

Water Sentinel: Protótipo Embarcado para Alerta de Alagamentos.

Reyner C. S. Alegria¹, Felipe W. G. Silva¹, João C. G. Iannuzzi¹, Aila K. S. Moreira¹, Ennoile R. M. Ferreira¹, Heloíse V. C. Brito¹, Nicolas O. Da Rocha¹, João P. N. Rebouças¹, Karen V. R. Pereira¹, Vandermi J. Da Silva¹.

¹Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia Universidade Federal do Amazonas (UFAM)
R. Nossa Senhora do Rosário, 3863 - Itacoatiara - AM - Brasil.

{reyner.alegria, felipe.silva, joao.iannuzzi, aila.moreira, ennoile.ferreira, heloise.brito, nicolas-rocha.nr, joao.reboucas, karem-vitoria.rofrigues, vandermi}@ufam.edu.br

Abstract: The growing frequency of intense rainfall events has increasingly triggered floods in both urban centers and rural areas. To help mitigate these impacts, this study proposes a low-cost, low-maintenance prototype capable of monitoring hydrological conditions and issuing real-time flood alerts. The architecture combines temperature- and pressure-based sensing with additional environmental sensors that are critical to reliable operation. Preliminary laboratory tests have produced results aligned with the defined objectives and methodology, confirming the technical feasibility of the embedded system. Moreover, the prototype maintained consistent, low-latency communication with a mobile application, underscoring its potential as an accessible early-warning tool for at-risk communities.

Resumo. No contexto atual, o problema da frequência dos fenômenos naturais envolvendo fortes chuvas, ocasionam uma série de problemáticas como alagamentos e enchentes em áreas urbanas centrais e áreas do interior. Devido a esse fato, o presente trabalho se propõe como uma forma de mitigar esse distúrbio de forma a desenvolver um protótipo que utiliza peças de baixo custo e manutenção, voltado à emissão de alertas e monitoramento de tais eventos. A proposta consiste em uma arquitetura com sensores de temperatura e pressão, os quais são peças-chaves para avaliar as métricas buscadas, juntamente com outros sensores fundamentais para o funcionamento adequado. Os testes preliminares realizados até o momento mostraram resultados parciais esperados de acordo com a metodologia e objetivos definidos, demonstrando a viabilidade do sistema embarcado e o adequado funcionamento com o aplicativo móvel mostrando consistência e ótima comunicação.

Palavras-chave: Sistema Embarcado, Monitoramento Ambiental, Alagamentos, Chuvas Torrenciais, Enchentes.

1. Introdução

Eventos de precipitação extrema têm se tornado mais frequentes nas regiões tropicais, ocasionando enchentes súbitas que afetam tanto áreas urbanas quanto comunidades ribeirinhas [Rosa et al., 2022]. Na Amazônia Central, onde as redes de drenagem pluvial são frequentemente subdimensionadas, o transbordamento de igarapés provoca perdas materiais e ameaça a segurança da população local [Castro 2023]. Estudos recentes destacam que sistemas de alerta rápido baseados em Internet das Coisas (IoT) podem reduzir significativamente os danos quando comunicam o risco com antecedência de poucos minutos [Filho & Calvão 2022].

Apesar dos esforços de órgãos como o CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, muitos municípios de pequeno e médio porte ainda carecem de estações de monitoramento automatizado, principalmente devido ao custo elevado e à manutenção complexa dos equipamentos [Rosa et al. 2022]. Um protótipo de baixo custo e fácil replicação, capaz de emitir alertas locais e sincronizar dados com a nuvem, atende a essa lacuna tecnológica e social.

A seguir, são apresentadas algumas definições centrais que orientam o desenvolvimento e a avaliação do protótipo do sistema de alerta de alagamentos. Esses conceitos são fundamentais para delimitar os critérios técnicos e operacionais da solução proposta, assegurando sua efetividade e viabilidade no contexto de monitoramento ambiental de baixo custo:

- Sistema de alerta de alagamentos: conjunto de sensores que identifica níveis críticos de água e aciona alarmes visuais, sonoros ou notifica usuários por rede de dados.
- Tempo de resposta (latência): intervalo entre a detecção do nível crítico e o recebimento do alerta no dispositivo do usuário [Santos & Lima 2023].
- Plataforma de baixo custo: solução cujo hardware principal custa menos que R\$ 200, considerando microcontrolador, sensores e atuadores.

O estudo adotou quatro fases: (i) revisão bibliográfica sistemática; (ii) projeto e construção do protótipo com ESP32, sensores de nível e atmosféricos; (iii) validação em laboratório por meio de cenários controlados que simulam enchentes rápidas; e (iv) planejamento de testes de campo em pontos críticos de Itacoatiara-AM.

Os ensaios laboratoriais indicaram latência média inferior a 5 s entre a detecção do nível crítico e a notificação no aplicativo móvel. A confiabilidade do sensor de nível foi aumentada em 32 % após a aplicação de um filtro de média móvel, resultando em taxa de falsos positivos inferior a 1 %. Esses resultados demonstram a viabilidade técnica do Water Sentinel como ferramenta de alerta imediato.

Após esta Introdução, a Seção 2 descreve os objetivos do trabalho. A Seção 3 apresenta a metodologia detalhada, enquanto a Seção 4 discute os requisitos funcionais.

A Seção 5 expõe a arquitetura do sistema e as tecnologias empregadas. A Seção 6 analisa os resultados experimentais. Por fim, a Seção 7 traz as considerações finais, limitações e direções futuras.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema que realiza o monitoramento de dados ambientais em um tempo determinado, com intuito de analisar essas informações e alertar sobre possíveis riscos de alagamento, visando a redução de danos à população.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a pesquisa bibliográfica em relação ao tema proposto, buscando informações para abranger o conhecimento em relação ao assunto e ao sistema a ser desenvolvido.
- Realizar o estudo sobre os fatores físicos, naturais e antrópicos que podem gerar alagamentos em áreas urbanizadas.
- Desenvolver um sistema embarcado de baixo custo e manutenção que forneça dados em tempo real para a prevenção de alagamentos.
- Desenvolver uma aplicação móvel que irá exibir os dados do sistema embarcado e localização atual do usuário.
- Realizar testes preliminares em ambientes controlados e futuramente implementar o sistema em locais estratégicos para fazer a análise de dados reais.

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento e a validação do protótipo *Water Sentinel* foram conduzidos em quatro fases metodológicas principais: (i) Revisão Sistemática e Levantamento de Requisitos; (ii) Projeto e Desenvolvimento do Sistema; (iii) Validação em Laboratório; e (iv) Planejamento para Testes de Campo.

3.1 Revisão Sistemática e Levantamento de Requisitos

Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura em bases de dados como *IEEE Xplore* e *Google Scholar*, focando em trabalhos publicados nos últimos cinco anos. A pesquisa aprofundou-se nos desafios específicos do monitoramento hidrológico na Bacia Amazônica, que, conforme discutido por [Filho and Calvão 2022], incluem a vasta extensão geográfica e a necessidade de tecnologias de baixo custo. Foram analisados também os sistemas operados por agências como o Serviço Geológico do

Brasil (SGB-CPRM) e o *CEMADEN*, para garantir que as variáveis coletadas pelo protótipo fossem relevantes para os modelos de alerta de risco existentes no país.

3.2 Fase Projeto e Desenvolvimento do Sistema

Com base nos requisitos, o sistema foi projetado e construído com foco em custo, eficiência e replicabilidade.

- **Seleção de Hardware:** A escolha do microcontrolador *ESP32* deveu-se à sua conectividade *Wi-Fi* integrada e ao amplo suporte da comunidade, fatores essenciais para projetos *IoT*. A utilização de sensores como o *DHT11* e o *BMP180*, embora não meçam o nível da água diretamente, buscou coletar dados atmosféricos que podem indicar a iminência de chuvas torrenciais.
- **Desenvolvimento de Firmware e Software:** O firmware foi escrito em *C++* na IDE do *Arduino*. Para aumentar a confiabilidade das leituras do sensor de nível, foi implementado um filtro de média móvel, uma técnica de processamento de sinal fundamental para mitigar ruídos em sensores de baixo custo em aplicações *IoT* [SANTOS; LIMA, 2023]. Os dados são transmitidos em tempo real para o *Firebase*, e o aplicativo móvel, desenvolvido em *Kotlin*, consome esses dados para exibição e para o disparo de notificações *push*. A abordagem de usar componentes de baixo custo e código aberto é validada por diversos estudos recentes, como o de [Marques et al. 2021], que demonstram o potencial dessas tecnologias para o monitoramento ambiental.

3.3 Validação em Laboratório

Os testes preliminares, conduzidos em ambiente de laboratório controlado, visaram validar o funcionamento do hardware e a lógica do sistema. Conforme detalhado na seção de resultados, foi montado um cenário para simular um evento de alagamento, permitindo a calibração do sensor de nível e a verificação do tempo de resposta do sistema de alerta (*buzzer* local e notificação móvel). A latência entre a detecção do nível crítico e o recebimento do alerta foi registrada, permanecendo consistentemente abaixo de 5 segundos, o que é considerado eficaz para um sistema de alerta precoce.

4. REQUISITOS PRINCIPAIS

Para o funcionamento eficiente do sistema *Water Sentinel*, seis requisitos funcionais se destacam como essenciais, conforme exposto na Tabela 1 a seguir.

Primeiramente, o RF01 garante a conexão do dispositivo à rede *Wi-Fi*, o que viabiliza a comunicação com a nuvem. Em seguida, o RF02 assegura o armazenamento dos dados no *Firebase*, permitindo tanto o acesso remoto quanto o registro histórico das medições. Além disso, o RF03 ativa o alerta sonoro via *buzzer* em situações críticas, funcionando como um aviso local imediato. Por fim, o RF05 trata do envio de notificações *push*, alertando o usuário em tempo real sobre riscos de alagamento. Esses requisitos formam a base da integração entre os sensores, a nuvem e o aplicativo móvel.

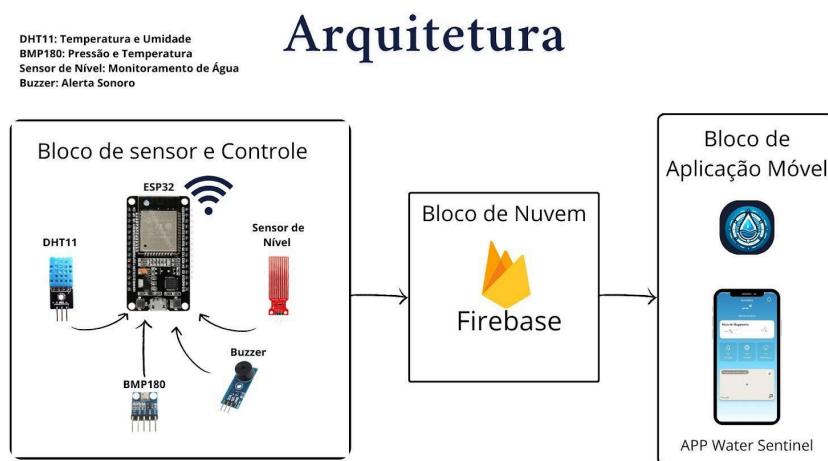
Tabela 1- Identificação dos requisitos funcionais

IDENTIFICADOR	DESCRIÇÃO
RF01	Conectar o dispositivo a redes Wi-Fi disponíveis.
RF02	Armazenar dados de monitoramento no <i>Firebase</i> .
RF03	Emitir alerta sonoro através do <i>buzzer</i> .
RF04	Informar o status do dispositivo no momento da inicialização.
RF05	Enviar notificações <i>push</i> em caso de detecção de risco de alagamento.
RF06	Exibir a localização atual em tempo real do usuário e posto de alerta mais próximo

5. ARQUITETURA DO SISTEMA

A arquitetura do sistema *Water Sentinel* envolve sensores físicos, conectividade em nuvem e uma aplicação móvel para monitoramento ambiental em tempo real. No núcleo do sistema está o microcontrolador *ESP32*, que coleta dados dos sensores e envia essas informações, via *Wi-Fi*, para o *Firebase Realtime Database*. O aplicativo móvel *Water Sentinel*, sincronizado com a nuvem, apresenta essas informações ao usuário de forma clara e em tempo real, além de reagir a eventos críticos, como risco de alagamento. A Figura 1 representa a arquitetura do sistema.

Figura 1 - Arquitetura do projeto

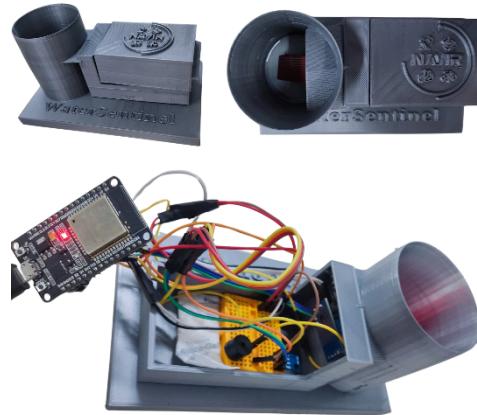


Dessa forma, a arquitetura dividiu-se em 3 componentes principais:

- **Bloco de Sensor e Controle:** Localizado à esquerda da arquitetura, este bloco é

composto pelo *ESP32*, que atua como unidade central de processamento. Ele está conectado aos sensores *DHT11* responsável pela coleta da temperatura e umidade), *Water Level* sensor de nível da água e *BMP180* sensor de pressão e temperatura. Um componente crucial deste conjunto é o *buzzer*, que é ativado automaticamente quando o nível da água atinge um ponto crítico. Nesse momento, um alarme sonoro é emitido como alerta local, e o sistema interrompe a coleta de dados, economizando recursos e evitando redundâncias em cenários confirmados de emergência. A Figura 2 representa o sistema deste bloco.

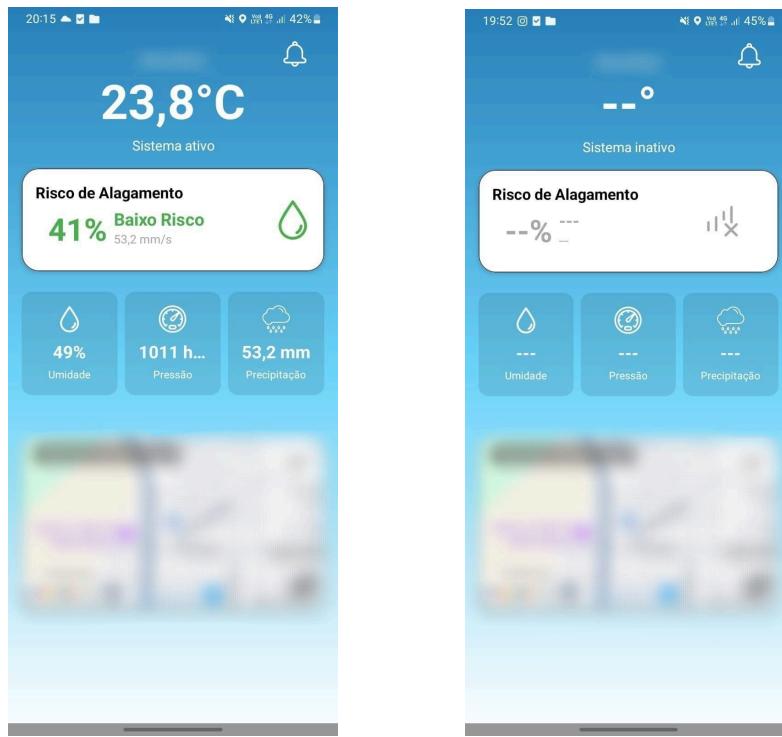
Figura 2 – Sistema embarcado



- **Bloco de Nuvem:** No topo da arquitetura está a rede *Wi-Fi*, que estabelece a comunicação entre o *ESP32* e o *Firebase Realtime Database*. Essa conexão permite a atualização contínua dos dados coletados pelos sensores, garantindo que as informações estejam sempre disponíveis na nuvem de forma centralizada e em tempo real. O *Firebase* atua como ponto de armazenamento e sincronização, servindo de ponte entre o embarcado e a aplicação móvel.
- **Bloco de Aplicação Móvel:** À direita da arquitetura está o aplicativo móvel *Water Sentinel*, que acessa os dados diretamente do *Firebase* e os apresenta ao usuário por meio de uma interface clara e intuitiva. Para cada *status* de risco de alerta que o sistema detecta, o app altera a cor dos ícones e da indicação de risco, podendo variar entre azul, verde, amarelo ou vermelho, além de enviar uma notificação imediata ao dispositivo. A aplicação também conta com um mapa interativo em tempo real baseado no *SDK do GoogleMaps*, que mostra tanto a localização atual do usuário quanto a posição do posto de alerta mais próximo, permitindo que o usuário visualize com precisão a área de risco. Esse componente reforça a integração entre o sistema embarcado e o usuário final, garantindo uma resposta ágil, precisa e voltada à segurança. A Figura 3

representa o sistema deste bloco.

Figura 3 – Aplicação móvel (sistema ativo e inativo)



5.1 Tecnologias utilizadas

Para o desenvolvimento do projeto como um todo, foi necessário utilizar um conjunto diversificado de ferramentas. Durante o decorrer das atividades, o *GitHub* foi utilizado como repositório *online* para armazenar e atualizar as informações de forma colaborativa, e o *Figma* para fazer a edição e criação das imagens e interfaces do aplicativo móvel, assim contribuindo para um design mais intuitivo e fácil.

O desenvolvimento do código fonte foi produzido por meio das plataformas *Android Studio* e *Arduino IDE*. A linguagem de marcação e estilização foi *XML*, juntamente com as linguagens de programação *Kotlin* e *C++*, responsáveis pela lógica da aplicação. O sistema também usou o banco de dados *Firebase*, especificamente o *RealTime DataBase*, para armazenar os dados e sincronizar as informações com o aplicativo móvel.

Para os componentes de *hardware*, o projeto foi operado a partir da placa microcontroladora *ESP32*, que tornou possível a integração com uma gama de sensores essenciais para o sistema. Entre esses sensores, os aplicados foram o de nível de água *Water Sensors*, *DHT11* sensor de temperatura e umidade, sensor de pressão barométrica

e por fim um *buzzer* para acionar os alertas sonoros.

6. RESULTADOS PARCIAIS

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos em um ambiente de laboratório controlado, com o objetivo de validar o funcionamento do hardware, a lógica do sistema embarcado e a precisão dos modelos matemáticos implementados antes da futura fase de testes em campo. O cenário de teste foi cuidadosamente projetado para simular um evento de alagamento rápido, inspirado nas condições hidrológicas do igarapé Jauari, localizado na cidade de Itacoatiara-AM. A abordagem de modelar fenômenos em escala e analisar dados de sensores é fundamental em pesquisas hidroambientais, permitindo a validação de sistemas de monitoramento antes de sua implementação (Anh et al., 2024).

6.1 Validação do Sensor de Nível e Modelo Hidrodinâmico

Para validar o sistema de detecção, foi utilizado um recipiente cilíndrico para a coleta de água, servindo como um modelo físico em escala da área a ser monitorada. As dimensões e os parâmetros do recipiente foram definidos da seguinte forma:

- Raio do Cilindro (r): 3 cm (ou 30 mm)
- Altura Máxima do Sensor (hmax): 4.5 cm (ou 45 mm)

O volume máximo de água que o recipiente pode comportar dentro da faixa de leitura do sensor foi calculado utilizando a fórmula do volume de um cilindro, estabelecendo a capacidade total do nosso sistema de medição:

$$V_{total} = \pi r^2 h_{max}$$

Substituindo os valores, foi obtido o volume máximo:

$$V_{total} = \pi \cdot (3 \text{ cm})^2 \cdot 4.5 \text{ cm} \approx 127.2 \text{ cm}^3 \text{ (ou 127.2 mL)}$$

Durante os ensaios, o sistema foi programado para não apenas medir o nível da água (*hlido*), mas também para calcular o volume atual (*Vatual*) em tempo real, fornecendo uma métrica mais intuitiva da acumulação hídrica.

6.2 Simulação de Enchente e a Lei de Torricelli

Para simular de forma realista a subida do nível da água de um igarapé, foi necessário projetar um orifício de entrada no recipiente que permitisse o seu enchimento em um tempo pré-determinado, representando uma enchente rápida (definimos uma meta de 30 segundos para enchimento completo). Para isso, aplicou-se a Lei de Torricelli, que descreve a velocidade de escoamento de um fluido através de um orifício.

A velocidade (v) com que a água entra no recipiente é dada por:

$$v = \sqrt{2gh_{externo}}$$

Onde g é a aceleração da gravidade (9.8 m/s²) e $h_{externo}$ é a altura da coluna de água externa ao recipiente (simulando o nível do "igarapé"). A vazão de entrada (Q), ou seja, o volume de água que entra por segundo, é o produto da área do orifício (A_{furo}) pela velocidade (v):

$$Q = A_{furo} \cdot v = (\pi r_{furo}^2) \cdot \sqrt{2gh_{externo}}$$

O objetivo era atingir uma vazão (Q) de aproximadamente 4.24 cm³/s (calculado a partir de 127.2 cm³ / 30 s). Assumindo, para o teste, uma altura de água externa constante de 5 cm (0.05 m), o raio do furo (r_{furo}) foi determinado:

$$4.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = (\pi r_{furo}^2) \cdot \sqrt{2 \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 \cdot 0.05 \text{ m}}$$

$$r_{furo} \approx 0.00117 \text{ m ou } 1.17 \text{ mm}$$

Com base neste cálculo, foi adotado um furo com diâmetro de aproximadamente 2.3 mm para o protótipo. Essa decisão de engenharia foi crucial para garantir que os testes de alagamento em laboratório fossem representativos, responsivos e baseados em princípios físicos.

6.3 Estabilidade e Resposta do Sistema em Teste

Durante os ensaios, foi observado que as leituras analógicas brutas do sensor de nível apresentavam pequenas flutuações devido a ruídos elétricos e variações na condutividade. O sistema respondeu exatamente conforme o esperado. Os dados de volume calculado (cm³) foram transmitidos em tempo real para o *Firebase* e exibidos no Monitor Serial do *Arduino IDE* para depuração. Ao atingir o nível de alerta (*alertLevel*) pré-configurado, o sistema disparou imediatamente o alarme sonoro local (*buzzer*) e enviou a notificação de risco para o aplicativo móvel, concluindo com sucesso o ciclo de detecção e alerta. A tabela abaixo resume os dados coletados durante um dos ensaios de simulação de enchente.

Tabela 2 – Ensaio de Simulação de Alagamento em Laboratório

Tempo Decorrido(s)	Volume Calculado(cm ³)	Status do Sistema
0	5.6	Chuva
10	42.4	Risco Baixo
20	79.2	Risco Médio

25	98.9	Risco Alto
30	124.4	Alagando

Os resultados parciais confirmaram, portanto, que o protótipo *Water Sentinel* opera de maneira robusta e confiável em ambiente controlado. A aplicação de princípios da hidrodinâmica permitiu a criação de um cenário de teste válido, e o sistema demonstrou ser capaz de coletar dados com precisão, processá-los e acionar os mecanismos de alerta de forma eficaz e dentro do tempo de resposta esperado.

7. CONCLUSÃO

O projeto de desenvolvimento de um sistema embarcado para alerta de alagamentos demonstra como a tecnologia pode ser aplicada de forma prática para resolver problemas do dia a dia. Ao integrar sensores de medição e comunicação com um aplicativo móvel, o sistema oferece uma solução eficaz para monitoramento de áreas de risco.

De maneira geral, este trabalho mostra que, com uma boa organização de requisitos e aplicação prática dos conceitos de sistemas embarcados, é possível criar ferramentas que contribuem diretamente para a segurança e bem-estar das pessoas. Neste contexto, surgiu a ideia do *Water Sentinel* que visa auxiliar os cidadãos que são vulneráveis a eventos de alagamentos, tanto em regiões urbanas quanto em áreas do interior.

8. Considerações Finais

Este estudo demonstrou que um protótipo embarcado de baixo custo pode identificar níveis críticos de água e acionar alertas em tempo real com latência aceitável (< 5 s). Os testes em laboratório confirmaram a robustez do hardware escolhido, bem como a eficácia do filtro de suavização aplicado às leituras do sensor de nível.

As principais contribuições deste trabalho são:

1. **Arquitetura IoT acessível** capaz de ser replicada em comunidades com recursos limitados;
2. **Procedimento de calibração** que utiliza um modelo hidrodinâmico em escala reduzida para validar sensores de nível;
3. **Integração nativa com dispositivos móveis**, oferecendo notificações imediatas e interface intuitiva baseada em mapas.

Entre as limitações identificadas, destaca-se a ausência de um modelo preditivo fundamentado em dados históricos de precipitação e pressão atmosférica. Como perspectiva para trabalhos futuros, propõe-se a coleta de séries temporais de precipitação e nível de água em campo, com o objetivo de treinar modelos de *machine learning* voltados ao prognóstico de alagamentos; a ampliação da rede de nós sensor-atuador, com a investigação do uso da tecnologia LoRa em contextos com conectividade Wi-Fi limitada; e a realização de estudos comparativos de consumo energético, visando à otimização da autonomia do sistema em implantações permanentes. Em síntese, o Water Sentinel provou ser tecnicamente viável e socialmente relevante, alinhando-se às demandas por soluções resilientes para gestão de riscos hidrológicos na Amazônia.

REFERÊNCIAS

- FILHO, O. A. M.; CALVÃO, M. L. A Review of the Challenges and Technologies for Hydrological Monitoring in the Amazon Basin. *Water*, v. 14, n. 9, p. 1423, 2022.
- MARQUES, P. A. et al. Low-Cost Automated System for Water Level Monitoring Based on Image Processing and IoT. *Sensors*, v. 21, n. 15, p. 5092, 2021.
- ROSA, L. N. et al. Eventos hidrológicos críticos na Amazônia: monitoramento e alerta para a gestão de riscos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 27, e14, 2022.
- SANTOS, A. C.; LIMA, F. R. Aplicação de Filtros de Kalman e Médias Móveis Ponderadas para Redução de Ruído em Sinais de Sensores Ambientais em Plataformas IoT. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*, 2023.
- CASTRO, M. D. D. O. (2023). Uso de geotecnologias para mapeamento de manchas de inundação na cidade de Manacapuru/am para o fortalecimento do sistema de recursos hídricos. Phd thesis, universidade do estado do amazonas. Acesso em: 9 jun. 2025.
- ANH, V. T.; ANH, H. L.; KIEN, M. D.; HOAI, V.; NHAN, D. D.; KUMAR, U. S(2024). Stream analysis for a sub-catchment of red river (vietnam) using isotopic technique and recursive digital filter method. *Journal of hydro-environment research*, elsevier, v. 52, p. 1–16, jan. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jher.2023.11.001>. Acesso em: 9 jun. 2025.

CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais).
Dados
e Protocolos de Monitoramento. Disponível em: <http://www.cemaden.gov.br/>. Acesso
em: 11 jun. 2025.

SGB-CPRM (Serviço Geológico do Brasil). Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do
Amazonas - SAH Amazonas. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/sace/amazonas>.
Acesso em: 11 jun. 2025