

Sistema em Tempo Real de Monitoramento da Qualidade de Água e Prevenção de Mosquitos

William Marreiro Brito¹, Arthur Roberto da Silva¹, David Gabriel de Albuquerque Alves¹,
Viviane Menezes¹, Marcelo Martins da Silva¹, Thiago Werley Bandeira Silva¹

¹Universidade Federal do Ceará – Campus Quixadá
Av. José de Freitas Queiroz, 5003 – Cedro – Quixadá – Ceará – Brasil

{william04, arthurroberto, davidgabriel2102}@alu.ufc.br,
{vivianemenezes, mmartins, thiagowerlley}@ufc.br

Abstract. *Water quality is crucial for public health, especially in Brazil's semi-arid regions, where cisterns are widely used. Lack of monitoring promotes mosquito proliferation, spreading diseases like dengue, Zika, and chikungunya. This work proposes an embedded, autonomous, and low-cost system for real-time water quality monitoring, measuring pH, turbidity, and TDS. Using ESP32, LoRa, and solar energy, it ensures autonomy and connectivity in remote areas. Data is sent to an application on the Vercel for remote monitoring, and aerators are automatically activated to prevent mosquito breeding.*

Resumo. *A qualidade da água é crucial para a saúde pública, especialmente no semiárido brasileiro, onde cisternas são amplamente utilizadas. A falta de monitoramento favorece a proliferação de mosquitos transmissores de doenças como dengue, Zika e chikungunya. Este trabalho propõe um sistema embarcado, autônomo e de baixo custo para monitoramento em tempo real da água, avaliando pH, turbidez e TDS. Com ESP32, LoRa e energia solar, garante autonomia e conectividade em áreas remotas. Os dados são enviados para uma aplicação no Vercel para monitoramento remoto, e aeradores são ativados automaticamente para evitar mosquitos.*

1. Introdução

O Brasil enfrenta altos índices de dengue, zika, chikungunya e febre amarela, com surtos que impactam significativamente a morbidade e mortalidade [de Souza Fernandes et al. 2024]. Dados da Agência Brasil [Agência Brasil 2024] indicam que, até o primeiro semestre de 2024, mais de 1.600 óbitos por dengue foram confirmados, além de milhares de casos suspeitos. A principal causa desse cenário é a presença de água parada, que favorece a proliferação dos vetores dessas doenças. No semiárido brasileiro, onde longos períodos de estiagem sucedem curtas temporadas de chuva, a captação e o armazenamento de água em cisternas são essenciais para o abastecimento. No entanto, essas estruturas muitas vezes carecem de mecanismos adequados de controle da qualidade da água, tornando-se potenciais focos de contaminação [Machado et al. 2021]. Além disso, a água estagnada nesses reservatórios favorece a proliferação do *Aedes aegypti*, vetor de arboviroses [Bermudi et al. 2017]. Um levantamento do Ministério da Saúde em 2022 revelou que 42% dos criadouros do mosquito estavam em depósitos de água para consumo humano, evidenciando a necessidade de manutenção adequada desses reservatórios para conter a disseminação dessas doenças [Ministério da Saúde 2022a].

Além do impacto na saúde pública, a qualidade da água também é um fator crítico para a manutenção da vida e do equilíbrio dos ecossistemas. A água é essencial em atividades humanas como abastecimento doméstico, irrigação agrícola e processos industriais [dos Santos et al. 2018]. Contudo, o crescimento populacional acelerado, a urbanização e a industrialização vêm comprometendo esse recurso natural. Um dos principais problemas é o descarte inadequado de águas residuais: estima-se que cerca de 80% dessas águas são lançadas em corpos hídricos sem tratamento, afetando a saúde ambiental e humana [Vardhan et al. 2019, UNESCO and UN-Water 2021].

Nesse cenário, torna-se essencial o monitoramento da qualidade da água em reservatórios e cisternas, tanto para garantir seu uso seguro quanto para mitigar a proliferação de vetores de doenças. Profissionais e pesquisadores têm investido no uso de sensores ambientais para medir parâmetros como concentração de oxigênio dissolvido, pH (potencial hidrogeniônico) e turbidez. Entretanto, a maioria desses sistemas disponíveis no mercado é proprietária, possui código-fonte fechado e apresenta alto custo de aquisição e manutenção, o que dificulta sua implementação em larga escala [Helal et al. 2018].

Com o avanço da tecnologia, especialmente dos sistemas embarcados e da Internet das Coisas (IoT), surgem alternativas viáveis e de baixo custo para o controle e monitoramento ambiental [Silva et al. 2023]. A IoT permite a conexão de dispositivos em rede para coleta, transmissão e análise de dados ambientais em tempo real. Quando integrada a sensores e sistemas inteligentes, essa tecnologia possibilita a automação de processos e a geração de alertas preventivos [Alam et al. 2017]. No contexto urbano, a IoT tem sido aplicada na criação de cidades mais ecológicas, seguras e eficientes, promovendo melhorias na qualidade de vida da população por meio do monitoramento ambiental [Lima et al. 2022]. Especificamente na área da saúde pública, sua aplicação em sistemas de sensoriamento e coleta automática de dados destaca-se como uma ferramenta estratégica [Silva et al. 2021].

Diante disso, este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado de monitoramento em tempo real da qualidade da água, com foco na prevenção à proliferação de mosquitos. A solução proposta utiliza o microcontrolador ESP32 e sensores capazes de medir parâmetros como pH, turbidez e TDS (*Total Dissolved Solids*). Os dados são transmitidos via redes LoRa (*Long Range*) e Wi-Fi, enquanto um mecanismo automatizado aciona aeradores sempre que forem detectadas condições propícias à reprodução de mosquitos.

2. Referencial Teórico

2.1. Desafios para o Monitoramento e Controle de Mosquitos

A proliferação de mosquitos vetores de arboviroses, como *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus*, representa um dos principais desafios para a saúde pública no Brasil. Essas espécies são responsáveis pela transmissão de doenças como dengue, zika e chikungunya, que apresentam elevada incidência em diversas regiões do país. Em 2024, foi registrado um aumento de 400% nos casos de dengue em relação ao ano anterior, evidenciando a expansão territorial desses vetores e o agravamento do cenário epidemiológico nacional [Conselho Federal de Enfermagem (COFEN) 2024].

A persistência desses mosquitos está diretamente relacionada a uma série de fatores, como sua elevada capacidade de adaptação ao ambiente urbano, o ciclo reprodutivo acelerado e a resistência dos ovos, que permanecem viáveis por longos períodos mesmo em ambientes secos. Além disso, o controle desses vetores depende fortemente da mobilização comunitária para a

eliminação de criadouros domiciliares, fator que muitas vezes compromete a efetividade das ações de controle [Ministério da Saúde 2022b].

Diante desse cenário, o controle vetorial tem sido realizado por meio de diferentes estratégias, incluindo a eliminação de locais propícios à reprodução, a aplicação de inseticidas químicos e a adoção de métodos de controle biológico. Entre essas medidas, o uso de inseticidas destaca-se pela sua eficácia e pela possibilidade de aplicação imediata em situações emergenciais. No entanto, o uso contínuo de compostos do grupo dos piretroides tem favorecido o desenvolvimento de resistência por parte do *Aedes aegypti*, reduzindo a efetividade dessas ações e comprometendo o sucesso das estratégias de combate à dengue [Solis-Santoyo et al. 2021].

2.2. Características de Medição

Estudos demonstram que os parâmetros físico-químicos da água influenciam diretamente a viabilidade do desenvolvimento de larvas do *Aedes aegypti*, reforçando a importância do monitoramento da qualidade da água para evitar ambientes propícios à proliferação desses vetores [Rasjid et al. 2024]. Entre os principais indicadores, destacam-se o potencial hidrogeniônico (pH), a turbidez e os sólidos totais dissolvidos (TDS), todos essenciais para a análise e o controle das condições ambientais que favorecem a reprodução do mosquito.

O potencial hidrogeniônico da água, pH, parâmetro que indica sua acidez ou alcalinidade, desempenha um papel fundamental na solubilidade de substâncias químicas e na dinâmica biológica dos corpos hídricos. De acordo com a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 [Brasil. Ministério da Saúde 2021], a faixa ideal de pH para águas potáveis está entre 6,0 e 9,5, garantindo a prevenção da corrosividade e a proteção dos sistemas de abastecimento, conforme diretrizes do Ministério da Saúde.

A turbidez, por sua vez, está associada à presença de partículas em suspensão que interferem na penetração da luz e comprometem a eficácia dos processos de desinfecção. Níveis elevados de turbidez dificultam a ação de agentes sanitizantes e favorecem a formação de biofilmes, criando um ambiente propício para a proliferação de microrganismos. Para a água destinada ao consumo humano, a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda que esse parâmetro não ultrapasse 5 Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU), um valor que está diretamente relacionado tanto à segurança microbiológica quanto à aceitabilidade estética da água [Organização Mundial da Saúde 2022].

Outro parâmetro relevante é a concentração de TDS, que inclui compostos orgânicos e inorgânicos presentes na água, como íons de cálcio, magnésio, sódio, potássio, cloretos e nitratos. Esses sólidos podem ter origem natural, resultante da mineralização de aquíferos subterrâneos, ou ser decorrentes de atividades antrópicas, como o escoamento agrícola, a irrigação e o lançamento de efluentes urbanos e industriais. Concentrações elevadas de TDS afetam negativamente a qualidade da água, prejudicando suas características organolépticas, como sabor, odor e aparência, o que compromete sua aceitação para consumo doméstico [Wang 2021].

3. Trabalhos Relacionados

O estudo de [Zulkifli et al. 2022] propõe um sistema embarcado para monitoramento da qualidade da água em tempo real, utilizando sensores para medir condutividade elétrica, pH, oxigênio dissolvido (DO) e ORP. Os dados são transmitidos via GSM 4G para servidores em nuvem, permitindo acesso remoto por dispositivos móveis e computadores. Além disso, a plataforma emprega machine learning para classificar a qualidade da água e estimar poluentes. Diferentemente dessa

abordagem, este trabalho adota LoRa e Wi-Fi para superar as limitações do GSM em áreas remotas. Outra inovação é o uso de energia solar, garantindo autonomia operacional sem depender da rede elétrica, tornando a solução mais robusta para aplicações em regiões rurais ou isoladas.

O estudo de [Costa et al. 2023] apresenta um sistema automatizado de monitoramento ambiental baseado no microcontrolador ATmega328, com sensores para pH, condutividade e temperatura. A comunicação ocorre via ZigBee, permitindo integração em redes sem fio (WSNs). A solução oferece uma interface intuitiva para monitoramento em tempo real, geração de relatórios e configuração de sensores e gateways. Embora eficaz na coleta de dados, essa abordagem possui limitações em relação ao presente estudo, que incorpora sensores adicionais, como o de turbidez, essencial para detectar patógenos e contaminantes [Acqua Nativa 2018]. Além disso, este sistema se diferencia pela inclusão de aeradores automatizados, prevenindo a estagnação da água e dificultando a proliferação de mosquitos vetores de arboviroses.

O estudo de [Abrajano et al. 2024] propõe um sistema para monitoramento da qualidade da água em comunidades rurais desconectadas das Filipinas. A solução emprega sensores de pH, turbidez e temperatura acoplados a um microcontrolador Arduino, transmitindo os dados via Wi-Fi ou GSM para um aplicativo web e móvel. Alimentado por energia solar, o sistema envia alertas por SMS quando os valores ultrapassam os limites de potabilidade. Testes confirmaram sua viabilidade técnica em cenários com infraestrutura limitada. Diferentemente dessa abordagem, este trabalho adota LoRa e Wi-Fi para maior alcance e confiabilidade em áreas remotas. Além disso, inclui um sistema de aeração automatizado acionado pelas leituras dos sensores, prevenindo a estagnação da água e reduzindo a proliferação de mosquitos vetores.

4. Metodologia

4.1. Visão Geral

O sistema proposto é composto por um conjunto de sensores conectados a módulos microcontroladores ESP32, responsáveis por monitorar parâmetros essenciais da qualidade da água, como TDS, turbidez e pH. A comunicação entre os módulos ocorre via protocolo LoRa, permitindo a transmissão de dados a longas distâncias com baixo consumo de energia.

A Figura 1 apresenta uma visão geral do sistema, destacando a comunicação entre os módulos e a distribuição dos componentes. Como ilustrado, o módulo externo coleta continuamente os parâmetros da água e, caso necessário, ativa o aerador para evitar a estagnação do reservatório. Simultaneamente, os dados são transmitidos via LoRa para o módulo interno, que os processa e os disponibiliza para consulta remota, permitindo que o usuário acompanhe o estado do reservatório e tome decisões baseadas nas informações coletadas.

O funcionamento do sistema se baseia na interação entre dois módulos ESP32. O primeiro, denominado módulo externo (ESP32 Slave), é instalado diretamente no reservatório e realiza a coleta de dados dos sensores, além de controlar o aerador sempre que as medições indicam condições favoráveis à proliferação de mosquitos. O segundo, chamado módulo interno (ESP32 Master), está localizado em uma estação remota, como uma casa ou um centro de monitoramento, e tem a função de receber as informações enviadas pelo módulo externo. Esses dados são então encaminhados para uma aplicação web, onde podem ser acessados em tempo real por meio de uma interface de monitoramento.

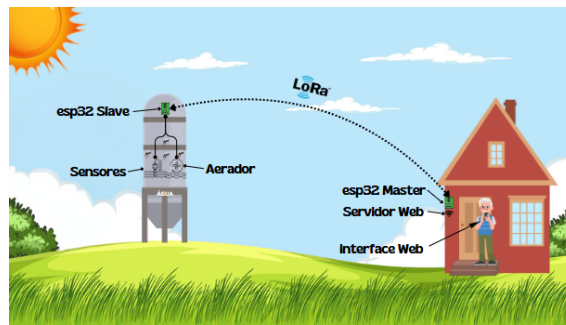


Figura 1. Visão geral do projeto

4.2. Desenvolvimento do Hardware

Na fase de especificação dos requisitos, foram definidos os principais objetivos do sistema. O projeto deve ser capaz de medir, em tempo real, os parâmetros de qualidade da água, como pH, turbidez e TDS. Além disso, foi projetado para ativar automaticamente um aerador, evitando a estagnação da água. O sistema foi planejado para ser autônomo, operando com energia solar e baterias recarregáveis, e capaz de transmitir dados a longas distâncias por meio de comunicação LoRa, garantindo funcionalidade mesmo em áreas remotas. A figura 2 mostra a arquitetura de serviços e comunicação entre os módulos ESP32 LoRa, tanto no módulo interno quanto no módulo externo.

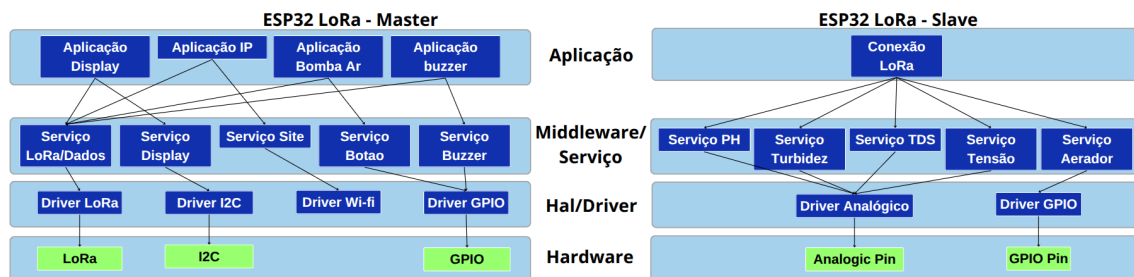


Figura 2. Arquitetura do projeto

O sistema foi estruturado em dois módulos principais: o módulo externo (cliente), responsável pela coleta de dados e acionamento do aerador, e o módulo interno (servidor), que processa as informações e disponibiliza os dados para monitoramento remoto. Ambos programados utilizando a Arduino IDE.

4.2.1. Módulo Externo (cliente)

O módulo externo é responsável pela coleta de dados da água e controle do aerador. Ele utiliza um ESP32, que realiza a leitura dos sensores, processa as informações e envia os dados coletados para o módulo interno via LoRa. O módulo conta com os seguintes sensores:

- Sensor de pH: Mede a acidez ou alcalinidade da água, permitindo avaliar sua adequação para consumo e identificar possíveis contaminações. Para o projeto, foi utilizado o sensor de pH com o módulo de leitura PH0-14.
- Sensor de turbidez: Detecta a presença de partículas suspensas na água, um indicador importante de qualidade e pureza. Este sensor funciona a uma tensão de 5v, então foi-se necessário incluir um sensor de tensão para medir sua saída.

- Sensor de TDS: Mede a concentração de sólidos dissolvidos na água, o que pode indicar a presença de minerais ou contaminantes.

Os sensores mencionados, juntamente com uma bateria e um sensor de tensão, são conectados a um ADS1115 (módulo conversor analógico digital de 16bits, utilizado para medir variações de tensão) para garantir uma leitura de maior resolução. Seu uso permite uma medição mais precisa dos sensores, além de possibilitar o monitoramento da porcentagem da bateria.

O aerador é acionado por relé, com funcionamento baseado em sensores ou temporizador pré-definido. O módulo é alimentado por painéis solares conectados a uma bateria recarregável, garantindo operação autônoma e eficiente. O circuito de carregamento utiliza um módulo de carregamento e proteção TP4056, com uma bateria de lítio. O painel solar possui 6W e é suficiente para carregar a bateria em algumas horas de insolação. As figuras 3 e 4 demonstram os componentes utilizados e a placa de circuito impresso desenvolvida, respectivamente.

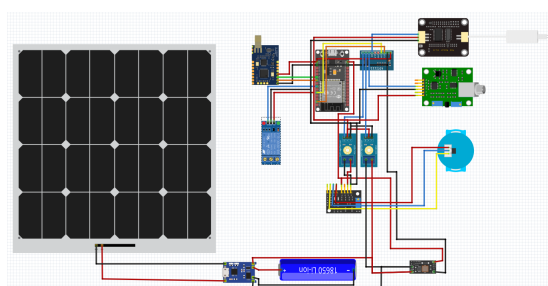


Figura 3. Circuito do módulo externo

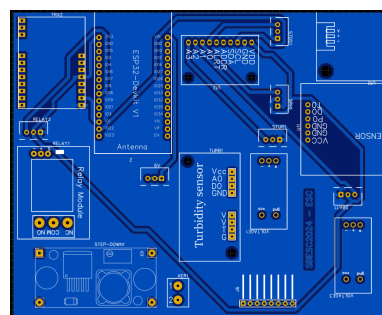


Figura 4. Placa de Circuito impresso

4.2.2. Módulo Interno

O módulo interno funciona como central de processamento e monitoramento, sendo responsável por receber, processar e exibir os dados coletados pelo módulo externo. Ele também é baseado em um ESP32, que recebe as informações via LoRa e as repassa para uma interface de monitoramento. Também é possível visualizar os dados coletados pela presença de um display OLED presente no protótipo. Esse módulo é integrado ao site: <https://eco-aqua-monitor.vercel.app/>, permitindo a visualização remota dos dados coletados.

A aplicação local é responsável por coletar dados como pH, turbidez, bateria e TDS e enviá-los para a API Strapi via requisições HTTP utilizando o método POST. O Strapi armazena esses dados e também gerencia todos os usuários do sistema, oferecendo os recursos por meio de uma REST API. Já o frontend, desenvolvido em React.js e hospedado na Vercel, consome essas informações através do método GET, exibindo os dados dos sensores e dos usuários em tempo real na interface da aplicação.

Além do monitoramento, o módulo interno permite a configuração dinâmica do sistema, possibilitando o ajuste de temporizadores de envio de dados e ativação do aerador conforme as condições da água, tanto remotamente pelo sistema, quanto fisicamente por um botão de navegação. Esse controle remoto facilita a adaptação do sistema a diferentes cenários e necessidades, otimizando o consumo energético. Nas Figuras 5 e 6 pode-se observar os componentes utilizados e o protótipo do módulo interno.

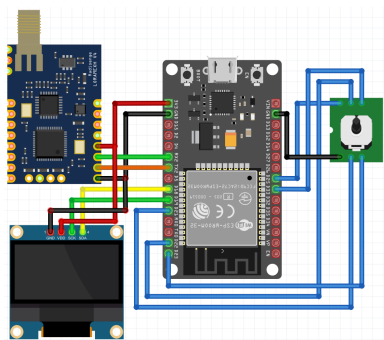


Figura 5. Circuito do módulo interno

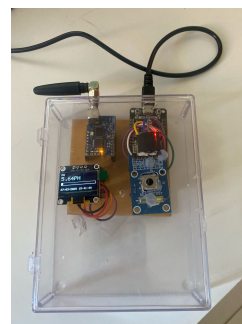


Figura 6. Módulo interno

4.3. Calibração e testes dos sensores

Para validar o funcionamento dos sensores, foi realizado um teste inicial para cada sensor com soluções em laboratório: O sensor de pH foi testado com misturas de água e vinagre em diferentes concentrações, permitindo verificar a variação dos valores medidos; O sensor de TDS foi testado comparando amostras de água da chuva e água tratada, enquanto o sensor de turbidez foi avaliado utilizando líquidos com diferentes níveis de opacidade para verificar sua sensibilidade a partículas suspensas.

Após os testes preliminares, os sensores passaram por uma validação laboratorial no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), onde as medições foram comparadas com equipamentos calibrados. Essa fase foi essencial para ajustar a calibração dos sensores e minimizar possíveis margens de erro. Para a programação, a conversão das tensões medidas pelo módulo ADS1115 foi realizada por meio de uma reta de calibração, construída com base em valores de referência e medições de uma amostra de água obtida por equipamentos próprios e calibrados, conforme ilustrado nas figuras 7, 8 e 9. Estas figuras mostram as relações de medição entre TDS, turbidez e pH em função dos valores de tensão.

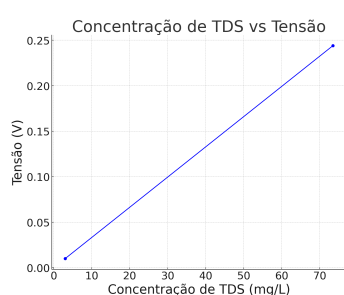


Figura 7

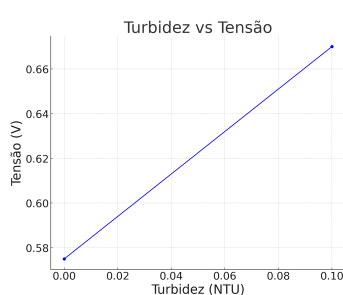


Figura 8

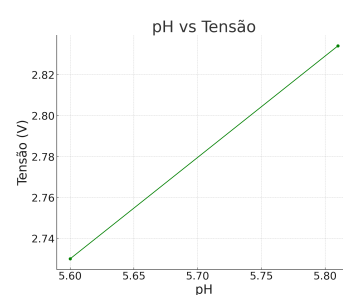


Figura 9

A precisão dos sensores e sua resposta às variações na qualidade da água foram monitoradas em laboratório, permitindo ajustes na lógica de acionamento do aerador e no envio de alertas de falhas nas leituras.

4.4. Sistema de comunicação e controle

A comunicação entre os módulos foi implementada utilizando o protocolo LoRa, que permite a transmissão de dados a longas distâncias com baixo consumo de energia. O módulo de comunicação selecionado foi o LoRaMESH da Radioenge, que oferece longo alcance, operando

na frequência 915 MHz, dependendo da região de operação. Projetado para garantir eficiência energética, o módulo proporciona baixo consumo, e sua capacidade de rede mesh permite a criação de redes ponto-a-ponto com roteamento automático e escalabilidade, tornando-o ideal para aplicações em ambientes com limitações de energia [Radioenge 2021].

As mensagens transmitidas seguem um padrão pré-definido pela equipe. Elas são compostas pela concatenação de algumas strings fixas junto aos valores lidos dos sensores, por exemplo: /turbXXX/tdsYYY/phZZZ/batAAA. Dessa forma, qualquer interferência ou valor lido fora desse padrão é descartado, garantindo a integridade da comunicação. Além disso, o módulo interno responde com uma confirmação, o que faz com que o módulo externo interrompa a transmissão e retorne ao modo de hibernação. O módulo só será reativado quando uma nova mensagem for recebida ou quando o temporizador de reenvio for acionado.

Para otimizar o consumo energético, foi implementado um mecanismo de *wake-up*, no qual o módulo interno ativa o módulo externo apenas quando necessário, utilizando os módulos *LoRa*. Dessa forma, o módulo externo permanece desligado na maior parte do tempo, economizando bateria. Ao receber uma mensagem, o módulo *LoRa* aciona um pino do *ESP32*, que processa os dados recebidos.

Além da transmissão de dados, o sistema conta com um mecanismo inteligente de controle do aerador, que pode ser ativado automaticamente com base nos valores medidos pelos sensores ou por temporizadores configuráveis pelo usuário. Isso garante flexibilidade na operação do sistema, permitindo que seu funcionamento seja ajustado conforme as necessidades específicas do ambiente monitorado.

A integração com interfaces de monitoramento remoto, como o site, possibilita que os usuários acompanhem os dados coletados de qualquer local, recebam alertas sobre mudanças na qualidade da água e ajustem as configurações do sistema conforme necessário. O fluxograma do funcionamento do projeto pode ser observado na Figura 10.

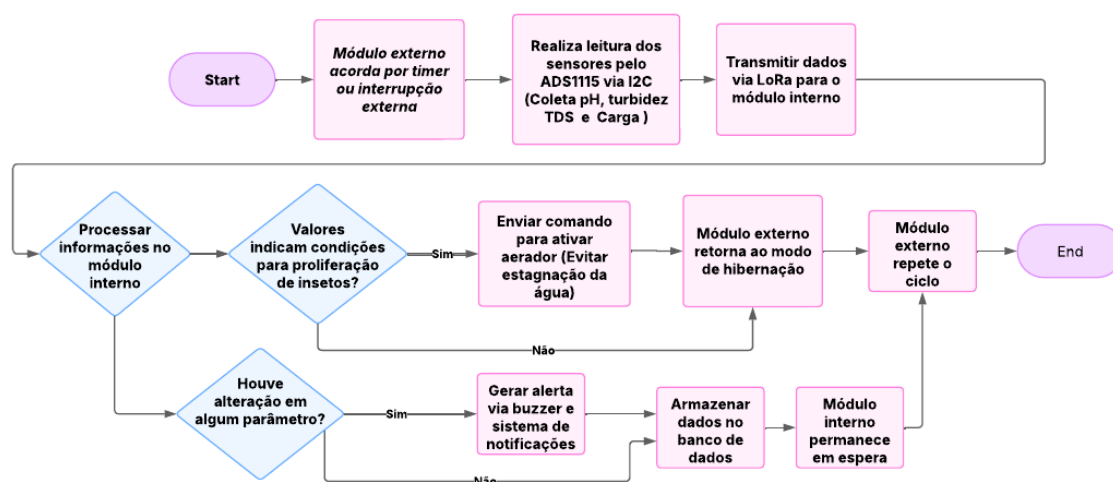


Figura 10. Algoritmo do sistema

5. Resultados e Discussões

Como citado na seção anterior, o sistema desenvolvido foi testado em ambiente controlado para avaliar sua eficácia no monitoramento da qualidade da água e na ativação automática do aerador.

Durante os experimentos, foram analisados o consumo energético e a precisão dos sensores. Com base nas especificações dos componentes, estimou-se o desempenho teórico do sistema. Um teste prático confirmou a eficácia e coerência com a análise teórica.

5.1. Monitoramento da qualidade da água

Os sensores integrados foram capazes de medir pH, turbidez e TDS em tempo real. Inicialmente, os testes foram realizados utilizando amostras de água tratada e água da chuva para verificar as diferenças nos valores obtidos. Os sensores apresentaram medições consistentes, identificando variações nos parâmetros com precisão suficiente para aplicações práticas.

5.2. Automação e Controle do Aerador

O aerador utilizado no protótipo foi escolhido como um modelo de referência, mas sua especificação deve ser ajustada conforme o tamanho e tipo de reservatório em que será aplicado. No projeto, o aerador operou com um consumo de 625 mAh, sendo alimentado pelas fontes de energia disponíveis, sem a necessidade de painéis solares de maior capacidade. No entanto, para aeradores com maior demanda energética, pode ser necessária a implementação de fontes adicionais para garantir um funcionamento contínuo e eficiente.

5.3. Comunicação e Monitoramento Remoto

Em testes em campo aberto, sistema demonstrou capacidade de transmissão de dados via LoRa, permitindo a comunicação eficiente entre o módulo externo (sensores e aerador) e o módulo interno (central de monitoramento) a longas distâncias. A transmissão foi bem-sucedida em um raio de até 1 km em campo aberto. No entanto, esse alcance pode ser facilmente ampliado com a instalação de antenas mais potentes, possibilitando a cobertura de áreas ainda maiores, dependendo das necessidades da aplicação.

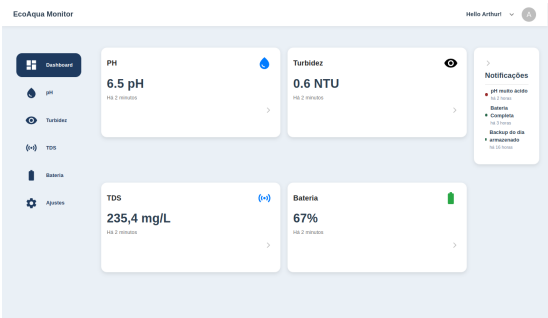


Figura 11. Dashboard do site

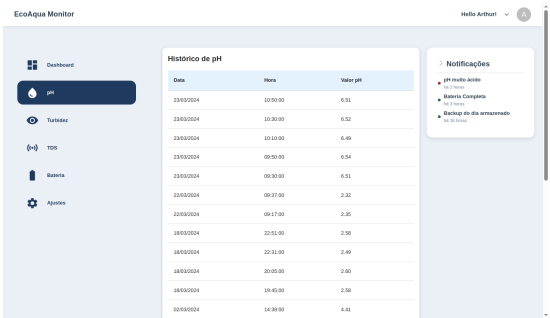


Figura 12. Tela de histórico de PH

Como parte da solução proposta, foi desenvolvido um site para visualização dos dados coletados pelo sistema embarcado. A aplicação foi hospedada na plataforma Vercel, permitindo acesso remoto e em tempo real às informações monitoradas. A figura 11 apresenta um dashboard com os valores atuais dos parâmetros de qualidade da água, como pH, turbidez e TDS. Além disso, a plataforma conta com abas específicas de monitoramento de cada parâmetro, como pode-se ver na figura 12 que exibe o histórico individual do pH facilitando o acompanhamento das variações ao longo do tempo, além disso, a aplicação conta também com uma aba de notificação, contribuindo para a identificação de anomalias.

6. Limitações e Ameaças a validade

O sistema embarcado desenvolvido pode apresentar limitações que afetam a precisão das medições. Um dos principais desafios foi observado durante os testes: o descalibramento do sensor de pH. Para minimizar esse efeito, é necessária a calibração periódica do sensor.

Outro fator a ser considerado é a ausência de um laboratório de química, uma vez que o projeto foi desenvolvido em um campus de Tecnologia da Informação, o que dificulta a validação dos sensores em um ambiente controlado. Para realizar testes mais precisos e comparar as medições com padrões laboratoriais, é necessário o deslocamento até o IFCE, onde há infraestrutura adequada para a calibração e verificação dos sensores. Essa limitação impacta a frequência das verificações e dos ajustes necessários para garantir a confiabilidade dos dados coletados.

Além disso, a equipe responsável pelo desenvolvimento é composta exclusivamente por profissionais da área de Tecnologia da Informação, sem especialistas em biologia ou entomologia. Isso limita a análise e a validação dos aspectos relacionados à prevenção de mosquitos, que dependem de conhecimentos específicos sobre os hábitos e ciclo de vida desses vetores. Dessa forma, a avaliação da eficácia do sistema nesse aspecto ainda permanece um desafio a ser enfrentado em trabalhos futuros, preferencialmente com colaboração multidisciplinar.

Por fim, as condições climáticas adversas também representam um desafio para o funcionamento do sistema, especialmente em relação à geração de energia solar. Em períodos de chuva intensa ou longos períodos nublados, a captação de energia é reduzida, impactando a autonomia do sistema [Campos and Alcantara 2016]. Entretanto o sistema se comportou bem, garantindo um tempo de operação satisfatório em dias nublados.

7. Considerações Finais

Este trabalho tem como foco principal o monitoramento da qualidade da água, reconhecendo sua importância para a saúde pública e sua relação com a prevenção de vetores como o *Aedes aegypti*. Embora possa contribuir nesse contexto, a proposta não se limita a essa aplicação específica, buscando oferecer uma solução acessível e eficaz para ambientes com risco sanitário.

Diferentemente de trabalhos relacionados, como os de [Zulkifli et al. 2022], [Costa et al. 2023] e [Abrajano et al. 2024], este estudo não apenas monitora a qualidade da água, mas atua preventivamente na proliferação de mosquitos por meio de um sistema automatizado de aeração. Utiliza comunicação LoRa e Wi-Fi, superando limitações de tecnologias como GSM e ZigBee, e emprega energia solar, garantindo autonomia em regiões remotas.

A principal inovação é a tradução direta das leituras dos sensores em ações automatizadas, reduzindo a intervenção humana. A arquitetura, baseada em componentes de baixo custo e longo alcance, é replicável e sustentável, adequada para políticas públicas e comunidades com recursos limitados.

Desafios como vedação do protótipo e consumo dos atuadores mostraram a necessidade de aprimorar a estrutura física e usar buffers para garantir resiliência contra falhas, levando a ajustes na arquitetura e gestão energética.

O projeto abre espaço para futuras pesquisas. A aplicação de inteligência artificial e aprendizado de máquina pode tornar o sistema mais inteligente, reconhecendo padrões e tomando decisões com base em tendências históricas. Corrigir a descalibração do sensor de pH é essencial. Pretende-se também ampliar os parâmetros monitorados, incluindo variáveis biológicas e indicadores climáticos, ampliando seu alcance para saúde ambiental e epidemiologia.

Referências

- Abrajano, J. V., Botangen, K. A., Nabua, J., Apanay, J., and Peña, C. F. (2024). Iot-based water quality monitoring system in philippine off-grid communities.
- Acqua Nativa (2018). Por que a turbidez é importante para a qualidade da água? Disponível em: <https://www.acquanativa.com.br/aplicacoes/turbidez-importancia.html>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- Agência Brasil (2024). Brasil atinge 1,6 mil mortes confirmadas por dengue. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2024-04/brasil-atinge-16-mil-mortes-confirmadas-por-dengue>. Acesso em: 23 fev. 2025.
- Alam, N., Vats, P., and Kashyap, N. (2017). Internet of things: A literature review. *2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*, pages 192–197.
- Bermudi, P. M. M., Kowalski, F., Menzato, M. M., Ferreira, M. d. C., Passos, W. B. S. d., Oku, V. J. A., Kumow, A., Lucio, T. V. F. M., Lima-Camara, T. N., Urbinatti, P. R., et al. (2017). Criadouro de aedes aegypti em reservatório subterrâneo de água da chuva: um alerta. *Revista de Saúde Pública*, 51:122.
- Brasil. Ministério da Saúde (2021). Portaria gm/ms nº 888, de 4 de maio de 2021: Estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Seção 1, p. 87–104. Acesso em: 19 mar. 2025.
- Campos, M. S. and Alcantara, L. D. (2016). Interpretação dos efeitos de tempo nublado e chuvoso sobre a radiação solar em belém/pa para uso em sistemas fotovoltaicos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(4 suppl 1):570–579.
- Conselho Federal de Enfermagem (COFEN) (2024). Dengue aumentou 400% no brasil em 2024 em comparação ao ano passado. Disponível em: <https://www.cofen.gov.br/dengue-aumentou-400-no-brasil-em-2024-em-comparacao-ao-ano-passado/>. Acesso em: 21 mar. 2025.
- Costa, F., Araujo, G., Belloze, K., Oliveira, S., Junior, L. A., Guerra, R., and Brandão, D. (2023). Sistema de monitoramento automatizado por meio de dispositivo embarcado de baixo custo. In *Anais do XIV Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais*, pages 121–130, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- de Souza Fernandes, C. O., de Souza Fernandes, D. R. A., Baracat, R. V. M., de Melo Silveira, P. T., and de Oliveira Braga, G. (2024). Arboviroses emergentes e reemergentes no brasil: dengue, chikungunya e zika. *Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences*, 6(8):5036–5048.
- dos Santos, R. M., da Silva Soares, C., Neves, F. F., and da Frota, V. B. (2018). Sistema de monitoramento da qualidade da água usando internet das coisas. *Internet das Coisas e Sustentabilidade: Propostas Tecnológicas*, page 28.
- Helal, A. A., Júnior, R. C., da Cunha Garcia, F., Barroso, G. F., and da Silva Villaça, R. (2018). Estacqua: Proposta de solução integrada de hardware, software e internet das coisas para monitoramento ambiental. In *Seminário Integrado de Software e Hardware (SEMISH)*. SBC.
- Lima, I., Sales, A., Domingues, M., and Moreira, A. (2022). Uso de iot para auxiliar na coleta de lixo urbano. In *Anais Estendidos do XVIII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*, pages 334–341, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.

- Machado, T. T. V., Dias, J. T., Azevedo Filho, A. C. d., Gadelha, C. L. M., and Silva, T. C. d. (2021). Avaliação da qualidade de águas de chuva armazenadas em cisternas de placas e de polietileno em um município do semiárido do estado da Paraíba. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 26:151–158.
- Ministério da Saúde (2022a). 42% dos criadouros do mosquito da dengue estão em depósitos de água para consumo humano. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/noticias/2022/maio/42-dos-criadouros-do-mosquito-da-dengue-estao-em-depositos-de-agua-para-consumo-humano>. Acesso em: 27 mar. 2025.
- Ministério da Saúde (2022b). Ministério da saúde alerta para a importância do combate ao aedes aegypti. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/noticias/2022/marco/ministerio-da-saude-alerta-para-a-importancia-do-combate-ao-aedes-aegypti>. Acesso em: 21 mar. 2025.
- Organização Mundial da Saúde (2022). *Diretrizes da qualidade da água potável: quarta edição, incorporando o primeiro adendo*. Organização Mundial da Saúde, Genebra. Acesso em: 23 mar. 2025.
- Radioenge (2021). Módulo loramesh - manual de utilização. Disponível em: <https://www.radioenge.com.br/produto/modulo-loramesh/>. Acesso em: 20 mar. 2025.
- Rasjid, A., Suaebu, S., and Budirman, B. (2024). Effect of water physico-chemical parameters on the development of aedes aegypti mosquito larvae in endemic areas. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, 8(12):8266.
- Silva, F., de Souza, B., and Werner, C. (2021). Catálogo para criação de jogos sérios para sistemas baseados em iot. In *Anais Estendidos do XX Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital*, pages 675–678, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Silva, F., Silva, E., Lopes, K., Brito, W., Bezerra, C., Silva, M., and Menezes, M. (2023). Arduino como ferramenta para ensino de programação em sistemas embarcados: Um relato de experiência. In *Anais do XXIX Workshop de Informática na Escola*, pages 670–681, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Solis-Santoyo, F., Rodriguez, A. D., Penilla-Navarro, R. P., Sanchez, D., Castillo-Vera, A., Lopez-Solis, A. D., Vazquez-Lopez, E. D., Lozano, S., Black, IV, W. C., and Saavedra-Rodriguez, K. (2021). Insecticide resistance in aedes aegypti from tapachula, mexico: Spatial variation and response to historical insecticide use. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 15(9):1–17.
- UNESCO and UN-Water (2021). *World Water Development Report 2021 – Valuing Water*. UNESCO, Paris.
- Vardhan, K. H., Kumar, P. S., and Panda, R. C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 290:111197.
- Wang, B. B. (2021). Research on drinking water purification technologies for household use by reducing total dissolved solids (tds). *PLOS ONE*, 16(9):1–14.
- Zulkifli, C. Z., Sulaiman, S., Ibrahim, A. B., Soon, C. F., Harun, N. H., Hairom, N. H. H., Setiawan, M. I., and Chiang, H. H. (2022). Smart platform for water quality monitoring system using embedded sensor with gsm technology. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 95(1):54–63.