos de internet das coisas aplicados à técnicas vibro-acústicas clássicas para detecção de vazamentos**. Orientador: Prof. Dr. Fabrício César Lobato de Almeida. 2021. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2021.

CORRÊA, T. H. P. **Resiliência hídrica urbana**: Diretrizes para sua incorporação em municípios com o uso de indicadores. Orientador: Prof. Dr. Bernardo Arantes do Nascimento Teixeira. 2021. 226 p. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) -

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana na Universidade de São Carlos, São Carlos, 2021.

CORRÊA, S. S. **Controle de pressão e geração de energia por meio de bombas funcionando como turbinas em sistemas de abastecimento de água**. Orientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra. 2018. 71 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Núcleo de Tecnologia da Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

COVAS, D.; RAMOS, H. Case Studies of Leak Detection and Location in Water Pipe Systems by Inverse Transient Analysis. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S. l.], v. 136, n. 2, p. 248-257, 12 fev. 2010.

CURTARELLI, M. P. *et al.* Sustentabilidade Hídrica: O caso de Santa Catarina. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, ano 2018, v. 15, n. 2018, ed. 13, 1 dez. 2020. DOI 10.21168/rega.v15e14. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/OJS/index.php/REGA/article/view/69/14>. Acesso em: 18 fev. 2024.

DA CRUZ, R. P. **Método Acústico e Algoritmos de Aprendizado de Máquinas Aplicados a Detecção e Localização de Vazamentos em Tubulações de Gás de Baixa Pressão**. Orientador: Profa. Dra. Ana Maria Frattini Fileti. 2019. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019. DOI https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2019.1096027. Disponível em: https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/1096027. Acesso em: 23 mar. 2024.

DA SILVA, E. R. **O curso da água na história: Simbologia, Moralidade e a Gestão de Recursos Hídricos**. Orientador: Prof. Dr. Fermin Roland Schramm. 1998. 201 p. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Escola Nacional de Saúde Pública da Fundação Oswaldo Cruz, São Paulo, 1998.

DA SILVEIRA, A. M. **De fontes e aguadeiros à penas d'água**: reflexões sobre o sistema de abastecimento de água e as transformações da arquitetura residencial do final do século XIX em pelotas - RS. Orientador: Profa. Dra. Beatriz Mugayar Kühl. 2009. 340 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground-Penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, 37, p. 531-551, 1989.

DE ARAUJO, A. A. Q. *et al.* Perda de água e a reabilitação de sistemas de abastecimento. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, ed. 12, p. 33428-33437, dez. 2019.

DE MEDEIROS, L. E. L. **Desenvolvimento de sistema automatizado de baixo custo para medição inteligente de vazão em redes de abastecimento**. Orientador: Profa. Dra. Dayse Luna Barbosa. 2022. 107 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de

Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

DE OLIVEIRA, F. A. **Avaliação das perdas físicas no sistema de abastecimento de água no município de Ivoti/RS**. Orientador: Prof. Dr. Dieter Wartchow. 2018. 106 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

DE PAULA, M. V. P.; LIMA, M. S. **Perdas no sistema de abastecimento de água potável**: Análise dos indicadores de desempenho na cidade de Jaraguá - GO. Orientador: Profa. Ma. Jéssica Nayara Dias. 2019. 22 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil da Faculdade Evangélica de Jaraguá, Jaraguá, 2019.

DUARTE, C. K. A. R. **Avaliação do desempenho hidroenergético do sistema de abastecimento de água Utinga-Bolonha - Setor Guanabara**. Orientador: Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira. 2018. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

FARIA, T. R. *et al.* Estudo prospectivo sobre tecnologias para detecção de vazamentos em redes de abastecimento de água. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, ano 2023, v. 19, ed. 1, p. 154-166, 12 jun. 2023. DOI 10.5216/reec.v19i1.68225. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/68225>. Acesso em: 22 fev. 2024.

FENZL, N.; MENDES, R. L. R.; FERNANDES, L. L. **A sustentabilidade do sistema de abastecimento de água**: Da captação ao consumo de água em Belém. Belém: NUMA, 2010. 140 p. ISBN 978-85-88998-31-5.

FERREIRA, J. F. H. **Avaliação do consumo e da despesa de energia elétrica no estudo de concepção de sistema de abastecimento de água**. Orientador: Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira. 2019. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

GAMBOA-MEDINA, M. M.; REIS, L. F. R. Detecção de vazamentos em redes de distribuição de água para abastecimento: Estado da Arte. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2009.

GONÇALVES, L. R. Sistemas de circulação de água e poder na Lisboa Medieval - Séculos XIV a XVI. **Cadernos do Arquivo Municipal**, Lisboa, v. 2, n. 8, p. 34-54, 2017.

HUNAIDI, O. *et al.* **Leak Detection methods for plastic water distribution pipes**. AWWA Research Foundation. 1999. 142 p.

KANG, D.; LANSEY, K. A Novel Approach to Detect Pipe Burst in Water Distribution Network. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S. l.], v. 140, n. 1, p. 1-22, 17 ago. 2012.

KLAUCK, A. G. **Água, fontes e aguadeiros**: O abastecimento hídrico em Nossa Senhora do Desterro (Século XIX). Orientador: Prof. Dr. João Klug. 2018. 244 p. Dissertação (Mestrado em História) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

KUSTERKO, S. *et al.* Gestão de perdas em sistemas de abastecimento de água: Uma abordagem construtiva. **Eng. Sanit. Ambient**, Florianópolis, v. 23, n. 3, p. 615-626, maio/junho 2018. DOI 10.1590/S1413-41522018156436. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/Rn6rhxLMbP6NyLNGR3YmJLx/?lang=pt#>. Acesso em: 23 fev. 2024.

LI, R. *et al.* A review of methods for burst/leakage detection and location in water distribution systems. **Water Supply**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 429-441, 1 jun. 2015. DOI https://doi.org/10.2166/ws.2014.131. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article-abstract/15/3/429/27480/A-review-of-methods-for-burst-leakage-detection?redirectedFrom=fulltext#>. Acesso em: 2 abr. 2024.

LIMA, G. M.; BRETAN, B. M. Uso racional de energia em sistemas de abastecimento de água. **Revista da UFMG**, Belo Horizonte, v. 26, n. 1 e 2, p. 108–135, 2020. DOI: 10.35699/2316-770X.2019.12702. Disponível em: https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistadaufmg/article/view/12702. Acesso em: 23 fev. 2024.

LIMA, R. P. G**. Desenvolvimento de um soft sensor para estimação da vazão em sistemas de abastecimento de água utilizando redes neurais artificiais**. Orientador: Prof. Dr. Heber Pimentel Goes. 2022. 101 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

MENG, L. *et al.* Experimental study on leak detection and location for gas pipeline based on acoustic method. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Qingdao, ano 2012, v. 25, p. 90-102, 8 jul. 2011.

MIRANDA, D. M. **Metodologia de redução de perdas reais de água em sistemas de reduzida dimensão**. Orientador: Prof. Dr. Joaquim Manuel Veloso Poças Martins. 2018. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2018.

MISIUNAS, D. **Failure Monitoring and Asset Condition Assessment in Water Supply Systems**. 2005. 350 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica, Industrial e Automação) - Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Lund, 2005.

MONTEIRO, M. R. P. S. **Estudo do método de resposta em frequência para localizar e quantificar vazamentos através do monitoramento de pressões e vazões em adutoras de água tratada**. Orientador: Prof. Dr. Podalyro Amaral de Souza. 2006. 78 p. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.

MOUNCE, S. R.; BOXALL, J. B.; MACHELL, J. Development and Verification of an Online Artificial Intelligence System for Detection of Bursts and Other Abnormal Flows. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S. l.], v. 136, n. 3, p. 309-318, 1 out. 2010.

MOURA FILHO, C. C. A. de. **Avaliação das perdas hídricas no sistema de abastecimento de água do bairro de Cajupiranga em Parnamirim/RN**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MURTHA, N. A.; CASTRO, J. E.; HELLER, L. Uma perspectiva histórica das primeiras políticas públicas de saneamento e de recursos hídricos no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. XVIII, n. 3, p. 193-210, 1 jul. 2015. DOI https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC1047V1832015. Disponível em: https://www.scielo.br/j/asoc/a/3tP56QFRgxQCX84J9zW9cpC/#. Acesso em: 22 fev. 2024.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. Methods and Tools for Managing Losses in Water Distribution Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S. l.], v. 139, n. 2, p. 166-174, 1 abr. 2013. DOI https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000245. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000245>. Acesso em: 2 abr. 2024.

PINTO, N. M. **Rio de Janeiro, refém das Águas do Guandu**: a aplicação da Lei 9433/97 e o desenvolvimento do processo legal de distribuição das águas de abastecimento ao longo da história de crescimento da cidade do Rio de Janeiro. 2010. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

PORSANI, J. L. **Ground Penetrating Radar (GPR)**: Proposta Metodológica de Emprego em Estudos Geológico-Geotécnicos nas Regiões de Rio Claro e Descalvado – SP. 1999. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro, São Paulo, 1999.

PUDAR, R. S.; LIGGETT, J. A. Leaks in Pipe Netwoarks. **Journal of Hydraulic Engineering**, [S. l.], v. 118, n. 7, p. 1031-1046, Jul. 1992.

PUUST, R.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. A.; KOPPEL, T. A review of methods for leakage management in pipe networks. **Urban Water Journal**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 25-45, 24 fev. 2010.

ROCHA, A. A. História do Saneamento. 1. ed. São Paulo: **Blucher**, 2018. 152 p. v. 1. ISBN 978-85-212-1013-9. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=rSxdDwAAQBAJ&lpg=PA7&ots=id4790T0V5&dq=ROCHA%2C%20Aristides%20Almeida.%20Hist%C3%B3rias%20do%20saneamento.%20Editora%20Blucher%2C%202016.&lr&hl=pt-BR&pg=PA4#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 16 fev. 2024.

RÜCKERT, F. Q. O abastecimento de água no Brasil: uma prospecção bibliográfica no âmbito da historiografia. **Sæculum - Revista de História**, [S. l.], v. 25, n. 43, p. 280-295, 1 jul. 2020. DOI 10.22478/ufpb.2317-6725.2020v25n43.53781. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Fabiano-Quadros-2/publication/347450116_O_abastecimento_de_agua_no_Brasil/links/602a6d3d4585158939a7ec05/O-abastecimento-de-agua-no-Brasil.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2024.

SAMPAIO, A. S. **Avaliação do operador Elitismo na detecção de vazamentos em rede de distribuição de água utilizando o método transiente inverso e algoritmo genético**. Orientador: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo. 2018. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SILVA, G. S. da; TAMAKI, H. O.; LOUREIRO, R. S.; GONÇALVES, O. M. Eliminação de vazamentos em redes externas no contexto de programas de uso racional da água – Estudo de caso: Universidade de São Paulo. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 41–52, 2008. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/5410>. Acesso em: 4 abr. 2024.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos**. Site institucional, 2023. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/>. Acesso em: 02 abril 2024.

SOUZA, A. A. G.; NYLANDER, J. D. A.; PEREIRA, J. A. R.. Análise da sustentabilidade da prestação dos serviços do sistema de abastecimento de água no município de Belém-PA**. Revista Tocantinense de Geografia**, [S. l.], v. 10, n. 21, p. 95–114, 2021. DOI: 10.20873/rtg.v10n21p95-114. Disponível em: https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/geografia/article/view/10946. Acesso em: 18 fev. 2024.

SOUZA, C. M. N. *et al.* **Saneamento**: promoção da saúde, qualidade de vida e sustentabilidade ambiental [online]. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 2015. Temas e saúde collection, 140 p. ISBN: 978-85-7541-523-8.

WHATELY, M.; CAMPANILI, M. **O século da escassez**: Uma nova cultura de cuidado com a Água: Impasses e Desafios. Editora Schwarcz-Companhia das Letras, 2016.

ZANIBONI, N. **Equipamentos e metodologias para o controle e redução de perdas reais em sistemas de abastecimento de água**. Orientador: Prof. Dr. Milton Tomoyuki Tsutiya. 2009. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.