

Modelo de Monitoramento para Prevenção de Vazamentos em Sistemas de Esgotamento Sanitário com IoT e Computação em Nuvem

Monitoring Model for Leak Prevention in Sanitary Sewer Systems Using IoT and Cloud Computing

Sara Gonçalves Pereira

Universidade de Vassouras

eusaragoncalves@gmail.com

Gabriel Silva Santana

Universidade de Vassouras

gsantana.dev@gmail.com

Ana Clara Moledo Neves

Universidade de Vassouras

anamoledo26@gmail.com

Daniel Alvarez Gonçalves

Universidade de Vassouras

alvarezgonca@gmail.com

José Felipe de Mattos Alves

Universidade de Vassouras

jfmalves@gmail.com

Márcio Alexandre Dias Garrido

Universidade Federal Fluminense

marciogarrido@id.uff.br

RESUMO

A gestão de sistemas de esgotamento sanitário requer soluções capazes de ampliar a continuidade operacional e antecipar condições associadas a extravasamentos. Este estudo propõe um modelo conceitual de monitoramento de redes de esgoto fundamentado na integração de Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem e recursos digitais de visualização e alerta. A arquitetura compreende sensor de nível, microcontrolador para processamento das leituras e comunicação para transmissão, armazenamento e análise dos dados. O protótipo foi desenvolvido e avaliado em ambiente de simulação, contemplando filtragem das oscilações por médias, conversão das medições em indicadores de ocupação e acionamento de alertas. Os resultados evidenciaram a operação conceitual do sistema e a representação do nível de esgoto em tempo de execução. Entretanto, a ausência de validação física e de testes em campo impede inferências sobre precisão, desempenho e confiabilidade em condições reais. A proposta constitui uma base para desenvolvimento, calibração e validação experimental futura, especialmente em contextos de recursos limitados.

* Recebido em 01 de julho de 2025, aprovado em 15 de julho de 2025, publicado em 31 de agosto de 2025.

Palavras-chave: Infraestrutura de esgotamento sanitário. Monitoramento em tempo real. Transformação digital. Inovação frugal. Saneamento inteligente.

ABSTRACT

Management of wastewater collection systems requires solutions capable of enhancing operational continuity and anticipating conditions associated with sewer overflows. This study proposes a conceptual monitoring model for sewer networks based on the integration of the Internet of Things (IoT), cloud computing, and digital visualization and alerting resources. The architecture comprises a level sensor, a microcontroller for processing measurements, and a communication infrastructure for data transmission, storage, and analysis. The prototype was developed and evaluated in a simulation environment, incorporating moving-average filtering to mitigate measurement fluctuations, conversion of measurements into occupancy indicators, and automated alert mechanisms. The results demonstrated the conceptual operation of the system and its ability to represent wastewater levels in real time. However, the absence of physical validation and field testing precludes conclusions regarding its accuracy, performance, and reliability under real-world conditions. The proposed framework provides a foundation for further development, calibration, and experimental validation, particularly in resource-constrained contexts.

Keywords: Wastewater infrastructure. Real-time monitoring. Digital transformation. Frugal innovation. Smart sanitation.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de esgotamento sanitário constituem infraestrutura essencial para a saúde pública, a proteção ambiental e o funcionamento das cidades. Sua prestação adequada depende da implantação de redes de coleta e unidades de tratamento, mas também de operação, manutenção e monitoramento contínuos. A Organização Mundial da Saúde recomenda que a avaliação de risco em sistemas de saneamento considere toda a cadeia de serviço, incluindo vazamentos, armazenamento inadequado e tratamento insuficiente (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018). No Brasil, a Lei nº 11.445/2007 estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico, posteriormente atualizadas pela Lei nº 14.026/2020, que ampliou as metas de universalização e a organização institucional do setor (BRASIL, 2007, 2020).

Apesar desses avanços institucionais, a eficiência dos serviços de esgotamento sanitário permanece um desafio: em análise das capitais brasileiras baseada em dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), Lima et al. (2023) identificaram, para 2020, que 20% das prestações de serviços de esgotamento sanitário eram ineficientes ou de eficiência fraca, um desempenho inferior ao do abastecimento de água. Esse cenário evidencia a necessidade de mecanismos capazes de apoiar a operação e a tomada de decisão, ainda que a adoção isolada de sensores e plataformas digitais não garanta, por si só, melhoria operacional:

sua contribuição depende da qualidade dos dados, da confiabilidade dos dispositivos, da comunicação e da capacidade organizacional de utilizar as informações produzidas.

Nesse contexto, tecnologias de sensoriamento e IoT vêm ganhando espaço na digitalização do saneamento, embora a produção tecnológica nacional ainda seja limitada (ANDRÉ; AMORIM; SILVA, 2023; SALAM, 2023), e soluções voltadas a organizações de menor porte podem se beneficiar de estratégias de racionalização de recursos e desenvolvimento incremental (ALVES; NODARI, 2023; QUEIROZ; LIZOTE, 2023; OLIVEIRA et al., 2024). Essas referências são retomadas com mais profundidade na Seção 2.

A distinção entre viabilidade conceitual e validação operacional é central para este trabalho. Um protótipo capaz de realizar leituras e representar níveis de preenchimento demonstra que a arquitetura proposta pode ser implementada em termos funcionais no ambiente em que foi simulada, mas isso não é suficiente para demonstrar que o sistema terá o mesmo comportamento em condições reais de uma rede de esgoto, sujeitas a umidade, condensação, espuma, interferências físicas e instabilidade de comunicação. Diante desse cenário, o presente estudo propõe um modelo conceitual de monitoramento para sistemas de esgotamento sanitário, baseado na integração entre sensor, microcontrolador, comunicação de dados, computação em nuvem e mecanismos de visualização e alerta, com o propósito de apoiar a identificação de condições potencialmente críticas e subsidiar ações preventivas. O desenvolvimento foi realizado inteiramente em ambiente simulado, de modo que a investigação se concentra na representação funcional da solução, e não na validação de seu desempenho em uma rede real.

O objetivo principal deste trabalho é propor e desenvolver conceitualmente uma solução de monitoramento capaz de coletar informações sobre o nível de esgoto e disponibilizá-las para acompanhamento remoto, com recursos de IoT e computação em nuvem. Como objetivos específicos, pretende-se: (i) estruturar um protótipo conceitual para aquisição e processamento das medições; (ii) representar a conversão das leituras em indicadores de ocupação; (iii) estabelecer mecanismos de identificação de condições críticas e geração de alertas; e (iv) estruturar uma arquitetura passível de, em etapas posteriores, ser submetida a testes físicos e integrada a plataformas de monitoramento remoto.

A pergunta orientadora do estudo é: em que medida um modelo conceitual baseado em IoT e computação em nuvem pode apoiar o monitoramento preventivo do nível de esgoto em pontos estratégicos de sistemas de esgotamento sanitário? A hipótese subjacente, tratada de forma deliberadamente cautelosa, é que um modelo de monitoramento baseado em sensores

conectados pode fornecer informações contínuas sobre o nível de esgoto e, potencialmente, apoiar processos de identificação preventiva de condições críticas, desde que sua precisão, confiabilidade e desempenho sejam posteriormente validados em condições reais. Essa formulação é compatível com o estágio atual da pesquisa, já que os testes realizados foram simulados e não permitem afirmar a eficácia do sistema para prevenir efetivamente vazamentos ou transbordamentos em redes operacionais.

A principal contribuição do trabalho consiste, portanto, na estruturação e demonstração conceitual de uma arquitetura tecnológica aplicável ao monitoramento de níveis de esgoto, entendida como incremental e exploratória: o estudo não pretende demonstrar que a solução está pronta para implantação em escala operacional, mas fornecer uma base para futuras etapas de desenvolvimento, calibração, validação e avaliação técnico-econômica. O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a revisão de literatura; a Seção 3 descreve os procedimentos metodológicos e a arquitetura do protótipo; a Seção 4 apresenta e discute os resultados obtidos no ambiente de simulação; e a Seção 5 traz as considerações finais, limitações e possibilidades de trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Saneamento, eficiência operacional e necessidade de monitoramento

A prestação de serviços de esgotamento sanitário no Brasil é regida pela Lei nº 11.445/2007, que estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico, e pela Lei nº 14.026/2020, que atualizou o marco legal do setor e ampliou as metas de universalização (BRASIL, 2007, 2020). No plano internacional, a Organização Mundial da Saúde destaca que a avaliação de riscos em sistemas de saneamento deve considerar toda a cadeia de serviço, incluindo vazamentos, armazenamento inadequado e tratamento insuficiente (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018), o que reforça a relevância de mecanismos capazes de identificar precocemente condições anômalas.

Mesmo com esse arcabouço institucional, a eficiência do setor permanece heterogênea. Lima et al. (2023) analisaram 972 observações do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) referentes às capitais brasileiras, empregando Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliar a eficiência técnica dos serviços de água e esgoto. Os autores verificaram que o abastecimento de água apresentou eficiência superior à do esgotamento sanitário e identificaram, para 2020, 20% das prestações de serviços de esgotamento sanitário como ineficientes ou de eficiência fraca. O estudo não investigou sensores, IoT ou computação em nuvem como fatores de eficiência; sua contribuição para o presente trabalho está em delimitar o problema de gestão no qual soluções de monitoramento automatizado podem ser inseridas, e não em comprovar que essas soluções produzem, isoladamente, ganhos de eficiência.

Esses resultados não permitem concluir que a incorporação de tecnologia resolva, isoladamente, as ineficiências identificadas; ajudam, contudo, a justificar a relevância de mecanismos capazes de produzir informações operacionais de forma mais sistemática, desde que integrados a processos de manutenção, planejamento e gestão. Nesse sentido, a proposta deste trabalho deve ser compreendida como solução de apoio ao monitoramento e à decisão, e não como substituta da infraestrutura convencional de saneamento ou dos sistemas de gestão já existentes.

2.2 IoT e sensoriamento aplicados ao saneamento

A Internet das Coisas (IoT) constitui abordagem relevante para infraestruturas hídricas por possibilitar a conexão entre dispositivos físicos, sensores, sistemas de comunicação e plataformas computacionais, ampliando a capacidade de acompanhamento das condições operacionais e reduzindo a dependência de procedimentos manuais. André, Amorim e Silva (2023), em prospecção tecnológica baseada em buscas de patentes, identificaram 1.005 documentos relacionados a sensores e sistemas IoT para monitoramento de água, águas residuais e esgotos, com predominância de registros na China e nos Estados Unidos; o Brasil ocupava a 14ª posição, com 20 patentes identificadas. Os autores interpretam esse cenário como indicativo da necessidade de ampliar investimentos nacionais em pesquisa e desenvolvimento no setor. Por se tratar de uma análise de patentes, o estudo não constitui validação experimental de uma arquitetura específica de monitoramento; sua contribuição para este trabalho está em contextualizar o desenvolvimento tecnológico do setor, não em comprovar o desempenho do protótipo aqui proposto.

A aplicação da IoT em infraestruturas de saneamento também é discutida por Barbosa Martins et al. (2017), que analisaram a integração de infraestruturas automatizadas com sistemas de gerenciamento de dados em nuvem em plantas de saneamento. Os autores apontam que a modernização dos sistemas hídricos pode produzir ganhos de gerenciamento e confiabilidade, ao mesmo tempo em que a crescente complexidade dos sistemas automatizados amplia a importância da segurança da informação e dos riscos associados à infraestrutura conectada. Essa perspectiva é pertinente à arquitetura proposta neste estudo, que não se limita à aquisição de dados por sensores, mas contempla uma cadeia composta por sensoriamento, processamento, comunicação e disponibilização de informações para acompanhamento remoto.

A literatura internacional sobre sistemas de esgoto inteligentes reforça a pertinência de aplicações de sensoriamento, comunicação subterrânea e apoio à gestão de redes de esgoto e drenagem (SALAM, 2023), destacando ainda a importância da instrumentação, da cobertura da rede, do posicionamento dos dispositivos e dos custos de aquisição e instalação antes da expansão de soluções de monitoramento (SIKORSKI; SOLANO DONADO; KOZDROWSKI, 2022). Essa literatura evidencia que a transição de soluções experimentais para aplicações operacionais envolve desafios de instalação, comunicação e avaliação de desempenho, sujeitos a variáveis ambientais e hidráulicas que um ambiente de simulação não reproduz integralmente.

2.3 Soluções automatizadas de monitoramento de esgotamento sanitário

No campo específico do esgotamento sanitário, Medeiros et al. (2025) desenvolveram um sistema automatizado para auxílio à gestão dos serviços de esgotamento sanitário, utilizando sensoriamento, microcontrolador, comunicação sem fio e a plataforma ThingSpeak para armazenamento e visualização de dados, com rotina de identificação de ausência de transmissão e geração de alerta. O estudo aproxima-se diretamente da proposta tecnológica deste manuscrito e é utilizado, ao longo do texto, como principal referência de comparação.

Essa aproximação, contudo, deve ser estabelecida com precisão quanto ao estágio de desenvolvimento de cada trabalho. Medeiros et al. (2025) realizaram ensaios laboratoriais e procedimentos de calibração e validação que não foram realizados no presente estudo, cuja avaliação permaneceu restrita ao ambiente simulado. A referência é utilizada, portanto, como evidência convergente da viabilidade de investigar soluções automatizadas e de baixo custo para o esgotamento sanitário, e não como comprovação dos resultados obtidos pelo protótipo aqui apresentado.

2.4 Inovação frugal, tomada de decisão e gestão de projetos em pequenas e médias empresas

A discussão técnica deste estudo é complementada por uma perspectiva organizacional, pertinente porque a implementação real de uma solução como a proposta dependeria de empresas e concessionárias de saneamento, muitas delas operando sob restrições de recursos.

Alves e Nodari (2023), em revisão sistemática realizada nas bases Scopus e Web of Science, identificaram quatro dimensões associadas à inovação frugal em pequenas e médias empresas: agregar valor, otimizar processos, capital humano e modelo de negócios. As autoras argumentam que essas dimensões ajudam a compreender a dinâmica da frugalidade e a orientar o direcionamento de recursos para o desenvolvimento organizacional. Essa perspectiva é pertinente à proposta deste estudo não porque permita classificar o protótipo desenvolvido como uma inovação frugal já validada, mas porque fornece um referencial para discutir uma solução orientada à utilização racional de recursos; o presente trabalho não realizou avaliação formal de frugalidade segundo um instrumento específico, tampouco comparou sistematicamente custos e alternativas tecnológicas em condições reais.

Queiroz e Lizote (2023) analisaram o processo de tomada de decisão sob a perspectiva da teoria effectuation e da inovação frugal, em pesquisa quantitativa realizada com 205 empreendedores da Grande Florianópolis, verificando maior propensão dos participantes a decidir com base nos recursos disponíveis, além de relações positivas entre comportamentos de análise de mercado, planejamento e desempenho organizacional. O estudo não investigou sistemas de IoT ou organizações de saneamento e não permite generalização direta para esse setor; sua relevância está em demonstrar, em outro contexto organizacional, a importância dos recursos disponíveis e da adaptação no processo decisório, elementos que dialogam com o desenvolvimento incremental de uma solução tecnológica com recursos inicialmente limitados.

De maneira complementar, Oliveira et al. (2024) realizaram revisão sistemática de 138 artigos sobre gestão de projetos em pequenas e médias empresas, identificando a utilização de abordagens preditivas, ágeis e híbridas e benefícios associados à eficiência, à eficácia, ao

atendimento de requisitos e à satisfação dos clientes, ao lado de limitações relacionadas tanto ao contexto das PMEs quanto aos próprios modelos de gestão. A revisão indica que não existe uma única abordagem adequada a todas as PMEs, o que é pertinente ao presente estudo por envolver múltiplos componentes tecnológicos e etapas de desenvolvimento, da definição dos requisitos de monitoramento até a integração entre sensor, microcontrolador, software e infraestrutura de dados.

A contribuição dessas três referências é predominantemente organizacional e gerencial: nenhuma delas investigou sistemas de IoT aplicados ao saneamento, e nenhuma permite atribuir ao protótipo benefícios econômicos, organizacionais ou de inovação frugal que não foram empiricamente avaliados neste estudo. Sua função é contextualizar os desafios de desenvolvimento e adoção de soluções tecnológicas sob restrição de recursos, sem substituir a necessidade de validação técnica específica do sistema de monitoramento.

2.5 Síntese e lacuna de pesquisa

O conjunto da literatura revisada permite situar a contribuição deste estudo. Há evidências de que sensores e tecnologias IoT constituem campo tecnológico ativo aplicado ao saneamento (ANDRÉ; AMORIM; SILVA, 2023; SALAM, 2023; SIKORSKI; SOLANO DONADO; KOZDROWSKI, 2022) e de que soluções automatizadas específicas para esgotamento sanitário já foram desenvolvidas e validadas fisicamente (MEDEIROS et al., 2025). Há também evidência de ineficiência operacional no setor que justifica o interesse por mecanismos de apoio à decisão (LIMA et al., 2023) e uma literatura organizacional que contextualiza o desenvolvimento de soluções tecnológicas sob restrição de recursos (ALVES; NODARI, 2023; QUEIROZ; LIZOTE, 2023; OLIVEIRA et al., 2024).

Permanece, contudo, um espaço para a exploração inicial, em ambiente de simulação, de uma arquitetura específica baseada em sensor ultrassônico, microcontrolador e display local, anterior a qualquer investimento em implementação física. É nesse espaço que o presente estudo se posiciona: não como validação de desempenho, mas como demonstração conceitual de uma cadeia funcional de aquisição, processamento e apresentação de informações sobre o nível de esgoto.

3. METODOLOGIA

3.1 Abordagem da pesquisa

Este estudo caracteriza-se como pesquisa aplicada, exploratória e descritiva, orientada ao desenvolvimento e à avaliação preliminar de uma solução tecnológica para o monitoramento do nível de esgoto. A investigação foi motivada pela identificação de ocorrências de extravasamento de esgoto em vias públicas e pela necessidade de explorar mecanismos capazes de ampliar o acompanhamento contínuo de pontos potencialmente críticos da infraestrutura urbana.

A solução proposta não foi submetida à validação em uma rede real de esgotamento sanitário: o desenvolvimento e a avaliação ocorreram inteiramente em ambiente de simulação, permitindo representar a interação entre sensor, microcontrolador, lógica de processamento e apresentação das informações. Os resultados devem, portanto, ser compreendidos como evidências de funcionamento conceitual e viabilidade preliminar, não como comprovação de desempenho operacional em condições reais. Essa delimitação é relevante porque uma implementação física estaria sujeita a fatores não avaliados nesta etapa, como umidade, condensação, presença de sólidos e resíduos, geometria do ponto monitorado, disponibilidade de energia e condições de comunicação.

A orientação do desenvolvimento também considerou a utilização racional dos recursos disponíveis, em aproximação conceitual com a literatura sobre inovação frugal, tomada de decisão sob restrição de recursos e gestão de projetos em pequenas e médias empresas discutida na Seção 2.4 (ALVES; NODARI, 2023; QUEIROZ; LIZOTE, 2023; OLIVEIRA *et al.*, 2024). Essa aproximação é conceitual: não houve avaliação formal de frugalidade, aplicação da teoria effectuation ou adoção declarada de metodologia ágil, híbrida ou preditiva de gestão.

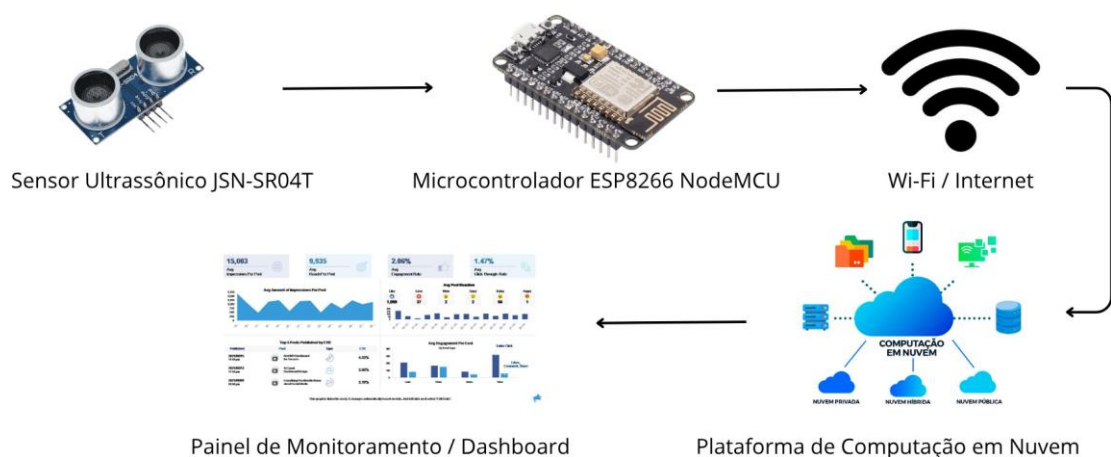
3.2 Estratégia de desenvolvimento e ambiente de simulação

O desenvolvimento do protótipo seguiu seis etapas: (i) identificação do problema e definição dos requisitos funcionais; (ii) seleção dos componentes; (iii) construção do circuito em ambiente virtual; (iv) desenvolvimento da lógica de aquisição e processamento; (v) definição das regras de apresentação e alerta; e (vi) avaliação conceitual do funcionamento do sistema simulado. Foram utilizadas as plataformas Tinkercad e Wokwi, que permitiram representar virtualmente os componentes eletrônicos e verificar a lógica do circuito sem instalação física em uma estrutura de esgotamento sanitário. A simulação teve como finalidade principal verificar a coerência funcional da arquitetura, particularmente a interação entre aquisição da distância, processamento da informação e apresentação do nível estimado, constituindo etapa preliminar de desenvolvimento que não substitui calibração, validação experimental ou testes de campo.

A arquitetura conceitual foi organizada em três níveis funcionais: aquisição, responsável pela obtenção da distância entre o sensor e a superfície do líquido; processamento, responsável pelo tratamento das leituras e pela aplicação das regras definidas em software; e visualização e comunicação, destinada à apresentação local das informações e à possibilidade de integração futura com infraestrutura remota. A Figura 1 apresenta o fluxo conceitual da solução, da

aquisição pelo sensor até sua disponibilização para acompanhamento; o diagrama representa esse fluxo em nível geral de arquitetura (sensor, microcontrolador, conectividade, nuvem e painel), enquanto os componentes efetivamente implementados e avaliados neste estudo, sensor HC-SR04, microcontrolador ESP32 e display OLED SSD1306, são detalhados na Seção 3.3.

Figura 1: Diagrama conceitual geral do sistema



Fonte: Os autores

A arquitetura proposta converge com o trabalho de Medeiros et al. (2025), que desenvolveu sistema automatizado de apoio à gestão do esgotamento sanitário com sensoriamento, microcontrolador, comunicação sem fio e plataforma de nuvem para armazenamento e visualização, incluindo mecanismos de acompanhamento da transmissão e de alerta. Essa aproximação deve ser entendida como convergência de finalidade e arquitetura, não como equivalência metodológica: Medeiros et al. realizaram ensaios laboratoriais e procedimentos de calibração e validação não realizados neste estudo.

3.3 Estrutura do sistema

O protótipo foi estruturado a partir de três componentes principais: sensor ultrassônico HC-SR04, microcontrolador ESP32 e display OLED SSD1306. Os mesmos são melhor detalhados como:

- **Sensor ultrassônico.** O HC-SR04 foi utilizado para representar a aquisição da distância entre o dispositivo e a superfície do líquido, com base na emissão de um sinal ultrassônico e na medição do intervalo de tempo até o retorno do sinal refletido. Essa distância constitui variável indireta para estimar o nível de preenchimento: em condições ideais, a redução da distância corresponde a um aumento do nível estimado. A escolha de uma variável obtida por sensoriamento

ultrassônico é compatível com a tendência tecnológica identificada por André, Amorim e Silva (2023), embora esse estudo não tenha avaliado experimentalmente o HC-SR04 e não seja, portanto, utilizado como evidência de seu desempenho específico.

- **Microcontrolador.** O ESP32 constitui a unidade de processamento do protótipo, recebendo os dados do sensor, executando os cálculos definidos em software e controlando a apresentação das informações no display; sua capacidade de comunicação também permite considerar, em etapa posterior, a integração com serviços remotos. Como o estudo foi desenvolvido em ambiente simulado, não se afirma que a comunicação em uma instalação subterrânea real apresentaria desempenho equivalente: cobertura de rede, posicionamento do dispositivo e disponibilidade energética deverão ser avaliados em estudos posteriores.
- **Display OLED.** O SSD1306 foi utilizado como dispositivo local de visualização das informações processadas, permitindo verificar visualmente o funcionamento da lógica implementada. A visualização remota por meio de dashboard ou aplicativo constitui extensão prevista para a arquitetura final e não deve ser apresentada como funcionalidade experimentalmente validada neste estudo.

3.4 Funcionamento do sistema

O funcionamento do protótipo inicia-se com o acionamento do sensor pelo microcontrolador: o ESP32 envia o comando ao terminal TRIG do HC-SR04, que emite o sinal ultrassônico, e o retorno é captado pelo terminal ECHO após a reflexão na superfície representada no ambiente de simulação. O intervalo entre emissão e recepção é utilizado para estimar a distância, que o ESP32 converte em uma representação percentual do nível de preenchimento, segundo os parâmetros:

- 5 cm: representação de 100% de ocupação;
- 400 cm: representação de 0% de ocupação.

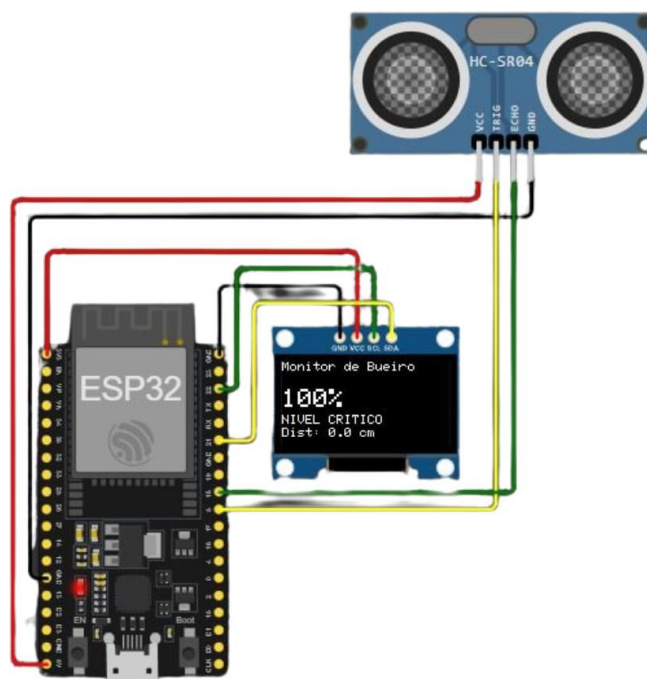
Esses valores constituem parâmetros específicos da simulação, não limites hidráulicos ou geométricos universais para bueiros ou redes de esgotamento sanitário, e a lógica de conversão foi estabelecida de modo que a diminuição da distância medida corresponda ao aumento do percentual estimado.

O sistema não realiza medição direta de volume de esgoto: o parâmetro obtido diretamente é a distância até a superfície do líquido, a partir da qual se calcula uma estimativa relativa de preenchimento; a determinação de volume exigiria a caracterização geométrica da estrutura monitorada e a definição da relação entre nível e volume, o que não foi objeto deste estudo. Essa distinção é especialmente relevante na comparação com Medeiros et al. (2025), cujo trabalho desenvolveu procedimentos específicos de calibração e ensaio laboratorial para estimativa de volume e vazão; no presente estudo, a abordagem permaneceu no nível de estimativa de preenchimento em ambiente simulado.

Quando o valor calculado se aproxima do limite estabelecido na lógica do protótipo, o sistema aciona uma condição de alerta, configurando uma regra de decisão baseada em limiar: o sistema identifica uma condição de nível considerada crítica segundo parâmetros previamente estabelecidos, mas não realiza previsão estatística ou por inteligência artificial de transbordamentos. Essa distinção entre detecção de nível crítico e previsão de transbordamento é preservada em todo o manuscrito: a primeira pode ser obtida por uma regra de limiar; a segunda exigiria informações adicionais sobre dinâmica temporal, vazão, capacidade hidráulica e histórico de eventos.

A Figura 2 apresenta a configuração esquemática do protótipo, com a integração entre ESP32, HC-SR04 e display OLED SSD1306.

Figura 2: Configuração esquemática do protótipo de monitoramento



3.5 Lógica de software e processamento das leituras

O software do protótipo foi desenvolvido em C++, com as bibliotecas `Adafruit_GFX.h` e `Adafruit_SSD1306.h` para controle e apresentação das informações no display. A lógica contempla a aquisição das leituras, o processamento dos valores, a conversão da distância em percentual de ocupação, o controle dos alertas e a apresentação dos dados.

Para reduzir a influência de variações pontuais, foi implementado o cálculo da média de cinco leituras consecutivas, procedimento de suavização cuja eficácia quantitativa deverá ser investigada em trabalhos futuros: sem calibração experimental e comparação com um padrão de referência, não é possível quantificar o erro de medição, de modo que a média móvel não constitui, isoladamente, comprovação de aumento de exatidão ou acurácia.

O sistema também incorpora uma rotina de identificação de ausência de transmissão de dados: quando não são identificados novos dados durante 30 minutos, é acionada uma rotina de alerta destinada a informar o administrador sobre possível interrupção do monitoramento. Essa funcionalidade cumpre papel diferente do alerta de nível, pois busca identificar falha na própria cadeia de monitoramento, e não uma condição crítica na estrutura monitorada; a ausência de dados pode decorrer de falha de energia, de conectividade ou do próprio dispositivo, e não deve ser interpretada automaticamente como ausência de risco. A lógica converge com a arquitetura descrita por Medeiros et al. (2025), que também incorporou rotina de identificação de ausência de envio de dados.

O controle temporal dos alertas utiliza a função *millis()*, o que permite estabelecer intervalos de execução sem depender da interrupção contínua do processamento principal. Nesse contexto, a expressão "monitoramento inteligente", empregada no título, deve ser compreendida como referência à capacidade de monitoramento automatizado, processamento das informações e geração de alertas segundo regras predefinidas: o estudo não implementou técnicas de inteligência artificial, aprendizado de máquina ou modelos preditivos, e essa precisão conceitual evita que o termo "inteligente" seja interpretado como alegação de inteligência artificial não correspondente aos procedimentos efetivamente realizados.

3.6 Atualização e integração com monitoramento remoto

A arquitetura foi concebida para possibilitar a transmissão dos dados a uma plataforma remota, permitindo armazenamento, processamento e visualização. No modelo original, foi estabelecido um intervalo de 10 minutos para atualização das informações no ambiente de

monitoramento, parâmetro de projeto que não deve ser interpretado como frequência universalmente adequada: em uma implementação real, o intervalo deverá considerar a dinâmica de variação do nível, a criticidade do ponto monitorado, a infraestrutura de comunicação e o consumo energético.

Essa integração encontra correspondência na literatura sobre IoT aplicada ao saneamento, que ressalta a importância de conjugar sensoriamento, comunicação e sistemas de gerenciamento, sem descuidar de aspectos de segurança em ambientes conectados (BARBOSA MARTINS et al., 2017). No presente estudo, entretanto, a integração efetiva com uma infraestrutura de nuvem não foi objeto de validação experimental: a metodologia apresenta a nuvem e o monitoramento remoto como parte da arquitetura proposta e como possibilidade de evolução do protótipo, enquanto os resultados, na seção seguinte, concentram-se no comportamento efetivamente observado na simulação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo foi avaliado em ambiente virtual, mediante simulação dos componentes eletrônicos e da lógica de funcionamento nas plataformas Tinkercad e Wokwi. Os resultados apresentados nesta seção correspondem, portanto, à verificação conceitual e funcional do protótipo simulado, e não a validação experimental de desempenho em condições reais de operação, já que o sistema não foi instalado fisicamente em estruturas de esgotamento sanitário nem submetido a fatores como características do efluente, presença de sólidos e resíduos, condensação, geometria da estrutura e estabilidade da alimentação e da comunicação.

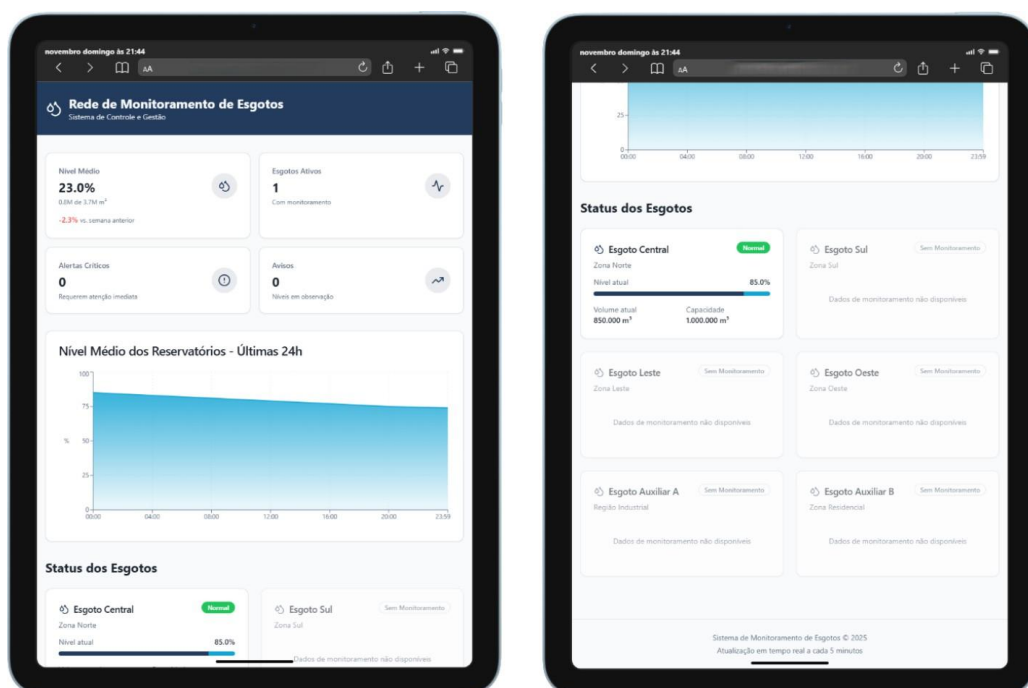
Na simulação, a integração entre sensor HC-SR04, microcontrolador ESP32 e display OLED SSD1306 permitiu representar o fluxo de aquisição, processamento e apresentação das informações referentes ao nível de preenchimento do recipiente monitorado: a distância entre sensor e superfície foi processada pelo microcontrolador e convertida em estimativa percentual de ocupação, possibilitando representar diferentes condições de preenchimento e o acionamento das condições de alerta segundo os parâmetros definidos. Esse resultado é compatível com o panorama tecnológico identificado por André, Amorim e Silva (2023), utilizado aqui para contextualizar a pertinência da abordagem, não para validar especificamente o sensor empregado.

4.1 Funcionamento e interface do protótipo

A simulação demonstrou que a lógica implementada transforma a distância medida em uma representação percentual de preenchimento, segundo os limites de 5 cm para 100% de ocupação e 400 cm para 0%, permitindo representar, no ambiente virtual, diferentes estados de preenchimento e o acionamento das condições críticas previstas em software. Esses parâmetros, como já indicado, não representam limites hidráulicos universais para bueiros ou redes de esgoto; em uma aplicação física, deverão ser determinados a partir das dimensões da estrutura monitorada e da posição de instalação do sensor.

A Figura 3 apresenta a interface concebida para representar a visualização dos dados coletados e processados pelo protótipo. Sua inserção como resultado é relevante por demonstrar a transição entre a informação produzida pelo sensoriamento e sua apresentação ao usuário, ainda que como representação do sistema proposto: o painel completo, com indicadores de volume em metros cúbicos, múltiplos pontos de monitoramento e atualização a cada cinco minutos, ilustra a visão de uma plataforma remota mais ampla e não corresponde literalmente à saída de dados do display OLED avaliado neste estudo, que apresenta localmente o percentual estimado calculado pelo ESP32. Essa distinção deve ser observada por quem consultar a Figura 3: os elementos de volume absoluto e de múltiplos esgotos monitorados representam a arquitetura pretendida para uma etapa futura, não uma funcionalidade validada nesta pesquisa.

Figura 3: Interface do sistema de monitoramento de esgoto



Fonte: Os autores

Nesse sentido, o resultado obtido não deve ser interpretado como demonstração de que a interface, isoladamente, seja capaz de melhorar o desempenho operacional de empresas de saneamento; sua contribuição, neste estágio, consiste em demonstrar a viabilidade conceitual da camada de apresentação da arquitetura proposta. A integração completa com uma plataforma de nuvem e uma API não foi experimentalmente validada nesta etapa e deve ser considerada parte da arquitetura prevista para evolução do protótipo.

4.2 Processamento das leituras e mecanismos de alerta

O protótipo utiliza a média de cinco leituras consecutivas para suavizar variações pontuais, o que, no ambiente simulado, permitiu produzir uma representação mais estável da variável monitorada. Essa suavização, contudo, não deve ser interpretada como comprovação de aumento de precisão ou acurácia: a quantificação dessas características exigiria ensaios controlados, com valores de referência conhecidos e métricas de erro, repetibilidade e estabilidade. O resultado obtido permite afirmar que o mecanismo foi implementado e integrado à lógica do protótipo, mas não permite determinar seu desempenho metrológico em condições reais.

Também foi implementada a lógica de identificação de condições consideradas críticas segundo os parâmetros estabelecidos, permitindo que a elevação do nível estimado funcione como gatilho para um mecanismo automatizado de alerta. Essa característica transforma uma variável física em uma condição operacional interpretável, mas reforça a necessidade de distinguir detecção de nível crítico de previsão de transbordamento: o sistema utiliza regras previamente estabelecidas, e não um modelo estatístico ou de aprendizado de máquina capaz de prever transbordamentos a partir de séries temporais. Os resultados demonstram, portanto, a capacidade do protótipo de sinalizar condições previamente definidas como críticas, não a realização de previsão de transbordamentos.

A segunda categoria de alerta implementada corresponde à ausência de transmissão de dados durante 30 minutos, situação que pode estar associada a falha de comunicação, interrupção de alimentação ou indisponibilidade do dispositivo. Esse mecanismo converge diretamente com o de Medeiros et al. (2025), cujo sistema também identificava a ausência de envio de dados durante determinado período; naquele estudo, porém, os dados foram efetivamente transmitidos à plataforma ThingSpeak e o protótipo passou por calibração e validação em condições controladas, o que evidencia a diferença de estágio entre os dois

trabalhos. A contribuição deste estudo está na estruturação inicial da arquitetura e da lógica de funcionamento, enquanto a validação metrológica e operacional permanece como etapa futura.

4.3 Potencial de aplicação organizacional

A arquitetura desenvolvida foi concebida para que a aquisição de dados não se limite à medição local, mas possa subsidiar, em etapas futuras, processos de monitoramento remoto e tomada de decisão, estabelecendo uma transição entre o dado físico produzido pelo sensor e uma informação potencialmente útil à gestão da manutenção. Essa perspectiva dialoga com o problema de eficiência descrito por Lima et al. (2023) na Seção 2.1, sem que se possa afirmar, a partir dos resultados aqui obtidos, que a adoção do protótipo produziria melhoria de eficiência: o estudo desses autores fornece contexto para a relevância do problema de gestão, não evidência do efeito de sensores IoT sobre o desempenho de concessionárias.

Do ponto de vista organizacional, o desenvolvimento do protótipo em ambiente simulado, antes de qualquer investimento em implementação física, é compatível com a lógica de racionalização de recursos e desenvolvimento incremental discutida na Seção 2.4 a partir de Alves e Nodari (2023), Queiroz e Lizote (2023) e Oliveira et al. (2024). Essas referências ajudam a contextualizar a possibilidade de desenvolvimento incremental e de gestão de projetos tecnológicos sob restrição de recursos, mas não permitem atribuir ao protótipo benefícios econômicos, organizacionais ou de inovação frugal que não foram empiricamente avaliados neste estudo, uma vez que não foram realizados estudos de custo, comparação com tecnologias concorrentes ou avaliação econômica da implantação.

A contribuição potencial da arquitetura está, ainda, em permitir que informações sobre o nível dos pontos monitorados sejam futuramente armazenadas e analisadas de maneira histórica: séries temporais poderiam auxiliar na identificação de recorrências e na definição de prioridades de manutenção. Essa possibilidade, porém, não foi demonstrada empiricamente; no protótipo atual, os alertas são determinados por regras predefinidas, e não por análise estatística de séries históricas, de modo que qualquer afirmação sobre capacidade de identificar padrões de risco deve ser tratada como perspectiva de evolução do sistema.

4.4 Limitações dos resultados

Os resultados obtidos não permitem afirmar que o sistema efetivamente previne vazamentos ou transbordamentos em redes reais de esgotamento sanitário. Essa ressalva é especialmente relevante em razão do próprio título do artigo: a expressão "prevenção de

vazamentos" expressa a finalidade pretendida da solução, não um efeito experimentalmente demonstrado. O protótipo mede a distância até a superfície do líquido e, a partir dela, estima o percentual de preenchimento; não identifica, isoladamente, a ocorrência de um vazamento estrutural, o rompimento de tubulação ou a causa específica de um extravasamento. Um aumento do nível monitorado pode representar uma condição operacional relevante, mas sua interpretação como vazamento ou transbordamento requereria informações adicionais de vazão, histórico temporal, condições hidráulicas e estado da comunicação. A mesma cautela se aplica à expressão "monitoramento inteligente": o sistema apresenta automação, processamento local e regras de alerta, mas não incorpora inteligência artificial ou aprendizado de máquina.

A comparação com Medeiros et al. (2025), cujo estudo avançou para implementação física, transmissão em nuvem e procedimentos de calibração e validação, reforça a principal limitação deste trabalho: a ausência de testes físicos e de dados experimentais suficientes para quantificar o desempenho do sistema. Permanecem em aberto, do ponto de vista técnico, questões relacionadas à proteção física dos componentes, à estabilidade da alimentação, à conectividade em ambientes subterrâneos, à segurança da comunicação, à calibração do sensor e à resistência às condições ambientais; do ponto de vista econômico, não foram mensurados custos de aquisição, instalação, manutenção, consumo energético ou armazenamento em nuvem, de modo que não é possível concluir que a solução apresente vantagem econômica em relação a alternativas disponíveis. A ausência de dados de campo também impede a avaliação de indicadores como erro de medição, taxa de detecção de condições críticas, falsos positivos e negativos, disponibilidade do sistema e latência de comunicação. Por fim, como destacado pela Organização Mundial da Saúde a respeito do gerenciamento de risco ao longo de toda a cadeia do saneamento (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018), uma solução automatizada de monitoramento deve ser compreendida como ferramenta de apoio, e não como substituta das atividades de operação, manutenção, inspeção e controle.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo desenvolveu e avaliou, em ambiente de simulação, uma arquitetura conceitual para o monitoramento automatizado do nível de esgoto, integrando sensor ultrassônico HC-SR04, microcontrolador ESP32 e display OLED SSD1306, com possibilidade de integração futura a recursos de comunicação e computação em nuvem. Os resultados demonstraram que a arquitetura foi capaz de representar a cadeia funcional de aquisição da distância, processamento das leituras, conversão em percentual estimado de preenchimento,

apresentação das informações e acionamento de regras de alerta, atendendo ao objetivo de desenvolver e demonstrar conceitualmente a lógica de funcionamento da solução.

A principal contribuição do estudo está na estruturação de uma prova de conceito tecnológica para apoiar o monitoramento de pontos potencialmente críticos de sistemas de esgotamento sanitário, transformando uma variável física de fácil interpretação, a distância entre o sensor e a superfície do líquido, em informação digital destinada ao acompanhamento operacional. Esse resultado é compatível com o movimento de expansão de aplicações de sensores e IoT no saneamento identificado por André, Amorim e Silva (2023) e com a integração entre dispositivos conectados e sistemas de gerenciamento discutida por Barbosa Martins *et al.* (2017); no âmbito organizacional, Alves e Nodari (2023), Queiroz e Lizote (2023) e Oliveira *et al.* (2024) ajudam a contextualizar a possibilidade de desenvolvimento incremental e racionalização de recursos, sem que se possa atribuir ao protótipo benefícios econômicos ou organizacionais não avaliados empiricamente.

Os resultados devem ser interpretados de acordo com o nível de evidência produzido: como a avaliação ocorreu exclusivamente em ambiente virtual, não foi possível determinar precisão, exatidão, repetibilidade, durabilidade ou confiabilidade em condições reais, tampouco avaliar experimentalmente a comunicação, a alimentação energética e a resistência dos componentes às condições ambientais. O protótipo não demonstrou capacidade de prevenir diretamente vazamentos ou transbordamentos; sua função efetivamente demonstrada foi o monitoramento simulado do nível e a identificação de condições previamente estabelecidas como críticas, de modo que os parâmetros utilizados e a lógica de alerta devem ser considerados configurações do protótipo, cuja adequação a estruturas reais dependerá de calibração, ensaios controlados e validação em campo.

Como continuidade da pesquisa, recomenda-se a construção física do protótipo e sua avaliação progressiva, primeiro em condições controladas e, depois, em ambientes representativos de redes de esgotamento sanitário, caracterizando o desempenho metrológico do sensor, a confiabilidade da comunicação, o comportamento diante de diferentes condições do efluente, o consumo energético, a segurança da infraestrutura conectada e os custos de implantação e operação. Será igualmente necessário investigar, com dados reais, se o nível do esgoto, isoladamente ou combinado a outras variáveis, constitui indicador suficientemente robusto para antecipar situações de risco. Somente após essas etapas será possível determinar, com evidência experimental, a aplicabilidade da solução e sua efetiva contribuição para o

monitoramento, a gestão operacional e a prevenção de eventos críticos em sistemas de esgotamento sanitário.

6. REFERÊNCIAS

ALVES, Karen Thais; NODARI, Cristine Hermann. Evidências da inovação frugal em pequenas e médias empresas: uma revisão sistemática da literatura. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 17, n. 2, p. 75-90, 2023. DOI: 10.48099/1982-2537/2023v17n2p7590.

ANDRÉ, Andreza Carla Lopes; AMORIM, Miriam Cleide Cavalcante de; SILVA, Késsia Caroline Dantas da. Mapeamento tecnológico de sensores e sistemas IoT para monitoramento da qualidade de água e efluentes no setor de saneamento: análise de patentes. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 19, n. 57, p. 114-124, 2023. DOI: 10.3895/rts.v19n57.15701.

BARBOSA MARTINS, Alaide; COSTA, Cláudia Cristina Rios Caxias da; AZEVEDO, Marcelo Teixeira de; KOFUJI, Sergio Takeo. Gerenciamento da água com a Internet das Coisas (IoT): uma aplicação em plantas de saneamento. *Collectivus*, **Revista de Ciencias Sociales**, v. 4, n. 2, p. 124-140, 2017. DOI: 10.15648/Coll.2.2017.7.

BRASIL. **Lei nº 11.445**, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico [...]. Diário Oficial da União, Brasília, DF, seção 1, p. 3, 8 jan. 2007.

BRASIL. **Lei nº 14.026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico [...]. Diário Oficial da União, Brasília, DF, seção 1, p. 1, 16 jul. 2020.

LIMA, Rodrigo Falcão Lopes; SANTOS, Elaine Rodrigues dos; SANTA RITA, Luciana Peixoto; SANTOS, Anderson Moreira Aristides dos; GUIMARÃES, Rodrigo Gameiro. Saneamento básico e o marco legal: avaliação da eficiência do setor nas capitais brasileiras. **Gestão & Sociedade**, v. 16, n. 45, 2023. DOI: 10.21171/ges.v17i45.3694.

MEDEIROS, Lucivânia Rangel de Araújo; BRANDÃO, Igor Antônio de Paiva; MARTINS, Livia Maria de Medeiros; MACIEL, Jasmyne Karla Vieira Souza; CUNHA, Patrícia Hermínio; ARAÚJO, Marília Marcy Cabral de. Desenvolvimento de um sistema automatizado para auxílio à gestão dos serviços de esgotamento sanitário. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 23, n. 3, e9362, 2025. DOI: 10.55905/oelv23n3-123.

OLIVEIRA, Ricardo Lair Franco; SILVA, Luciano Ferreira da; PENHA, Renato; BIZARRIAS, Flávio Santino. Gestão de projetos em pequenas e médias empresas. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 18, n. 2, p. 134-159, 2024. DOI: 10.6034/rmpe.v18i2.1957.

QUEIROZ, Ayrton Santos de; LIZOTE, Suzete Antonieta. O processo de tomada de decisão sob a ótica da teoria effectuation e da inovação frugal. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 17, n. 2, p. 4-18, 2023. DOI: 10.48099/1982-2537/2023v17n2p418.

SALAM, Abdul. Internet of things in smart sewer and drainage systems: theory and applications. Cham: Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-48109-3.

SIKORSKI, Arkadiusz; SOLANO DONADO, Fernando; KOZDROWSKI, Stanisław. Cost-efficient coverage of wastewater networks by IoT monitoring devices. **Sensors**, v. 22, n. 18, 6854, 2022. DOI: 10.3390/s22186854.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines on sanitation and health**. Geneva: World Health Organization, 2018. 220 p. ISBN 978-92-4-151470-5. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241514705>. Acesso em: 10 jan. 2025.