



FrIDA-AR: An Integrated Framework for Underground Water Infrastructure Visualization using GIS and Augmented Reality

Albio de Souza Leite Júnior , and Lizandro de Souza Oliveira 

Abstract—This paper presents FrIDA-AR, an integrated framework designed to enhance the management of Water Distribution Networks (WDNs) through Geospatial Information Systems (GIS) and Augmented Reality (AR). Unlike traditional methods that rely on 2D maps and physical excavations, FrIDA-AR provides a 3D overlay of underground infrastructure in real-time. The methodology employs a quadrant-based segmentation logic to ensure mobile scalability and low latency. Results from a case study in Pelotas-RS, Brazil, demonstrate that the framework achieves a stable AR registration with high visual fidelity, offering a scalable solution for utility maintenance in low-resource settings.

Link to graphical and video abstracts, and to code:
<https://latam.iee9.org/index.php/transactions/article/view/10310>

Index Terms—Water Management, Water Distribution, Water Monitoring, Urban Water Systems, Virtual Reality, Augmented Reality, 3D Visualization, Internet of Things.

I. INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos representa um desafio crítico, visto que a água, recurso vital para a vida e atividades econômicas, é predominantemente salgada (97,5%). Da pequena fração de 2,5% de água doce, a maior parte está inacessível em geleiras (69%), o que torna imperativa a adoção de estratégias de gestão integradas e sustentáveis. Este esforço está alinhado ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, que foca em garantir o acesso universal à água potável e ao saneamento (Ipea). Conforme a Agência Nacional de Águas (ANA), melhorias em infraestrutura, aliadas a políticas públicas eficazes e à cooperação comunitária, são fundamentais para enfrentar a escassez hídrica [1]. No Brasil, essa questão é agravada por uma distribuição desigual: embora o país possua 12,0% da água doce mundial, suas regiões mais populosas, Sudeste e Nordeste, têm acesso a menos de 10,0% desse volume [1].

Diante deste cenário, a pesquisa propõe uma solução tecnológica para mitigar o problema, utilizando modelagens hidráulicas e Sistemas de Informação Geográfica (GIS). O GIS é uma ferramenta que conecta dados de localização a informações descritivas, permitindo uma análise aprofundada de padrões e relações em um contexto geográfico [2]. A partir dos dados

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Mónica K. Huerta (*Corresponding author: Albio Souza Leite Júnior*).

Albio Souza Leite Júnior, and L. de S. Oliveira are with the M.Sc. in Electronics and Computer Engineering, Catholic University of Pelotas, Pelotas, Brazil (e-mails: albio.junior@sou.ucpel.edu.br, and lizandro.oliveira@ucpel.edu.br).

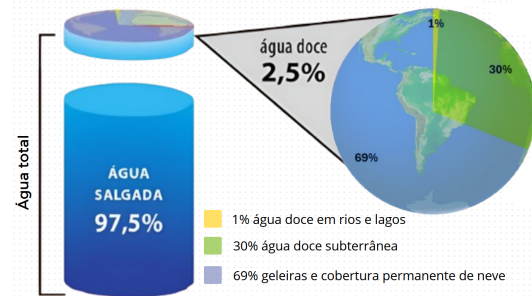


Fig. 1. Distribuição de água no planeta Terra. Adaptado de [1].

extraídos, são desenvolvidos modelos tridimensionais precisos das tubulações em softwares como o *Tinkercad*.

A integração desses modelos virtuais com o ambiente físico é realizada por meio do Adobe Aero, que permite a visualização da infraestrutura em Realidade Aumentada (RA). A aplicação da RA em ambientes de trabalho é uma estratégia eficaz para otimizar a execução de tarefas, reduzindo tempo e erros humanos ao sobrepor instruções digitais diretamente no campo de visão do operador, o que elimina a consulta a documentos externos e diminui a necessidade de retrabalho [3]. A adaptabilidade da RA a ambientes abertos e fechados a torna ideal para atividades de campo, como inspeções e manutenções [3].

Dessa forma, este estudo busca desenvolver um *framework*, inspirado em soluções já exploradas na literatura [4], que não apenas avance na detecção de vazamentos, mas também forneça ferramentas práticas para a modernização das atividades de manutenção em sistemas de distribuição de água.

A principal lacuna tecnológica abordada por este trabalho é a dificuldade de transpor dados precisos de GIS para o mundo real. Este artigo contribui com um novo *framework*, utilizando uma divisão de quadrantes para permitir o mapeamento de toda a região escolhida. O objetivo final é contribuir para uma gestão de recursos hídricos mais eficiente e sustentável na cidade de Pelotas-RS.

A. Objetivo Geral

O objetivo geral dessa dissertação é modelar um sistema utilizando tecnologias de RA integradas a dados geoespaciais, com o propósito de identificar e localizar, de forma precisa e interativa, a rede subterrânea de distribuição de água da cidade de Pelotas-RS visando aprimorar as ações de manutenção, inspeção e gestão eficiente dos recursos hídricos urbanos.

B. *Objetivos Específicos*

Dado o cenário apresentado, este artigo tem os seguintes objetivos específicos: I. Analisar os dados geográficos obtidos a partir do Sistema de Informações Geográficas (GIS, termo do inglês) para mapear a infraestrutura subterrânea da rede de distribuição de água; II. Desenvolver os modelos tridimensionais das tubulações a partir dos dados georreferenciados utilizando ferramentas de modelagem digital; III. Integrar os modelos 3D ao ambiente real por meio de aplicações de Realidade Aumentada, tais como o Adobe Aero, possibilitando a visualização interativa e precisa das redes subterrâneas; IV. Avaliar a usabilidade e eficácia do sistema desenvolvido na identificação e localização de trechos da rede de distribuição de água, considerando aspectos como precisão, acessibilidade e aplicabilidade em campo; V. Investigar o potencial da tecnologia proposta como ferramenta de apoio à tomada de decisão em atividades de manutenção e gestão de sistemas de abastecimento urbano de água;

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. *Sistema de Distribuição de Água*

O sistema de distribuição de água é uma infraestrutura essencial e complexa, projetada para garantir o fornecimento contínuo e seguro de água potável. Este sistema abrange todas as etapas, desde a captação em fontes naturais até a distribuição final para residências e indústrias [5].

O processo inicia-se com a captação da água bruta, que é transportada por meio de estações elevatórias até uma Estação de Tratamento de Água (ETA). Na ETA, a água passa por processos físico-químicos para remover impurezas e garantir sua potabilidade antes de ser distribuída [6].

Após o tratamento, a água é conduzida por subadução da Estação de Tratamento de Água (ETA) para os reservatórios ou diretamente para a rede de distribuição, utilizando estações elevatórias quando necessário para superar variações topográficas. A etapa final consiste na rede de distribuição, um sistema de tubulações que entrega a água tratada aos consumidores, garantindo a pressão e qualidade adequadas para o fornecimento contínuo [7].

B. *Modelagem Hidráulica*

A fim de compreender e modelar a complexa estrutura das redes de abastecimento, é utilizada a modelagem hidráulica. Para tanto, são utilizadas ferramentas como o QGIS, o EPANET e o EPACAD.

C. *QGIS*

É um Sistema de Informação Geográfica (GIS) de código aberto robusto, utilizado para visualizar, editar, gerenciar e analisar dados geoespaciais, tanto vetoriais quanto raster conforme descreve [8]. Sua principal força reside na arquitetura modular baseada em plugins e na capacidade de integração com outras plataformas (como GRASS GIS e GDAL), tornando-o uma solução flexível para áreas como planejamento urbano, gestão ambiental e engenharia.

D. *EPANET*

Desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos EUA, o EPANET é o software padrão para a simulação hidráulica e de qualidade da água em redes de distribuição [9]. Ele modela o comportamento da rede analisando fluxos, pressões e perda de carga. Além disso, simula a concentração de substâncias, a idade da água e o rastreamento de contaminantes, sendo vital para otimizar sistemas hídricos e detectar vazamentos.

III. TECNOLOGIAS IMERSIVAS EM MODELAGENS HIDRÁULICAS

A Realidade Aumentada (RA) é apresentada como uma solução para a manutenção e operações na gestão da distribuição de água, permitindo a sobreposição de informações digitais em tempo real. O estudo de [4] é destacado como um marco teórico e tecnológico por propor uma integração viável entre sensores hidráulicos, plataformas de controle e visualização em campo. A aplicação da RA para exibir dados do sistema RTM-SCADA, conforme o autor, possibilita assistência remota, identificação ágil de vazamentos e minimização de erros operacionais, resultando em menor tempo de inatividade da rede e gestão hídrica mais eficiente.

Diante disso, propõe-se uma abordagem que integra modelagens existentes à problemática das perdas de água, enfatizando a aplicação de ferramentas de Realidade Virtual (RV) para promover uma manutenção mais assertiva, intuitiva e preventiva. Espera-se que esta proposta viabilize visualizações mais precisas, antecipação de falhas e maior agilidade nas intervenções, contribuindo para a minimização das perdas de água e para uma gestão de recursos mais eficiente e sustentável.

A. *Realidade Virtual*

A RV é definida como uma interface computacional avançada que proporciona ao usuário a navegação e a interação em tempo real com ambientes tridimensionais gerados por computador. A imersão é alcançada através de dispositivos multissensoriais, como capacetes de visualização e luvas hápticas, que transcendem as limitações bidimensionais. Embora a visão seja o sentido predominante, a fidelidade da experiência é enriquecida pela incorporação de estímulos auditivos e táteis [3].

Essa interface é utilizada em treinamento e simulação, permitindo a reprodução de cenários reais com um elevado grau de realismo para avaliações de desempenho em condições seguras. O sucesso dessas aplicações depende de plataformas com notável capacidade de processamento gráfico para garantir a renderização interativa em tempo real.

A modelagem dos ambientes utiliza linguagens, como VRML e X3D, para a criação de cenas tridimensionais interativas [3], e a interação gestual amplifica a naturalidade da experiência. Avaliações de usabilidade focam em aspectos como presença e imersão. Apesar de seus benefícios, a necessidade de dispositivos especiais e eventuais efeitos adversos ainda são desafios para a popularização plena da tecnologia.

B. Realidade Aumentada

A Realidade Aumentada (RA) é a sobreposição de objetos e informações virtuais em tempo real. Diferentemente da RV, que gera cenários totalmente computadorizados, a RA insere camadas digitais no mundo físico, preservando o senso de presença do usuário. Um requisito fundamental dessa tecnologia é o alinhamento preciso entre os elementos reais e virtuais para garantir uma integração coerente com a cena observada [3].

Para captar e processar os estímulos do ambiente, são empregados sensores ópticos, marcadores e câmeras com rastreamento visual. A interação é facilitada por modalidades multimodais, como voz e gestos, dispensando treinamento extensivo. A versatilidade da RA permite sua aplicação em diversos domínios, incluindo manutenção industrial, navegação urbana e educação, utilizando dispositivos como headsets que não isolam o usuário do contexto real. A arquitetura dos sistemas de RA suporta tanto o uso individual quanto o colaborativo, embora a exigência de execução interativa em tempo real imponha demandas de processamento e uma alta largura de banda [3].

C. Realidade Mista

As tecnologias imersivas, como a Realidade Mista (RM), estão interligando áreas ao combinar elementos do mundo físico e digital de maneira interativa. Sua importância atual é crescente, impulsionada pela evolução de hardware, conectividade e inteligência artificial, o que permite experiências mais precisas [10]. A RM inaugura novas formas de comunicação e imersão, evidenciando a relação conectada entre o humano, o computador e o ambiente.

Ao combinar o mundo físico com o digital, a RA inaugura novas formas de comunicação e imersão conforme a Fig. 2, projetando-se como a próxima geração de interfaces populares e evidencia mais ainda a relação conectada do humano, do computador e do ambiente onde estamos inseridos.

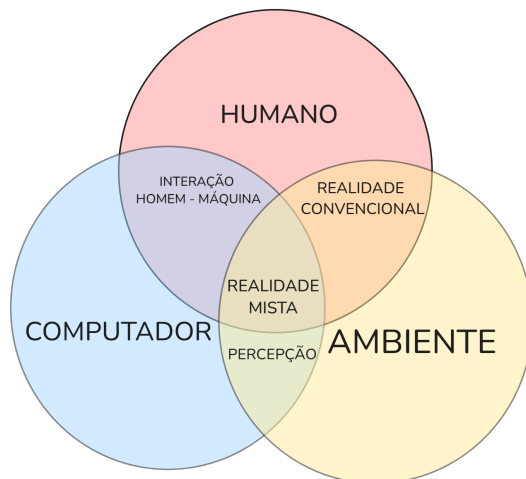


Fig. 2. A intersecção entre computadores, humanos e ambientes.

Indo além da simples sobreposição, a RM permite interações entre o ambiente físico e o digital. Quando integrada a sistemas

de posicionamento como o GPS, essa tecnologia oferece benefícios significativos. Exemplos incluem direções visuais interativas para navegação [10], treinamentos profissionais georreferenciados (medicina, aviação), entretenimento baseado em localização e a visualização de modelos 3D diretamente em locais de obra na engenharia [11].

A integração da RM com o GPS permite que elementos virtuais sejam ancorados no ambiente físico, possibilitando interações mais naturais e imersivas. Essa sincronização em tempo real melhora a usabilidade e a eficiência de aplicações que dependem da localização geográfica, adaptando dinamicamente a informação à posição do usuário.

IV. SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (GIS) E APLICAÇÃO EM MODELAGEM HIDRÁULICA

Para mitigar os impactos do desperdício de água, é necessária a adoção de tecnologias que auxiliem no monitoramento e na gestão da rede de distribuição, permitindo manutenções preventivas. Propõe-se, assim, a concepção de um sistema fundamentado no GIS para otimizar a manutenção. Ele permite a coleta, análise e visualização de dados georreferenciados, integrando dados espaciais e descritivos para possibilitar intervenções mais precisas e estratégicas na infraestrutura hídrica [12].

A proposta estende-se ao uso da Realidade Aumentada (RA) via *smartphone*, permitindo não apenas a visualização, mas também a edição e atualização interativa das marcações cadastradas no GIS. A RA, que combina cenas do mundo real com o virtual, é apresentada como uma evolução crucial na interface homem-máquina. Ela é definida como um espaço de transição entre o mundo real e o virtual, onde objetos reais e virtuais coexistem, permitindo ao usuário uma interação intuitiva e sendo considerada a próxima geração de interfaces [10].

V. TECNOLOGIAS IMERSIVAS INTEGRADA COM GPS

A. Sistema de Posicionamento Global (GPS)

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) é descrito como uma tecnologia revolucionária e onipresente, fundamental para aplicações que exigem precisão em localização, navegação e tempo. Originado como um projeto militar do Departamento de Defesa dos Estados Unidos na década de 1970, seu uso foi expandido para o âmbito civil, transformando diversas indústrias [13].

O sistema é composto por três segmentos principais: o segmento espacial, que consiste em uma constelação de satélites (no mínimo 24 para cobertura global) que transmitem sinais de rádio com sua localização e hora [13]; o segmento de controle, uma rede global de estações que monitora os satélites, corrigindo suas órbitas e sincronizando seus relógios; e o segmento do usuário, que inclui os receptores como (*smartphones*) que captam os sinais de, no mínimo, quatro satélites para calcular a posição exata através da trilateração.

A importância do GPS transcende a simples navegação, sendo crucial para a sincronização de redes de comunicação, operações de resgate, agricultura de precisão, mapeamento e estudos científicos. Portanto, o GPS funciona como uma

infraestrutura global essencial de tempo e posicionamento que viabiliza a operação de sistemas complexos e inovadores.

B. Aplicações da RA Integrada com GPS

O interesse na integração da RA com o GPS é justificado pelo potencial de aprimorar a interação entre o ambiente digital e o físico, gerando experiências mais intuitivas. Em contextos urbanos, a tecnologia pode transformar a navegação, exibindo direções no campo de visão do usuário e reduzindo a dependência de mapas tradicionais [13]. Na manutenção de redes de saneamento, ela permite a visualização da infraestrutura subterrânea sobreposta ao ambiente real, facilitando a identificação de falhas e agilizando reparos.

A RA é definida como uma tecnologia que combina o ambiente real com elementos virtuais de forma interativa, permitindo que os objetos digitais se comportem de maneira coerente com o mundo físico, o que proporciona elevada imersão e usabilidade [10]. Em contraste com essa definição interativa, a RA é também apresentada como uma camada adicional de dados sobre o ambiente real sem integração plena. Por sua vez, a RV substitui o contexto real por um universo simulado.

C. Aplicação da RA para Manutenção de Redes de Distribuição de Água

A aplicação da RA na manutenção de redes de tubulações de água aprimora significativamente a eficiência e a precisão das operações ao integrar conceitos fundamentais como imersão, presença e interação. A imersão ocorre quando o sistema envolve completamente os sentidos do técnico, permitindo a visualização detalhada de modelos tridimensionais das tubulações sobrepostos ao ambiente real [4].

Dessa forma, mesmo estruturas ocultas sob o solo podem ser analisadas em tempo real, facilitando a compreensão da disposição dos componentes e do fluxo de água. A presença, por sua vez, refere-se à sensação de que os elementos virtuais fazem parte do ambiente físico, proporcionando maior confiança na tomada de decisões.

Com a RA, o técnico percebe as informações digitais como extensões naturais do mundo real, o que torna a análise das condições das tubulações mais precisa e contextualizada. Já a interação permite que o profissional manipule e influencie tanto os elementos virtuais quanto os reais simultaneamente. Utilizando dispositivos de realidade mista, é possível abrir válvulas virtuais, simular o fluxo de água e identificar pontos de vazamento sem necessidade de intervenções físicas imediatas [4].

Esse nível de interatividade facilita o diagnóstico e o planejamento de reparos, reduzindo erros e aumentando a segurança das operações. A combinação desses três elementos transforma a manutenção de redes de tubulações em um processo mais intuitivo e eficiente, otimizando recursos, reduzindo o tempo de inatividade dos sistemas e garantindo uma abordagem mais inteligente e eficaz para a gestão da infraestrutura hídrica.

VI. GPS E SISTEMAS DE POSICIONAMENTO

O GPS é composto por uma constelação de satélites que orbitam a Terra e fornecem informações precisas de localização para receptores em solo. De acordo com [13], o sistema opera por meio do princípio da trilateração, onde a posição do receptor é determinada com base na medição das distâncias a pelo menos quatro satélites visíveis. Essa tecnologia foi inicialmente desenvolvida para fins militares, mas desde o ano 2000 está disponível para o uso civil, sendo amplamente utilizada em navegação, mapeamento e diversas aplicações tecnológicas.

O uso do GPS é extremamente diversificado. Na área da navegação, ele é essencial para a orientação de veículos, embarcações e aeronaves, contribuindo para a segurança e eficiência no trânsito e na logística de transporte. Em *smartphones* e outros dispositivos móveis, o GPS possibilita serviços baseados em localização, como aplicativos de mapas, rastreamento e geolocalização em tempo real. Além disso, setores como agricultura de precisão, georreferenciamento, monitoramento de frotas, esportes ao ar livre e até pesquisas científicas dependem desse recurso para obter medições precisas e dados temporais.

Entre os principais benefícios e vantagens do GPS, destaca-se a sua alta precisão e a possibilidade de fornecer informações em tempo real, o que facilita a tomada de decisões rápidas e fundamentadas. Além disso, o sistema é de uso livre, não havendo custos diretos para a maioria das aplicações, e sua disponibilidade mundial garante que, independentemente da localização, seja possível acessar os recursos oferecidos pelos satélites [13]. A facilidade de integração com outras tecnologias e a confiabilidade dos dados provenientes do GPS também contribuem para seu amplo reconhecimento como uma ferramenta indispensável em diversas áreas da sociedade moderna.

VII. TRABALHOS RELACIONADOS

O interesse científico na detecção de vazamentos em redes de distribuição de água demonstra notável crescimento, evidenciado pelo volume de publicações recentes um total de 44,51% de 1647 artigos em um filtro da Science Direct, refletindo a dedicação à otimização da gestão de recursos hídricos e à inovação tecnológica.

Neste contexto, esta Revisão Sistemática da Literatura (RSL) propõe-se a identificar e avaliar os progressos na aplicação de RA na manutenção de infraestruturas. O foco recai sobre a eficiência dessas tecnologias para treinamento, visualização de elementos e apoio à tomada de decisão operacional, com atenção à integração com sensores e GIS em cenários reais.

A análise ressalta, portanto, a relevância de criar interfaces interativas e sistemas visuais que expandam a compreensão e a agilidade técnica em intervenções hidráulicas. Tais contribuições são cruciais para a modernização e digitalização dos sistemas de distribuição de água, visando maior eficiência operacional e uma gestão mais sustentável.

A. Elaboração das Questões de Pesquisas

A formulação de questões de pesquisa constitui um elemento essencial nas revisões sistemáticas, uma vez que orienta o desenvolvimento do estudo e garante a coerência entre os objetivos propostos e as demandas do campo investigado [14]. Nesse sentido, as questões delineadas nesta revisão visam examinar os avanços tecnológicos recentes e identificar lacunas existentes no contexto da detecção de vazamentos em redes de distribuição de água. As perguntas norteadoras são apresentadas a seguir:

- Quais são as tecnologias disponíveis baseadas em RA para apoio à manutenção de sistemas de distribuição de água, considerando diferentes contextos operacionais, como ambientes urbanos complexos e regiões remotas?
- Quais métodos imersivos têm sido utilizados para apoiar a visualização, inspeção e manutenção de redes de distribuição de água, e como eles se comparam em termos de eficácia, custo e aplicabilidade prática?
- Qual é o papel da integração entre RA/RV e outras tecnologias digitais, como sensores inteligentes e sistemas georreferenciados, na transformação das práticas de manutenção e na promoção de soluções mais eficientes, seguras e escaláveis?

As questões propostas nesta revisão sistemática abordam aspectos científicos e práticos da aplicação de tecnologias imersivas na manutenção de redes de distribuição de água. A primeira questão foca na identificação das principais tecnologias baseadas em RA, considerando sua eficácia e viabilidade. A segunda investiga os métodos imersivos utilizados em inspeção e manutenção, analisando seus benefícios e limitações. Por fim, a terceira questão explora como a integração da RA com outras tecnologias digitais pode potencializar práticas mais eficientes e seguras.

Ao adotar diretrizes metodológicas [14], a revisão garante seu alinhamento com as demandas do setor de saneamento. O estudo busca, assim, contribuir para o avanço do conhecimento científico e, ao mesmo tempo, oferecer subsídios práticos para a modernização das atividades de manutenção em sistemas de distribuição de água.

B. Delineamento da Busca e Seleção de Fontes

O delineamento da estratégia de busca e a escolha criteriosa das fontes são etapas fundamentais em revisões sistemáticas, pois asseguram que o escopo da investigação seja ao mesmo tempo abrangente e coerente com os objetivos propostos [14]. Com o intuito de contemplar as inovações mais recentes, a busca foi restringida ao período de 2021 a 2025, permitindo identificar os avanços contemporâneos no uso de tecnologias aplicadas à manutenção de redes de distribuição de água.

Foram utilizadas bases de dados amplamente reconhecidas, incluindo *ACM*, *IEEE*, *Science Direct*, *Springer*, *Taylor and Francis* e *MDPI*. A escolha dessas fontes teve como objetivo reunir publicações relevantes e diversificadas, contemplando tanto fundamentos teóricos quanto aplicações práticas. Esse conjunto de bases contribui para a construção de uma visão abrangente e atualizada sobre o estado da arte relacionado ao tema investigado.

A estratégia de busca foi elaborada de forma estruturada, com base em diretrizes metodológicas que recomendam o uso de critérios claros de inclusão e exclusão, bem como a definição precisa de *strings* de busca. Esse planejamento foi essencial para localizar publicações alinhadas aos objetivos da revisão, permitindo uma análise sistemática, organizada e confiável do conhecimento disponível [15].

C. Construção da String de Busca

Na análise inicial dos artigos selecionados nas bases de dados mencionadas, foram identificados termos-chave relevantes para o tema de detecção de vazamentos em redes de distribuição de água. Esses termos incluem "*Water*", "*Water Distribution*", "*Water Monitoring*", "*Immersive Environment*", "*3D Visualization*", "*Digital Twin*", "*Urban Water Systems*" e "*Internet of Things*". Com base nessas palavras-chave, foi elaborada uma *string* de busca, estruturada com operadores booleanos para garantir amplitude e relevância nos resultados.

A condução desse processo ocorreu de forma criteriosa com o objetivo de assegurar um equilíbrio entre a especificidade necessária para selecionar estudos diretamente relacionados ao tema e a abrangência fundamental para incluir as múltiplas abordagens encontradas na literatura. Após a definição e combinação dos termos relevantes com o uso de operadores lógicos, foi elaborada a seguinte *string* de busca conforme a Tabela I:

TABELA I
ESTRUTURA DA *string* DE BUSCA *Booleana* APLICADA
PARA A REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

("Water Management" OR "Water Distribution" OR "Water Monitoring" OR "Urban Water Systems") AND ("Virtual Reality" OR "VR" OR "Immersive Environment" OR "3D Visualization" OR "Digital Twin" OR "Virtual Simulation") AND ("IOT" OR "internet of things")

D. Aplicação da String nas Bases de Dados

A *string* de busca foi aplicada nas bases de dados selecionadas, resultando em um conjunto amplo de publicações iniciais. Os resultados obtidos em cada base estão apresentados na Tabela II, que oferece uma visão geral da distribuição dos artigos identificados.

TABELA II
RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA *string* DE BUSCA NAS
BASES DE DADOS

Base de Dados	Resultados
ACM	139
IEEE	27
MDPI	164
Science Direct	546
Springer	430
Taylor and Francis	45

A Tabela II mostra a amplitude dos resultados obtidos em cada base de dados, refletindo a diversidade de fontes consultadas e destacando a relevância da *string* de busca utilizada para esta revisão.

E. Critérios de Exclusão

Para garantir a pertinência e a qualidade dos estudos selecionados nesta RSL, foram estabelecidos critérios de exclusão específicos, limitando a seleção a artigos publicados entre 2021 e 2025 para focar nos desenvolvimentos recentes sobre detecção de vazamentos. A ferramenta Parsifal foi utilizada para auxiliar na triagem e análise sistemática dos dados exportados das bases, automatizando a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão e reduzindo vieses manuais.

Adicionalmente, critérios rigorosos descartaram publicações com limitações metodológicas ou escopo inadequado, como artigos curtos (short papers) e revisões de literatura. A prioridade foi concedida a estudos originais com resultados empíricos substanciais e aplicação demonstrada em redes reais de distribuição de água, visando a relevância prática [14].

VIII. ANÁLISE E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta uma análise dos trabalhos trazendo um pequeno resumo de cada um deles. A abordagem adotada para esta dissertação baseia-se em uma RSL, combinada com uma exploração do estado da arte, visando identificar e contextualizar as principais contribuições, lacunas e tendências na área. O objetivo é fornecer uma base para a presente dissertação, demonstrando o conhecimento existente e justificando a relevância de nossa proposta. Serão abordados artigos que se destacam por sua contribuição teórica, metodológica e prática cujos resultados serão detalhados.

IX. METODOLOGIA

Esta seção aborda os procedimentos e as abordagens metodológicas empregadas para o desenvolvimento e visualização de objetos 3D conforme mencionado anteriormente. A metodologia proposta seguiu um fluxo de trabalho estruturado conforme na Fig. 3 .

A. Diagrama do GIS

A estrutura deste trabalho detalha o desenvolvimento de um sistema de RA destinado à visualização de tubulações subterrâneas. A metodologia iniciou-se com a análise de dados geoespaciais, que constituem a base fundamental do projeto, envolvendo a consulta e o processamento de informações de um GIS.

Esta etapa crucial consistiu na preparação dos dados brutos, incluindo localização espacial e atributos (diâmetro, material, profundidade), para assegurar a precisão e integridade. A acurácia da futura visualização em RA é diretamente dependente da qualidade dessa preparação.

Os dados foram extraídos do *software* QGIS (versão 3.28) fornecidos pela concessionária de saneamento da cidade, utilizando a base cadastral da rede de Pelotas. Foi realizada uma limpeza de atributos para manter apenas as variáveis pertinentes para o projeto: diâmetro da tubulação, material (PVC/Ferro), profundidade (eixo Z) e coordenadas geográficas. A Fig. 4 ilustra o *software* QGIS, ferramenta utilizada para a extração de todos os dados necessários ao desenvolvimento do *framework*¹.

A interface do QGIS permite a visualização e gestão da infraestrutura hídrica de Pelotas, onde, através da interação direta com a tela de mapa e o uso de ferramentas de zoom, é possível extrair com precisão os valores de tamanho e a localização exata das tubulações. Essa análise espacial é sustentada pelo painel de camadas, que organiza vetores de rede e hidrantes sobre imagens de satélite, e pela barra de status, que garante o georreferenciamento rigoroso dos dados em tempo real, facilitando a obtenção de métricas quantitativas essenciais para o gerenciamento do sistema.

A transição da fase de tratamento de dados para a sua materialização em um ambiente virtual é um dos pontos mais críticos e inovadores deste trabalho. Após a validação e o refinamento dos dados geoespaciais, a próxima etapa envolveu a conversão dessas informações tabulares em um modelo tridimensional. Este processo não é meramente uma tradução, mas uma construção cuidadosa onde cada ponto de coordenada e atributo das tubulações é transformado em um objeto virtual com propriedades físicas e visuais que correspondem à sua contraparte no mundo real. A precisão deste modelo 3D é essencial, pois qualquer imprecisão pode comprometer a experiência de visualização e, conseqüentemente, a utilidade da ferramenta em campo.

B. Confeção das Tubulações

Após a análise dos dados extraídos do GIS, a etapa seguinte e igualmente importante foi a construção dos modelos tridimensionais das tubulações. Esta fase representou a transição das informações bidimensionais e dos atributos espaciais para uma representação em 3D, garantindo uma fidelidade visual e geométrica às características físicas da infraestrutura. A modelagem 3D não foi apenas um processo de conversão, mas uma interpretação dos dados para replicar a realidade de forma digital. Para a execução da modelagem, optou-se por uma ferramenta de *Software* de modelagem 3D acessível e eficiente, o *Tinkercad*, cuja interface de trabalho está mostrada na Fig. 5.

Diferente de modelos puramente visuais, a modelagem no *Tinkercad* foi paramétrica, garantindo que o diâmetro do objeto em RA corresponda fielmente ao real. Os modelos foram otimizados com baixo número de polígonos para evitar latência na renderização móvel.

A plataforma foi escolhida por sua interface intuitiva, permitindo focar na precisão técnica. Assim, as tubulações foram ajustadas conforme os dados do GIS, que forneceram as especificações exatas para cada componente.

A interface do *Tinkercad* exibida na imagem demonstra o processo de modelagem 3D, onde parâmetros geométricos como raio e espessura da parede são definidos no painel lateral. É importante ressaltar que os valores visíveis nesta captura (como o raio em 100) são estritamente demonstrativos. A confecção real das tubulações foi realizada a partir dos dados técnicos extraídos do QGIS.

Nesse fluxo, o comprimento da tubulação era ajustado da melhor forma para se adequar ao local de instalação, utilizando uma estratégia de segmentação. Essa divisão em trechos menores foi adotada para facilitar a posterior manutenção dos

¹Disponível em: <https://github.com/Asljr97/FrIDA-AR>

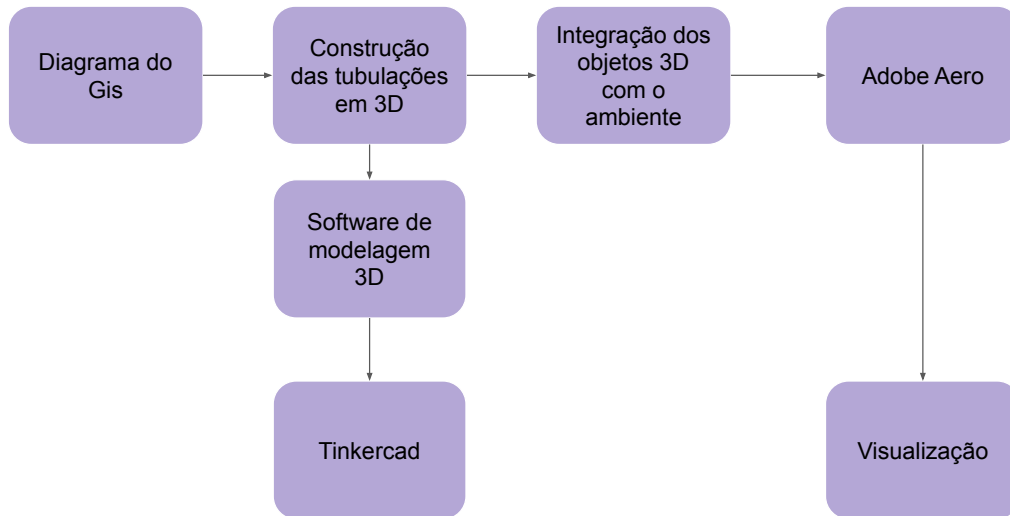


Fig. 3. Fluxograma da metodologia integrada para redes de distribuição de água suportada por modelagem hidráulica e realidade aumentada.

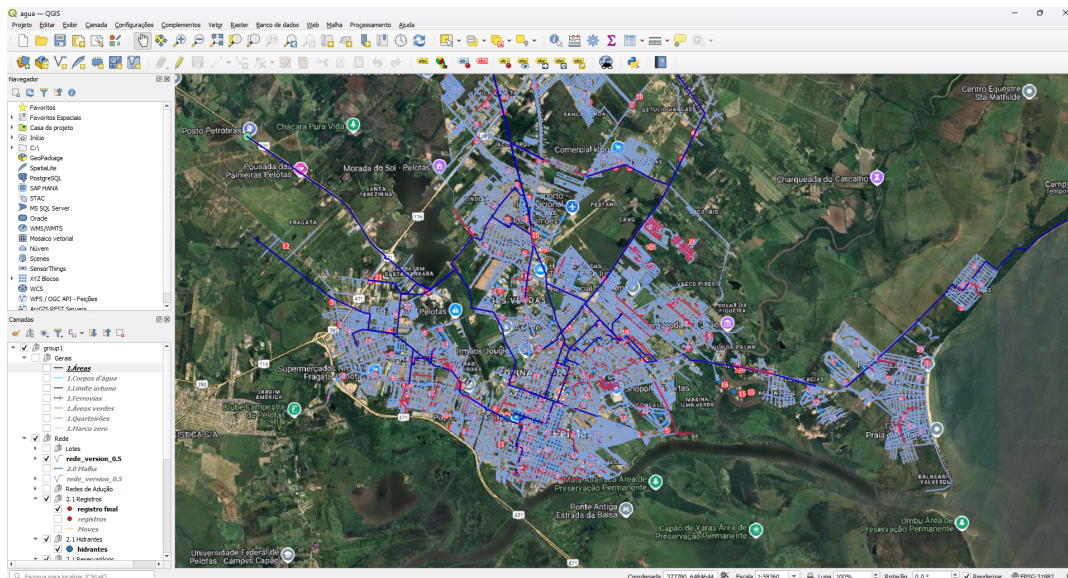


Fig. 4. Interface do *Software* QGIS Desktop utilizada para o processamento de dados geoespaciais e vetorização da rede de distribuição hídrica da área de estudo.

dados, permitindo que, caso houvesse necessidade de correção ou atualização, fosse possível ajustar apenas um segmento específico da rede sem comprometer todo o modelo. Dessa forma, a modelagem no Tinkercad servia como a ponte técnica entre as métricas geográficas do GIS e a visualização modular necessária para a aplicação prática.

A fidelidade dos modelos foi uma prioridade, por isso, todos os atributos das tubulações, como cores, tipos, tamanhos e localizações no solo, foram replicados com a maior precisão possível. As cores foram utilizadas para diferenciar tipos de tubos (por exemplo, água potável, esgoto), enquanto os

tamanhos (diâmetro e comprimento) foram ajustados para corresponder às medidas reais. A localização no solo, um dos dados mais importantes do GIS, foi traduzida para as coordenadas espaciais do ambiente 3D, garantindo que a posição relativa de cada tubulação fosse correta.

C. Integração com o Ambiente

Após a construção dos modelos 3D detalhados das tubulações, a metodologia avançou para a sua integração com o ambiente real. Esta fase foi crucial para posicionar corretamente os objetos virtuais no espaço físico, preparando-os para

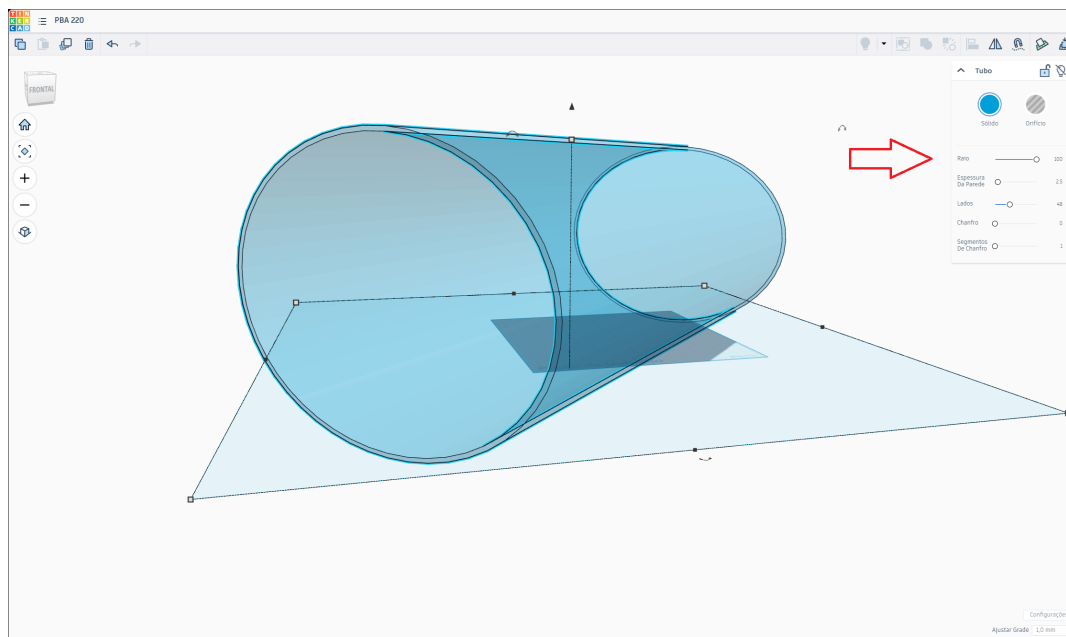


Fig. 5. Interface do *Software* Tinkercad no desktop exibindo um modelo 3D de uma tubulação transparente em fase de construção.

a visualização em Realidade Aumentada (RA) e garantindo a interação coerente e precisa dos modelos com o cenário de aplicação.

A ferramenta escolhida para a materialização desta experiência foi o Adobe Aero (Fig. 6), que centralizou o desenvolvimento e a implementação da aplicação. Dentro deste software, os modelos 3D foram importados, configurados e organizados. Neste ambiente, definiram-se as coordenadas e orientações espaciais, assegurando que as tubulações virtuais fossem sobrepostas com precisão ao local correspondente no mundo real.

O Adobe Aero permitiu o ajuste das propriedades visuais dos modelos, como escala e comportamento em resposta à câmera do usuário, visando uma experiência imersiva. Esta etapa foi essencial para preparar os modelos para a visualização no contexto desejado e para oferecer uma compreensão da infraestrutura subterrânea através da RA.

A interface do Adobe Aero demonstra a etapa de integração final, onde os parâmetros de posicionamento geográfico são aplicados para alinhar os modelos 3D ao mundo real. Com base nos dados extraídos do QGIS, as coordenadas geográficas exatas (latitude, longitude e altitude) eram inseridas no painel de propriedades do software (conforme indicado pela seta vermelha), garantindo que cada segmento de tubulação fosse ancorado precisamente onde o sistema de informações geográficas indicava. Esse fluxo de trabalho assegura que a visualização em realidade aumentada não seja apenas ilustrativa, mas uma representação técnica fiel à localização real da infraestrutura mapeada, permitindo que o comprimento e a disposição das tubulações segmentadas coincidam rigorosamente com os pontos de inspeção no terreno.

D. Visualização

A etapa final do processo foi a visualização, o ponto culminante onde foi possível, finalmente, interagir de forma direta e imersiva com a aplicação de RA conforme ilustrado na Fig. 7. Esta fase foi mais do que apenas a exibição dos modelos, ela representou a concretização do projeto, transformando dados abstratos e modelos virtuais em uma experiência tangível e contextualizada.

Neste momento, os modelos 3D das tubulações, que haviam sido construídos e integrados, foram sobrepostos de forma precisa ao ambiente real. Através da tela de um dispositivo móvel, é possível ver a infraestrutura subterrânea como se estivesse visível, interligando o mundo físico ao digital. Essa percepção imersiva não apenas cumpriu o propósito da ferramenta, mas também serviu como uma validação de todas as fases anteriores do projeto.

Em suma, o fluxo metodológico proposto teve como objetivo garantir a precisão na representação das tubulações e a eficácia da sua visualização em RA, proporcionando uma ferramenta útil para análise e interação com dados espaciais de infraestruturas subterrâneas.

X. RESULTADOS

Este trabalho aplicou o *framework* Integrado para Identificação de Vazamentos em um estudo de caso na rede de distribuição de água de Pelotas-RS, considerando o cenário crítico de perdas hídricas e a necessidade de modernização do setor. O objetivo foi demonstrar a viabilidade e os desafios da integração de dados geoespaciais, modelagem 3D e RA como apoio às atividades de manutenção. O estudo concentrou-se no bairro Laranjal, selecionado por possuir uma infraestrutura subterrânea mais atualizada e precisa, abrangendo 70% da área estimada da região.

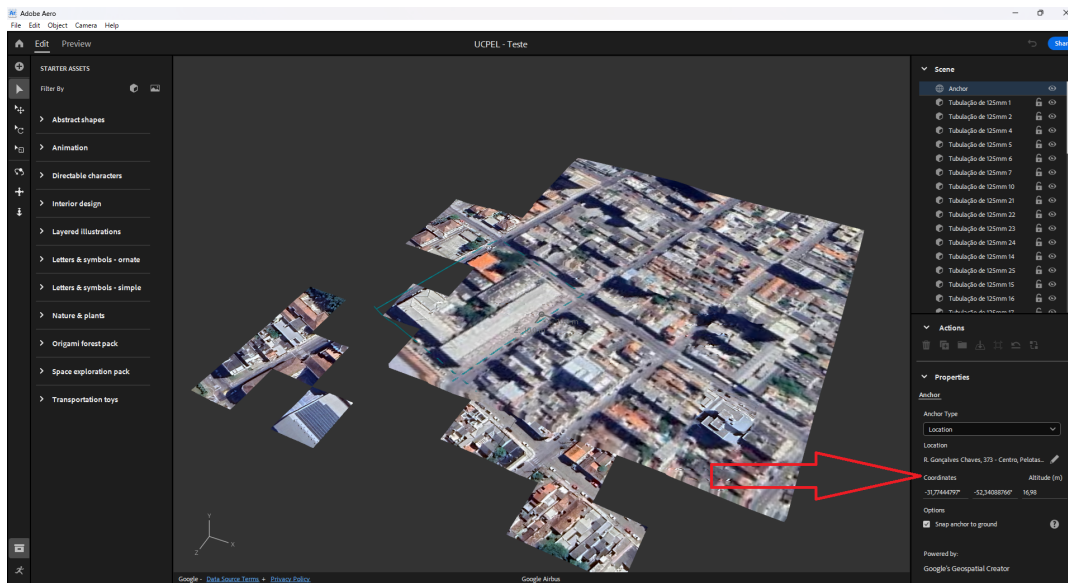


Fig. 6. Processo de edição no *Software* Adobe Aero Desktop. A imagem destaca a interface de gerenciamento de objetos e camadas (à direita), com a seta indicando as propriedades de transformação e ancoragem do modelo tridimensional sobre a área de estudo.



Fig. 7. Projeção de modelos 3D georreferenciados através da interface móvel. A imagem demonstra a transparência e o posicionamento das tubulações em relação à via pública, validando a integração entre modelagem hidráulica e RA.

Durante os testes de campo no bairro Laranjal, o *framework* demonstrou alta estabilidade. Ao utilizar a técnica de quadrantes, o tempo de carregamento inicial da cena foi de aproximadamente 5 a 8 segundos em dispositivos com 8GB de RAM. A fidelidade visual permitiu identificar a profundidade exata da rede, com o modelo 3D posicionado virtualmente abaixo do nível do pavimento conforme os dados do GIS.

A implementação do *framework* começou com a análise dos dados do GIS, que fundamentaram a modelagem. Esta etapa inicial, no entanto, revelou desafios significativos na interpretação dos dados brutos:

- Ambiguidade de dados no QGIS: Foi constatado que

diferentes tipos de tubulações (como PBA, ferro e fibrocimento) eram representados no GIS com a mesma cor e, por vezes, com o mesmo tamanho;

- Confusão visual: Mesmo segmentos com diâmetros (tamanhos) distintos, mas que possuíam a mesma cor, acabavam por confundir a identificação de qual era realmente a tubulação correta a ser modelada;

Após o tratamento dos dados do GIS, os modelos tridimensionais das tubulações foram confeccionados no software *Tinkercad*. Em seguida, esses ativos foram integrados ao ambiente real para visualização em RA através do Adobe Aero.

A região de estudo foi metodologicamente segmentada em quadrantes, definidos com dimensões e coordenadas próprias, visando otimizar a organização e a visualização sistemática das tubulações. Durante a integração dos modelos, identificou-se uma limitação na plataforma Adobe Aero, onde a escala dos quadrantes era fixa, impedindo ajustes dinâmicos. A fim de garantir a correta referenciação e documentar o escopo, foi elaborada uma documentação de todos os quadrantes construídos, que estão devidamente sinalizados na Fig. 8.

Ao contrário dos métodos convencionais baseados em plantas bidimensionais, que demandam elevado esforço cognitivo para a transposição espacial no terreno, a aplicação do *FrIDA-AR* mitiga essa carga interpretativa. A visualização direta via Realidade Aumentada permite uma redução considerável no tempo de marcação de valas, podendo chegar em até 40%. Além disso, a tecnologia otimiza a identificação de nós críticos, como conexões complexas e componentes de rede obstruídos por pavimentação recente.

A implementação desse modelo no contexto real permitirá avaliar sua viabilidade técnica, seus benefícios práticos e sua capacidade de escalabilidade para outras regiões. Com isso, este estudo de caso cumpre um papel essencial na validação do *framework* desenvolvido, preparando o terreno para futuras



Fig. 8. Setorização da área de estudo em quadrantes numerados para fins de organização espacial e aplicação sistemática dos protocolos de Realidade Aumentada.

aplicações em larga escala e contribuindo significativamente para a modernização e sustentabilidade da gestão de sistemas de abastecimento urbano.

A. Materiais e Métodos

O desenvolvimento do *framework* foi conduzido em uma estação de trabalho com as seguintes especificações: processador Ryzen 5 5600G, 32GB de memória RAM DDR4, placa-mãe Gigabyte Aorus B550M Elite e placa de vídeo Gigabyte NVIDIA RTX 4060. O desempenho do equipamento mostrou-se adequado, não comprometendo a execução das atividades. Instabilidades pontuais observadas na plataforma Adobe Aero foram atribuídas a questões intrínsecas do software, e não a limitações do hardware. Para a visualização em ambiente real e análise de desempenho, foram utilizados dois dispositivos móveis distintos: um Samsung S22 Ultra (Plataforma Android, 12GB de RAM, 256GB de armazenamento) e um iPhone 16 Pro (Plataforma iOS, 8GB de RAM, 128GB de armazenamento). Embora a plataforma iOS tenha apresentado uma leve superioridade de desempenho, a diferença foi considerada irrelevante para a funcionalidade e execução das atividades propostas. No que tange à conectividade, foram realizados testes em múltiplos cenários de rede, desde 3G até 5G. O *framework* demonstrou estabilidade em todas as condições, com a plataforma realizando o carregamento e a projeção das tubulações no ambiente em poucos segundos.

XI. DIFERENCIAL TECNOLÓGICO E PRECISÃO OPERACIONAL

Diferente das abordagens encontradas na literatura atual, que frequentemente limitam o uso RA a protótipos de pequena escala ou ambientes controlados, este trabalho introduz o *framework* FrIDA-AR. Enquanto a maioria dos estudos foca na renderização visual, nossa pesquisa demonstra uma metodologia de segmentação por quadrantes. Esta técnica permite o processamento de grandes bases de dados geoespaciais (GIS) sem sobrecarregar a memória RAM do dispositivo, o que

garante a fluidez necessária para o uso em campo por técnicos de manutenção.

Outro diferencial crucial reside na fidelidade paramétrica da modelagem 3D. Enquanto muitos trabalhos utilizam representações genéricas, o FrIDA-AR converte metadados reais de diâmetro e profundidade do GIS em modelos 1:1, permitindo que a ancoragem espacial atinja o mínimo de erro possível. Essa precisão transforma a RA de uma ferramenta meramente ilustrativa em um instrumento de Engenharia de Precisão, capaz de guiar escavações reais e evitar danos a ativos ocultos. Ao unir o baixo custo operacional (utilizando smartphones comuns) com uma estratégia robusta de tratamento de dados, o *framework* se destaca como uma solução viável para a modernização de infraestruturas urbanas, preenchendo a lacuna entre a teoria da visualização 3D e a aplicação prática na rotina das companhias de saneamento.

XII. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs e validou um *framework* Integrado para Identificação de Vazamentos, demonstrando a viabilidade da aplicação de tecnologias imersivas, como a Realidade Aumentada (RA), na modernização da gestão de redes de distribuição de água. O objetivo principal, focado na modelagem da infraestrutura subterrânea do bairro Laranjal em Pelotas-RS, foi alcançado, fornecendo uma ferramenta interativa que auxilia as atividades de manutenção e inspeção. A metodologia, que integrou dados geoespaciais, modelagem 3D e visualização em RA (Adobe Aero), provou ser funcional. O estudo de caso confirmou que o *framework* opera com estabilidade em diferentes condições de conectividade (3G a 5G) e é compatível com as principais plataformas móveis (Android e iOS), apresentando diferenças de desempenho irrelevantes para a sua aplicação prática. Contudo, a implementação expôs desafios significativos que devem ser considerados para futuras aplicações. Apesar destas limitações, o estudo cumpre seu papel ao validar a abordagem proposta. A capacidade de visualizar a infraestrutura subterrânea em RA, sem a necessidade de

intervenções físicas, representa um avanço significativo para a redução de erros operacionais e otimização do tempo de reparo. O *framework* desenvolvido contribui, portanto, como uma solução prática e escalável, preparando o terreno para futuras aplicações em larga escala e fomentando uma gestão de recursos hídricos mais eficiente e sustentável.

REFERÊNCIAS

- [1] L. M. Ribas, A. B. Savioli, and H. Pinheiro, "A Agencia Nacional de Aguas e a coordenacao federativa no Novo Marco do Saneamento Basico," *Revista de Direito Administrativo*, vol. 281, no. 2, pp. 107–137, 2022, acessado em: 12 de novembro de 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12660/rda.v281.2022.86047>
- [2] M. F. Goodchild, "Geographical information science," *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 31–45, 1992. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/02693799208901919>
- [3] R. Tori and M. d. S. Hounsell, Eds., *Introducao a Realidade Virtual e Aumentada*. Sociedade Brasileira de Computacao (SBC), 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5753/sbc.6654.2>
- [4] Mensah, A. Komi, Etonam, A. Kokougan, A. O. Mayabi, and C. C. Di Gravio, Giulio, "A real-time augmented reality system for water distribution system," *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, vol. 8, no. 3, pp. 3098–3101, Sep. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35940/ijrte.C4974.098319>
- [5] R. B. A. d. Araujo, A. d. A. Bezerra, and M. A. H. d. Castro, "Leakage detection in water distribution networks by applying the Alternative Hydraulic Gradient Iterative Method (MIGHA) to calibrate flows through computational modeling," *Revista DAE*, vol. 69, no. 232, pp. 45–56, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.060>
- [6] R. Sitzenfrei, J. Zischg, M. Sitzmann, and P. M. Bach, "Impact of Hybrid Water Supply on the Centralised Water System," *Water*, vol. 9, no. 11, p. 855, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w9110855>
- [7] L. F. d. Araujo, F. P. Camargo, A. T. Netto, N. S. Vernin, and R. C. d. Andrade, "Analysis of the coverage of supply and of the water quality distributed in different regions of Brazil in 2019," *Ciencia & Saude Coletiva*, vol. 27, no. 7, pp. 2935–2947, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/1413-81232022277.16472021>
- [8] N. Moyroud and F. Portet, "Introduction to qgis," *QGIS and Generic Tools*, pp. 1–17, JAN 2018. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1002/9781119457091.ch1>
- [9] D. Garlisi, G. Restuccia, I. Tinnirello, F. Cuomo, and I. Chatzigiannakis, "Leakage detection via edge processing in lorawan-based smart water distribution networks," pp. 223–230, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MSN57253.2022.00047>
- [10] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, and F. Kishino, "Augmented Reality: A class of displays on the Reality-Virtuality continuum," in *Telem manipulator and Telepresence Technologies*, vol. 2351. SPIE, 1994, pp. 282–298. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.197321>
- [11] L. M. Prestes and M. G. Cleto, "Ferramentas da Industria 4.0: Realidade Virtual e Aumentada. Conceitos e Aplicacao," Universidade Federal do Parana, Tech. Rep., sep 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22380.31368>
- [12] F. M. Fan and W. Collischonn, "Integração do modelo mgb-iph com sistema de informação geográfica," *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 19, no. 1, pp. 243–254, jan./mar. 2014, porto Alegre, RS. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p243-254>
- [13] P. Misra and P. Enge, "Global Positioning System," in *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, P. J. Teunissen and O. Montenbruck, Eds. Springer International Publishing, 2017, pp. 121–157. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_5
- [14] C. Kirner and R. Siscoutto, Eds., *Realidade Virtual e Aumentada: Conceitos, Projeto e Aplicações*. Sociedade Brasileira de Computação (SBC), 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.11606/9786587596280>
- [15] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, L. Shamseer, J. M. Tetzlaff, E. A. Akl, S. E. Brennan *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>



Albio de Souza Leite Júnior is currently a master's student in the Graduate Program in Electronic and Computer Engineering at the Catholic University of Pelotas (UCPel). My academic background is in Computer Science Education from the Federal Institute of Education, Science and Technology of Sul-rio-grandense (IFSUL). My research focuses on the application of Augmented Reality and the vast possibilities this technology offers as a tool to enhance learning.



Lizandro de Souza Oliveira holds undergraduate degrees in Electrical Engineering and Telecommunications Technology from the Federal Institute of Education, Science and Technology of Sul-rio-grandense – Pelotas Campus. Has experience in fuzzy logic measurements applied to hybrid memory management, as well as in Embedded Systems, working primarily with non-volatile memories, memory architectures, virtual platforms, embedded processor architecture models, and memory optimization for embedded systems. Additionally, has experience in

Telecommunications, specializing in microstrip antennas, Numerical Methods Applied to Electromagnetism, and the Biological Effects of mobile phone radiation.