



Uma Solução para o Monitoramento da Qualidade da Água em Bacias Hidrográficas Baseada em Internet das Coisas

Maria Luiza Ramos da Silva Marianna Gois De Campos
Rafael Bernardo Rocha

Technical Report - IC-24-03 - Relatório Técnico
November - 2024 - Novembro

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO

The contents of this report are the sole responsibility of the authors.
O conteúdo deste relatório é de única responsabilidade dos autores.

Uma Solução para o Monitoramento da Qualidade da Água em Bacias Hidrográficas Baseada em Internet das Coisas

Maria Luiza Ramos da Silva Marianna Gois De Campos Rafael Bernardo Rocha

Juliana Freitag Borin*

Campinas, Novembro de 2024

Resumo

A água é um dos recursos naturais fundamentais para a sobrevivência da humanidade e está incluída como sexto objetivo nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) determinados pela Organização das Nações Unidas (ONU), que consiste em garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos. Entretanto, no contexto das bacias hidrográficas nota-se a escassez e a finitude deste recurso, devido a questões naturais como baixa frequência de precipitações, utilização inadequada e excessiva ou pela devolução desse bem ao meio ambiente sem o tratamento adequado. Para que o objetivo 6 dos ODS da ONU possa ser cumprido é necessário que haja um monitoramento da qualidade da água, e com o auxílio de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) é possível coletar dos dados em tempo real e processá-los para que se tornem informações relevantes para determinar o estado da qualidade da água e então aplicarem medidas necessárias. Este trabalho, portanto, apresenta uma solução para o monitoramento da qualidade da água em bacias hidrográficas baseada em Internet das Coisas, com o objetivo principal de gerar insumos para os gestores das bacias hidrográficas para que possam tomar medidas adequadas relacionadas à qualidade da água e auxiliando então na garantia estabelecida pelo ODS 6.

Este projeto foi realizado durante a disciplina MO629 - Internet das Coisas - do Instituto de Computação da Unicamp.

1 Introdução

A preocupação com a água é uma prioridade nas discussões da Organização das Nações Unidas (ONU), que reconhece sua importância ao incluir o Objetivo 6 entre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) [1]. Esse objetivo visa garantir a disponibilidade, a qualidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos. No entanto, diversos fatores, como a degradação ambiental, desertificação, secas, degradação do solo, escassez de água doce e perda de biodiversidade, agravam os desafios para o cumprimento desse objetivo.

Esses desafios são particularmente evidentes no contexto das bacias hidrográficas, que desempenham um papel central na gestão dos recursos hídricos. Segundo [2], as bacias representam áreas de captação natural que direcionam o escoamento das águas para um rio principal até a sua foz. Esse sistema de drenagem é composto por nascentes, cursos de água e afluentes, que convergem em um ponto final chamado exutório, como explica [3]. Assim, as bacias hidrográficas têm sido adotadas como unidades estratégicas de análise para a tomada de decisões no gerenciamento hídrico.

*e-mail: juliana@ic.unicamp.br

Além de serem áreas de captação de água, as bacias hidrográficas constituem sistemas complexos que envolvem fatores ambientais e sociais. De acordo com [4], esses sistemas incluem não apenas os corpos hídricos, mas também o relevo, solo, fauna, flora e aspectos socioambientais que influenciam a qualidade e disponibilidade da água. Dessa forma, as bacias hidrográficas são uma referência geográfica adequada para implementar práticas de planejamento e gestão integrada dos recursos hídricos, promovendo uma abordagem sustentável e holística.

O Índice de Qualidade da Água (IQA) [5] é amplamente utilizado em estudos de bacias hidrográficas para medir a qualidade da água, especialmente com foco no abastecimento público. Criado em 1970 nos Estados Unidos pela National Sanitation Foundation e implementado no Brasil pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) a partir de 1975, o IQA se consolidou como a principal métrica para avaliar a condição das águas no país. O índice é composto por nove parâmetros principais, que incluem oxigênio dissolvido, coliformes termotolerantes, pH, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), temperatura, nitrogênio total, fósforo total, turbidez e resíduo total. Cada parâmetro possui um peso específico, que reflete sua importância para a qualidade geral da água, sendo os valores resultantes classificados em faixas que variam de "péssima" a "ótima".

De acordo com a descrição da ANA, o cálculo do IQA é realizado à partir da fórmula a seguir:

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

No cálculo do IQA, o valor final do índice é um número entre 0 e 100, que representa a qualidade global da água. Cada parâmetro de qualidade individual, denominado q_i , também é um valor entre 0 e 100, obtido a partir de gráficos específicos que correlacionam a qualidade do parâmetro à sua concentração ou medida. Além disso, cada parâmetro possui um peso associado, denominado w_i , que varia de 0 a 1 e reflete a importância relativa desse parâmetro na determinação da qualidade geral da água [5]. Esses pesos são ajustados para que a soma total deles, considerando todos os parâmetros n envolvidos no cálculo do IQA, resulte em 1.

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (2)$$

A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados para o cálculo do IQA, suas nomenclaturas e unidades de medida utilizadas na fórmula de cálculo.

Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Peso - w_i
<i>Coli termotolerantes</i>	Coli	NMP/100mL	0,15
<i>pH</i>	pH	-	0,12
<i>DBO5</i>	DBO	mg/L	0,10
<i>Nitrogênio total</i>	NT	mgN/L	0,10
<i>Fósforo total</i>	PT	mgP/L	0,10
<i>Temperatura</i>	DifT	oC	0,10
<i>Turbidez</i>	Turb	NTU	0,08
<i>Resíduos totais</i>	ST	mg/L	0,08
Oxigênio Dissolvido	OD	% saturação	0,17

Tabela 1: Parâmetros utilizados para a determinação de qualidade. [10]

Para enfrentar os desafios impostos pelo crescimento populacional, pela escassez de recursos hídricos e pelo envelhecimento das infraestruturas, torna-se essencial aprimorar as metodologias de monitoramento da qualidade da água. Como apontam [2], as práticas tradicionais de monitoramento baseadas na coleta manual e em análises laboratoriais são lentas e ineficazes, o que ressalta a necessidade de soluções mais ágeis e eficientes para garantir a segurança e a qualidade dos recursos hídricos.

Diante da necessidade de monitorar esses parâmetros em grandes áreas, como em uma bacia hidrográfica, o uso de tecnologias de coleta de dados automatizadas, como a Internet das Coisas (IoT), é uma solução eficaz. Em sistemas IoT, sensores distribuídos em locais estratégicos da bacia coletam dados de qualidade da água em tempo real, permitindo um monitoramento contínuo e detalhado. Esses sensores, conectados a uma rede de transmissão de dados, podem enviar informações diretamente para uma plataforma central, onde são processadas e armazenadas para análise. Essa abordagem minimiza a necessidade de coleta manual, reduz custos e possibilita uma resposta mais ágil a possíveis alterações na qualidade da água.

A integração do IQA com sistemas IoT em bacias hidrográficas apresenta grande potencial para aprimorar a gestão ambiental e o planejamento de recursos hídricos [10]. Ao fornecer dados em tempo real, esses sistemas possibilitam uma avaliação contínua e precisa da qualidade da água, facilitando a identificação de fontes de poluição e o desenvolvimento de estratégias de mitigação. Assim, a combinação do IQA com tecnologias IoT representa um avanço significativo para a gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente em áreas de grande vulnerabilidade ambiental.

A tecnologia da Internet das Coisas (IoT) surge como uma solução promissora para otimizar o monitoramento dos recursos hídricos. Segundo [6], o uso de sensores, sistemas embarcados e comunicação remota possibilita a coleta de dados em tempo real, simplificando a medição e avaliação da qualidade da água. Esse método tecnológico supera as limitações do monitoramento manual e oferece uma ferramenta precisa e eficiente para assegurar a gestão sustentável dos recursos hídricos. A LoRaWAN destaca-se entre as redes IoT de baixo consumo e longa distância (LPWAN), otimizando a duração da bateria, custo e alcance. Sua arquitetura, composta por dispositivos finais, gateways e servidores, facilita a interoperabilidade sem instalações complexas, permitindo a transmissão de dados por backhubs diversos (Wi-Fi, celular, Ethernet ou satélite). Com gerenciamento de rede, segurança e filtragem de pacotes redundantes, a LoRaWAN é especialmente vantajosa para monitoramento em áreas remotas e ambientalmente desafiadoras, como é o caso de bacias hidrográficas [7].

De acordo com [8], o protocolo de comunicação LoRaWAN é amplamente utilizado no contexto de IoT devido à sua eficiência em redes de sensores sem fio. Ele utiliza a modulação LoRa com espectro de espalhamento chirp (CSS), que oferece resiliência à interferência, baixo consumo de energia e resistência a efeitos de propagação múltipla e Doppler, que ocorre quando há variação na frequência da onda devido ao movimento entre fonte e receptor.

Padronizado pela LoRa Alliance, o LoRaWAN define o protocolo MAC e a arquitetura de sistema em uma topologia de rede em estrela, permitindo que cada dispositivo se conecte diretamente ao gateway, que retransmite os dados dos sensores para a rede principal. O uso de frequências ISM (Industrial, Científico e Médico), adotadas globalmente e disponíveis em bandas como 900 MHz, 2.4 GHz e 5 GHz, elimina custos de licenciamento e permite a operação eficiente dos dispositivos. LoRaWAN também inclui classes de dispositivos (A, B e C), que otimizam a eficiência energética regulando a comunicação de dados em intervalos específicos.

O gateway em uma rede LoRaWAN desempenha um papel fundamental ao conectar dispositivos finais (ou nós) a uma plataforma IoT, conforme descrito por [9], onde os dados coletados são processados e disponibilizados ao usuário. O gateway recebe as mensagens dos dispositivos, agrega informações sobre a qualidade da recepção e encaminha esses dados para plataformas IoT. Para

realizar essa transmissão, o gateway utiliza redes de alta largura de banda, como Wi-Fi, Ethernet ou redes celulares, garantindo a capacidade de lidar com o grande volume de dados provenientes dos dispositivos conectados.

Em um sistema IoT voltado ao monitoramento de uma bacia hidrográfica, o gateway permite a comunicação contínua de centenas ou milhares de sensores espalhados pela área, facilitando o monitoramento em tempo real de variáveis como a qualidade da água. Quando múltiplos gateways estão na área de cobertura dos dispositivos, todos recebem as mensagens, e a plataforma IoT aplica um algoritmo especializado para filtrar duplicatas e selecionar o gateway com melhor conectividade, otimizando a precisão e eficiência do monitoramento ambiental.

Neste trabalho é proposto uma solução tecnológica baseada em Internet das Coisas (IoT) e LoRaWAN para monitoramento da qualidade da água em bacias hidrográficas, com o objetivo de contribuir para o cumprimento do ODS 6 da ONU. Nas seções seguintes serão explorados, inicialmente, os estudos relacionados ao uso de tecnologias de baixo custo e baixo consumo energético no monitoramento ambiental, destacando pesquisas sobre o uso de redes LoRa em áreas de difícil acesso. Na Seção 3, detalharemos os objetivos do projeto, que incluem a implementação de uma rede de sensores IoT para medição contínua de parâmetros de qualidade da água e o cálculo do Índice de Qualidade da Água (IQA). A Seção 4 apresentará a estrutura e os componentes necessários para uma solução integrada, incluindo sensores, gateways, e uma plataforma IoT para coleta e visualização dos dados em tempo real. Por fim, discutiremos as possibilidades para futuros aprimoramentos na Seção 5.

2 Trabalhos Relacionados

A tecnologia LoRa tem sido amplamente explorada em soluções de monitoramento ambiental, especialmente para o acompanhamento da qualidade da água em áreas remotas e de difícil acesso. [11] aplicou uma rede de sensores sem fio baseada em LoRa para monitorar áreas costeiras, rios e valas, coletando parâmetros como turbidez, temperatura e condições climáticas. Os dados são enviados para um banco de dados central, formando um observatório ambiental e permitindo monitoramento interativo e análise contínua usando uma interface própria de usuário na Web.

Em outro caso [12], na França, um sistema de monitoramento da qualidade da água, baseado em LoRa, foi implementado na Bacia do Jardim Botânico, incluindo uma estação de coleta de dados e uma plataforma web para visualização em tempo real, com testes de desempenho que confirmam sua confiabilidade e eficiência.

Outra aplicação [13] é o sistema para o Rio Li, na China, que utiliza sensores para medir parâmetros como turbidez, pH e temperatura. Esse sistema processa os dados em uma plataforma de nuvem, permitindo a análise de padrões e a detecção de valores anômalos. Isso oferece uma base para a gestão da qualidade da água, com insights sobre variações sazonais e possíveis fontes de poluição.

[14] propôs uma arquitetura IoT baseada em LPWAN para o monitoramento de recursos hídricos em áreas andinas. Sensores capturam dados de temperatura, pH, oxigênio dissolvido e potencial de oxidação-redução (ORP). Em comparação a um dispositivo comercial, o protótipo é de baixo custo e apresentou uma autonomia de 8 dias, ressaltando os desafios de monitoramento em longo prazo, mas oferecendo uma alternativa econômica para monitoramento de áreas remotas.

No Brasil, a tese de doutorado [15], focada em ambientes subterrâneos, explora o uso de LoRa para monitorar redes de distribuição de água subterrâneas, ajustando a comunicação conforme a profundidade e avaliando os limites de desempenho em ambientes desafiadores. Outro destaque nacional é a solução implementada no Campus de Campina Grande da IFPB [16], apresentando

um sistema que contribui para estratégias avançadas de gestão hídrica, monitorando em tempo real o fluxo de água em áreas onde há escassez, auxiliando na mitigação da crise hídrica.

Além desses trabalhos, vale ressaltar que com a crescente discussão sobre sustentabilidade e uso de sensores biodegradáveis, [17] apresenta um estudo para monitorar condições adversas em plantações, incluindo temperatura e umidade do solo, mas utilizando uma bateria biodegradável de zinco-magnésio, o que consiste um sistema de monitoramento agrícola sustentável e de baixo custo, com autonomia de cerca de duas horas em operação contínua, ideal para ambientes onde soluções sustentáveis são prioritárias e uma possibilidade para evitar a poluição de corpos d'água.

3 Objetivos

O objetivo geral do projeto é propor uma solução baseada em Internet das Coisas (IoT) para o monitoramento da qualidade da água em bacias hidrográficas, visando fornecer dados em tempo real que auxiliem os gestores na tomada de decisões eficazes para a gestão sustentável dos recursos hídricos, em alinhamento com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 da ONU. Os objetivos específicos, alinhados com o objetivo estratégico de uso eficiente de recursos naturais e insumos da gestão hídrica, são:

- Prover um mecanismo inteligente para monitoramento contínuo da qualidade da água em bacias hidrográficas, utilizando sensores de baixo consumo para detecção de parâmetros críticos, como pH, turbidez e temperatura, conforme o índice de Qualidade da água (IQA).
- Prover um mecanismo de comunicação eficiente para transmissão de dados em tempo real, implementando a tecnologia de rede LoRaWAN em conjunto com sensores IoT, visando cobrir grandes áreas das bacias hidrográficas com baixo consumo energético.
- Prover uma solução de monitoramento com alta durabilidade e sustentabilidade, integrando sensores de baixo consumo com redes LoRaWAN, para otimizar a gestão da água nas bacias hidrográficas em alinhamento com o ODS 6 e a preservação do recurso.

4 Metodologia

Para atingir os objetivos definidos, é proposta uma solução de baixo custo, que agrega todos os dados mencionados para o cálculo do IQA e os agrega em uma plataforma de IoT open-source [18], permitindo coleta centralizada e monitoramento contínuo dos setores analisados. Desta forma, através de dashboards e alarmes customizados, é possível gerir e manter a saúde das bacias hidrográficas, de forma simples e completa. Seguindo o modelo publicado pelo BNDES em [19], a solução proposta tem as suas camadas de arquitetura representadas na Figura 1.

Como fonte de dados temos as bacias hidrográficas, rios, e outras nascentes de água que serão monitoradas. A nível de sensores, cada parâmetro necessário para cálculo do IQA requer um dispositivo específico. Além disso, também é necessário equipamento para alimentação de energia e comunicação com a rede LoRaWAN. A nível de rede é necessário um dispositivo gateway para comunicação entre o dispositivo e a rede LoRaWAN, onde seu papel é apenas de relay de dados, porém com acesso tanto à camada de rádio LoRa, quanto à Internet de forma geral, seja via Wi-Fi, ethernet, etc. [26]. Se comunicando com o gateway é necessário um Network Server, responsável pela gestão da rede e dos dispositivos conectados. Para suporte à solução é necessário um Application Server, completando a stack LoRaWAN, além de uma plataforma de dados IoT. Também é

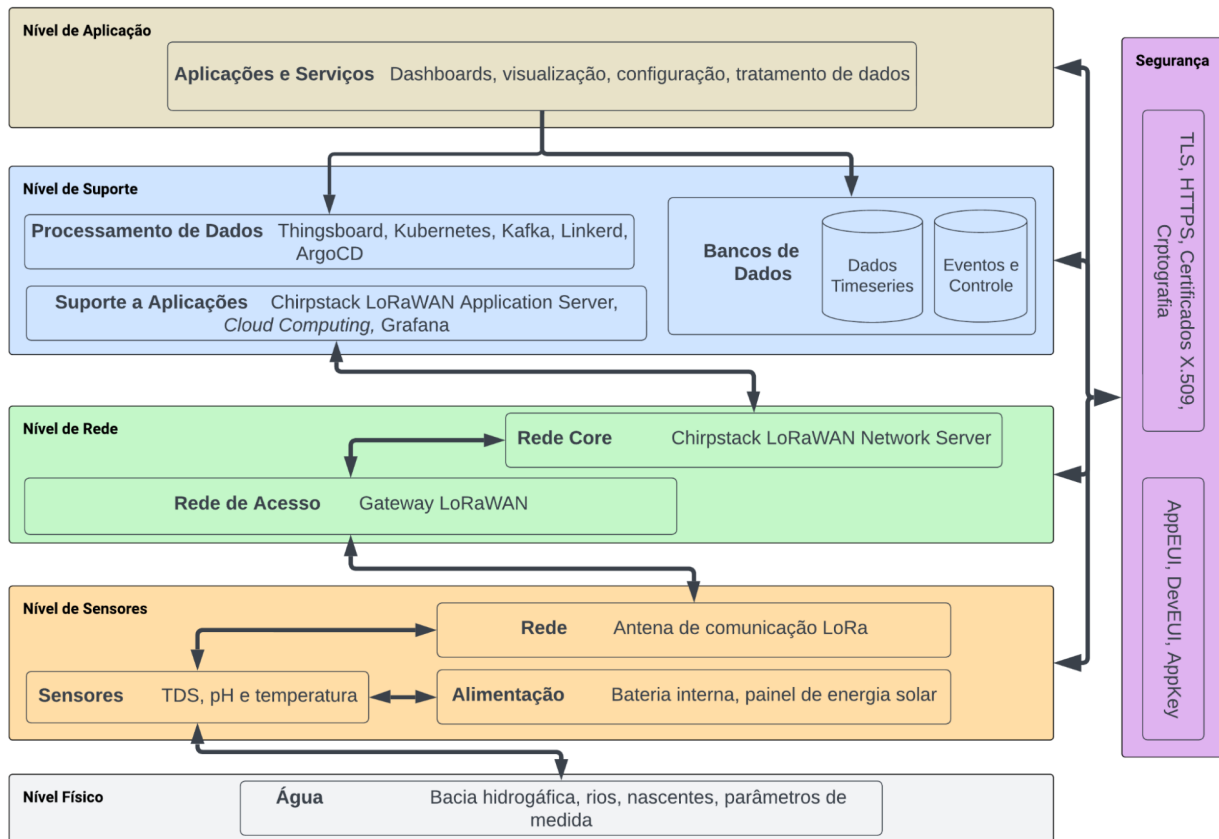


Figura 1: Arquitetura da solução no modelo BNDES

necessário um banco de dados, para armazenar todos os dados coletados e seu processamento. Finalmente, ferramentas como dashboards, aplicativos mobile, e outras aplicações de processamento, visualização e tratativa de dados completam a solução, interagindo com os dados crus e processados, permitindo monitoramento eficaz. Tudo isso com segurança de ponta-a-ponta, com tecnologias de criptografia, autenticação e autorização. Para uma visualização completa da solução proposta, foi utilizado um dispositivo físico com sensores de temperatura e turbidez (e outros parâmetros simulados), além de três sensores totalmente simulados, enviando dados através do fluxo de dados proposto. Estes sensores são denominados “Sensor Simulado 1”, “Sensor Simulado 2”, e “Sensor Simulado 3”.

Nas seções seguintes será abordado de maneira mais explícita o funcionamento do protótipo desenvolvido para implementar os objetivos descritos anteriormente na Seção 3.

4.1 Arquitetura da Solução

Para uma comunicação de ponta-a-ponta entre os sensores e a plataforma de agregação e monitoramento de dados, as seguintes peças foram necessárias [20]:

- Microprocessador com interface UART/SPI para conexão com o módulo LoRa;
- Sensores para coleta dos parâmetros necessários para o cálculo do IQA;

- Módulo de comunicação LoRa, conectado ao microprocessador do dispositivo de coleta de dados;
 - Deve atender a faixa de 915 MHz, utilizada no Brasil [21].
 - Responsável pela transmissão dos dados coletados pelos sensores.
- Gateway LoRaWAN, conectado à Internet;
 - Também deve atender a faixa de 915 MHz.
 - Responsável por receber os dados dos dispositivos e os transmitir para a plataforma final.
- Network Server, atrelado ao gateway;
 - Responsável por gerir os dispositivos a nível de rede, controlando pontos como acesso à rede, segurança e criptografia, etc.
- Application Server, atrelado ao Network Server;
 - Responsável por gerir aplicações dentro da estrutura LoRaWAN, definindo padrões de dispositivo, codificação e decodificação de payloads, e integração para plataformas de dados.
- Plataforma de Dados/IoT;
 - Armazenamento final dos dados, onde serão processados e monitorados.
 - Não faz parte da stack LoRaWAN, podendo ser um produto de mercado, ou solução interna.

A Figura 2 apresenta com detalhes a arquitetura de rede desenvolvida para a solução:

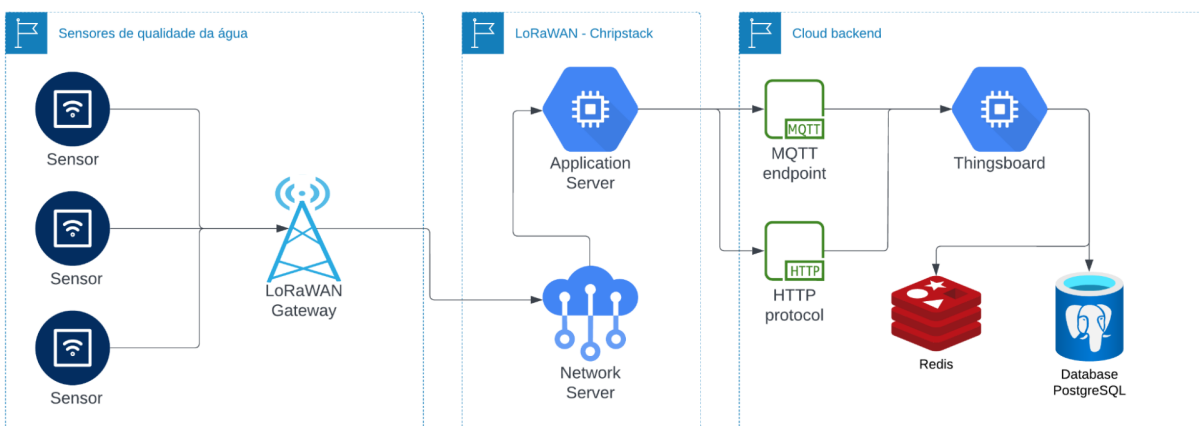


Figura 2: Arquitetura de rede

4.1.1 Comparativo de Tecnologias de Comunicação

Durante a concepção da solução, algumas tecnologias de comunicação foram analisadas, levando em conta as necessidades do projeto, e quais pontos positivos e negativos trariam. Como a solução envolve sensores espalhados em um grande território, tecnologias de curto alcance (WPANs - Wireless Personal Area Networks) não foram consideradas.

Um comparativo das tecnologias estudadas é apresentado na Tabela 2:

Tecnologia	Alcance de Transmissão	Consumo Energético	Taxa de Dados	Observações
<i>LTE-M</i>	Até 10 KM	Baixo	Até 1 Mbps	Maior consumo de energia, com foco em suporte a mobilidade
<i>NB-IOT</i>	Até 20 KM	Muito Baixo	Até 250 Kbps	Necessidade de infraestrutura celular, o que pode não estar presente
<i>5G</i>	Até 5 KM	Muito Alto	Até 20 Gbps	Alto consumo de energia
<i>SigFox</i>	Até 50 KM	Muito Baixo	Até 50 Kbps	Tecnologia proprietária, aumenta consideravelmente o custo do projeto
<i>LoRaWAN</i>	Até 15 KM	Muito Baixo	Até 50 Kbps	Tecnologia aberta, com alto alcance e baixo consumo de energia

Tabela 2: Comparativo de tecnologias de comunicação de longo alcance [36], [37], [38].

Desta forma, levando em consideração a baixa taxa de transmissão necessária do dispositivo (em torno de 50 bytes), e considerando a necessidade de baixo custo do projeto, a comunicação via LoRaWAN foi entendida como a mais apropriada para este projeto.

4.2 Ferramentas Utilizadas

Conforme mencionado anteriormente, diversos componentes são necessários para a coleta completa dos dados para análise das condições da água, até o tratamento final dos dados na plataforma em nuvem. Detalhamos cada um destes componentes, com foco em sua utilização na solução proposta.

4.2.1 Microprocessador

Para o protótipo da solução, foi utilizado um ESP-12E, conectado ao módulo LoRa via a interface UART, e aos sensores através de cabos jumper (Figura 3).

4.2.2 Sensores

Para análise completa do IQA, nove parâmetros são analisados. A seguir, descrevemos cada um dos parâmetros e como os sensores coletam tais dados.

Demanda Bioquímica de Oxigênio: De acordo com [22], “A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) indica a quantidade de oxigênio consumida nos processos biológicos de degradação da matéria orgânica no meio aquático. A DBO de uma amostra de água é geralmente medida em

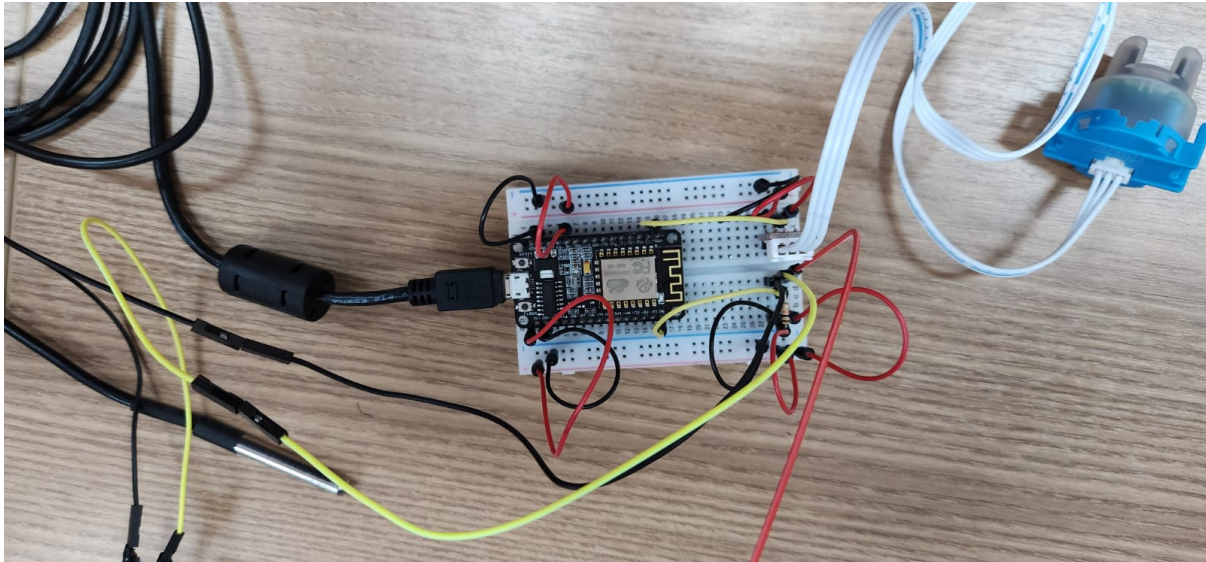


Figura 3: ESP32 com sensores conectados

laboratório, por meio de um bioensaio no qual é medido o consumo do oxigênio pelos microrganismos presentes nas amostras de água em condições controladas. A DBO é um bom indicador da poluição por cargas orgânicas nos corpos hídricos.”. O sensor atua coletando periodicamente uma amostra de água, e através de reações químicas com dióxido de carbono, avalia a presença de DBO [23].

Coliformes Termotolerantes: Segundo [29], “coliformes termotolerantes são bactérias que apresentam a capacidade de utilizar a lactose como nutriente, produzindo gás a temperatura de 44-45,5 °C. Sendo que 90% de *Escherichia coli* correspondem a este grupo.”. Mensurar tais bactérias é um ponto complexo, porém há sensores em desenvolvimento para obter essas medidas de forma automatizada [30].

Potencial Hidrogeniônico - pH: De acordo com [31], “O pH é uma medida do grau de acidez ou alcalinidade da água, sendo 7 o pH neutro. Valores acima de 7 (até 14) indicam o aumento do grau de alcalinidade e a seguir de 7 (até 0) o aumento do grau de acidez do meio.”. O sensor afere o pH da água através de coleta de e avaliação com um eletrodo, para obter o valor [31].

Oxigênio Dissolvido: “As águas poluídas por esgotos apresentam baixa concentração de oxigênio dissolvido pois o mesmo é consumido no processo de decomposição da matéria orgânica.”, conforme descrito em [34]. Sensores utilizam fibra óptica para analisar a água e coletar a medida deste valor.

Temperatura: Igualmente em [34], “A temperatura influencia vários parâmetros físico-químicos da água, tais como a tensão superficial e a viscosidade.”. Sensores utilizam termistores com proteção contra a água para aferir este parâmetro.

Nitrogênio Total: “Nos corpos d’água o nitrogênio pode ocorrer nas formas de nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato. Os nitratos são tóxicos aos seres humanos, e em altas

concentrações causa uma doença chamada metahemoglobinemia infantil, que é letal para crianças.”, também de acordo com [34]. O sensor utiliza reações químicas com amônia para coletar o valor deste parâmetro.

Fósforo Total: “Do mesmo modo que o nitrogênio, o fósforo é um importante nutriente para os processos biológicos e seu excesso pode causar a eutrofização das águas.”, segundo [34]. O sensor utiliza reações químicas com diversos elementos para obter a medida de fósforo.

Turbidez: “A turbidez indica o grau de atenuação que um feixe de luz sofre ao atravessar a água. Esta atenuação ocorre pela absorção e espalhamento da luz causada pelos sólidos em suspensão (silte, areia, argila, algas, detritos, etc.).”, similarmente em [34]. O sensor obtém os valores da turbidez através da combinação da transmissividade e taxa de dispersão da água [32].

Resíduo Total: “O resíduo total é a matéria que permanece após a evaporação, secagem ou calcinação da amostra de água durante um determinado tempo e temperatura.”, citado também em [34]. Sensores utilizam eletrodos e técnicas de eletroquímica para verificar o valor do parâmetro [33].

4.2.3 Módulo de Comunicação LoRaWAN

Coletados os dados, é necessário montar um payload em bytes com os valores obtidos. Como LoRaWAN é uma tecnologia de comunicação LPWAN - Low Power Wide Area Network [20], o baixo consumo de energia é uma de suas principais características. Porém, para atingir tal consumo, também é necessário uma baixa taxa de transmissão. Desta forma, apenas os bytes dos valores individuais são transmitidos, sendo necessário a criação de um codec no Application Server, para identificar a qual parâmetro cada valor pertence.

```
// Prepare upstream data transmission at the next possible time.
int sensorValue = 32;
// int -> byte array
byte payload[2];
payload[0] = lowByte(sensorValue);
payload[1] = highByte(sensorValue);
// transmit packet at the next available slot. The parameters are:
// - FPort, the port used to send the packet -- port 1
// - the payload to send
// - the size of the payload
// - if we want an acknowledgement (ack), costing 1 downlink message; 0 means we do not want an ack
LMIC_setTxData2(1, payload, sizeof(payload), 0);
Serial.println(F("Payload queued"));
```

Figura 4: Montagem de payload simulado e envio via biblioteca LMIC [24]

Para facilitar a comunicação entre o microprocessador e o módulo LoRa, foi utilizada uma biblioteca específica para Arduino [14], com toda a configuração do Network Server necessária. Com o payload finalizado, os dados são transmitidos através do módulo LoRa conectado ao dispositivo.

4.2.4 Gateway LoRaWAN

Conectando o dispositivo à infraestrutura LoRaWAN, o gateway (Figura 5) é responsável por transmitir mensagens recebidas de dispositivos próximos ao Network Server (uplink), e vice-versa

(downlink). Da mesma forma que toda a infraestrutura LoRaWAN, também pode ser construído com hardware e software abertos [25].

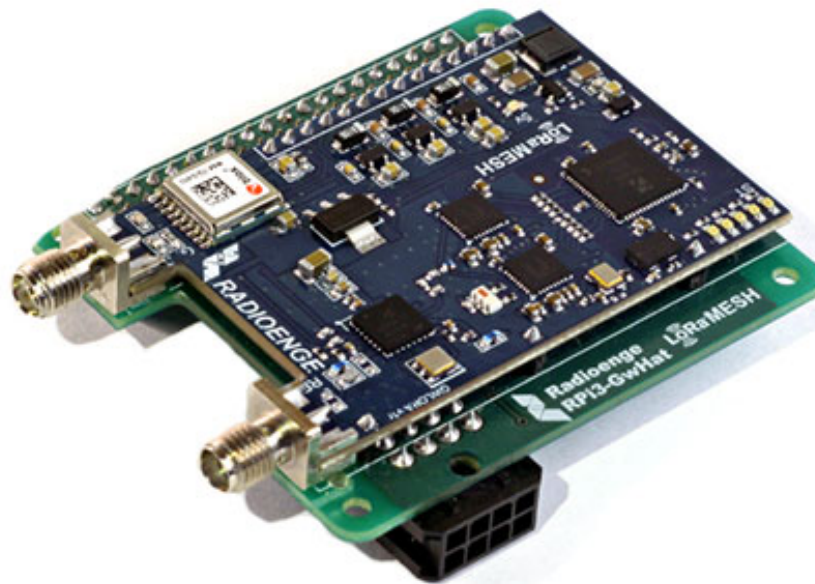


Figura 5: Gateway LoRaMESH Radioenge

4.2.5 Chirpstack

Chirpstack é uma plataforma open source que contempla todo o stack LoRaWAN, e pode ser facilmente instalado e configurado, seja no formato on-premises, ou em plataformas em nuvem [26]. O endereço e a porta (UDP) do servidor devem ser configurados no gateway, para que haja a comunicação correta (Figura 6).

Com o gateway configurado, é necessário definir uma aplicação (Figura 7), onde serão configurados os dispositivos, seus parâmetros de autenticação e transmissão, incluindo valores necessários para comunicação entre o dispositivo e o servidor (AppEUI, DevEUI) [20]. Estes valores são configurados no microprocessador do dispositivo, e são utilizados para o mesmo entrar na rede e obter suas credenciais de acesso.

Finalmente, é necessário configurar a integração do Chirpstack com a plataforma de dados final (Figura 8). Existem várias opções disponíveis, com configuração simples [35]. Para conexão com o protótipo, foi utilizada a plataforma Thingsboard.

4.2.6 Thingsboard

Thingsboard é uma plataforma de dados IoT open source, com ferramentas de coleta de dados, processamento e visualização, e gestão de dispositivos [27]. Após a configuração da integração

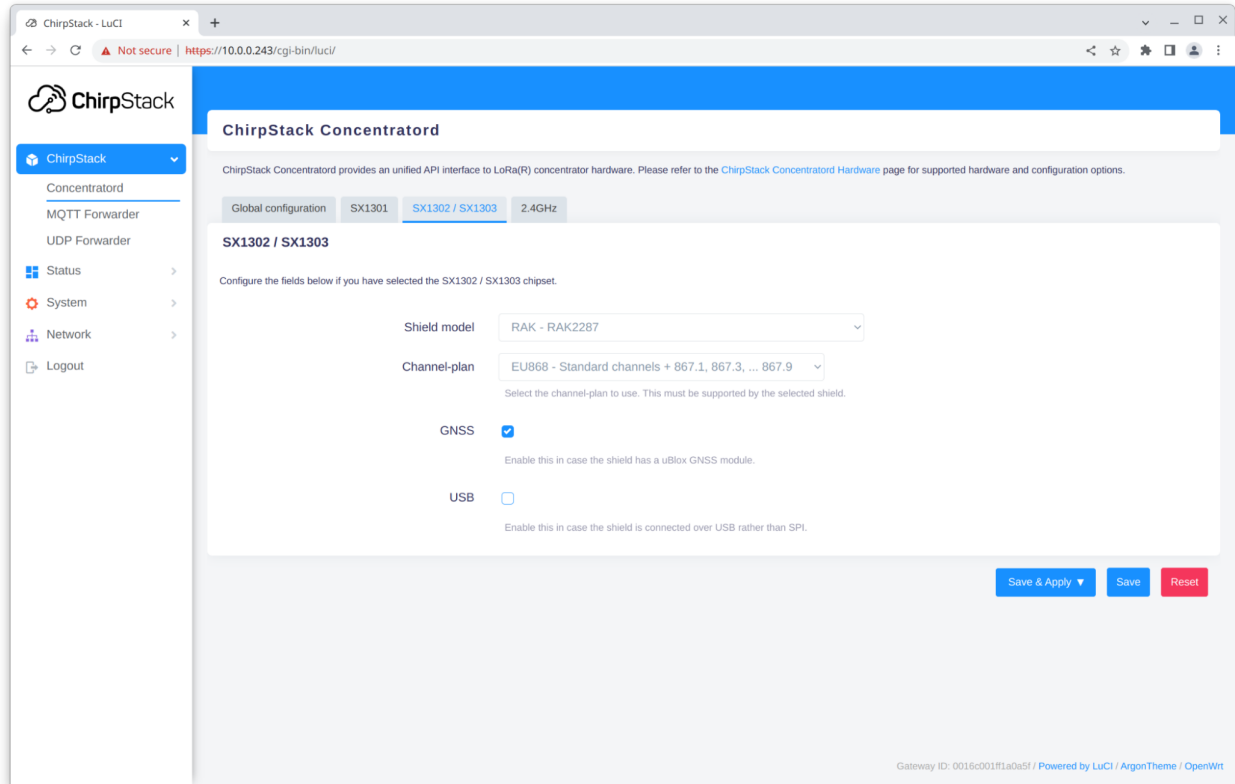


Figura 6: Exemplo de configuração do gateway Chirpstack OS

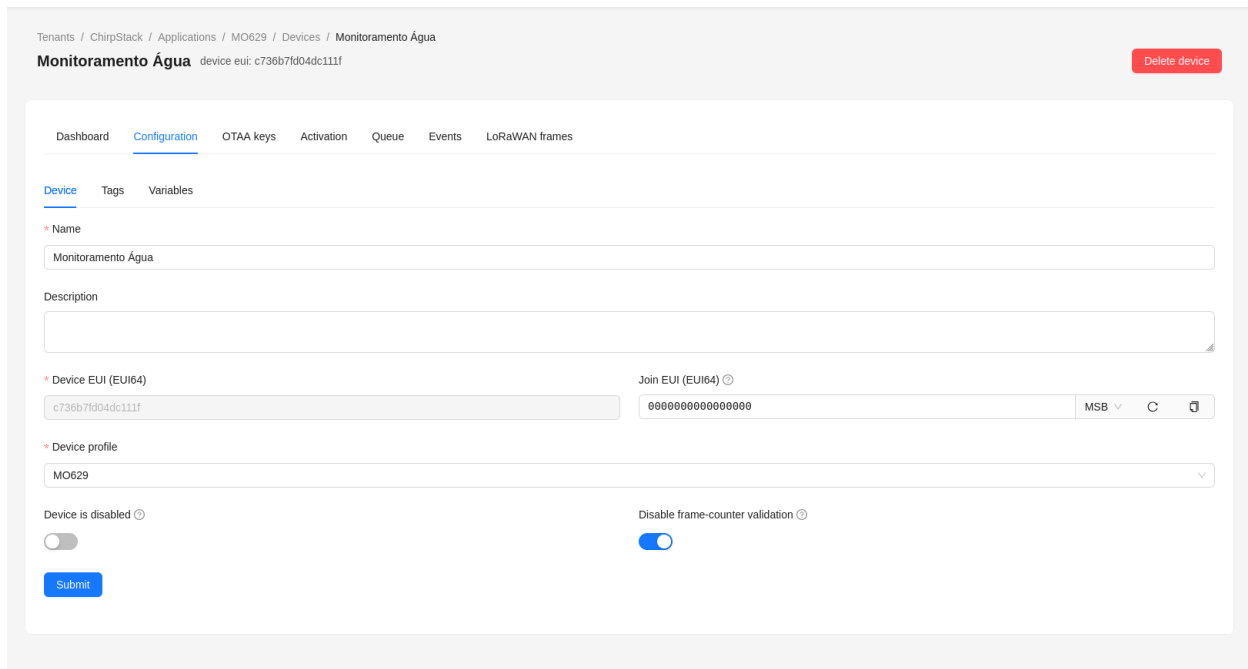


Figura 7: Configuração de aplicação no Chirpstack Application Server

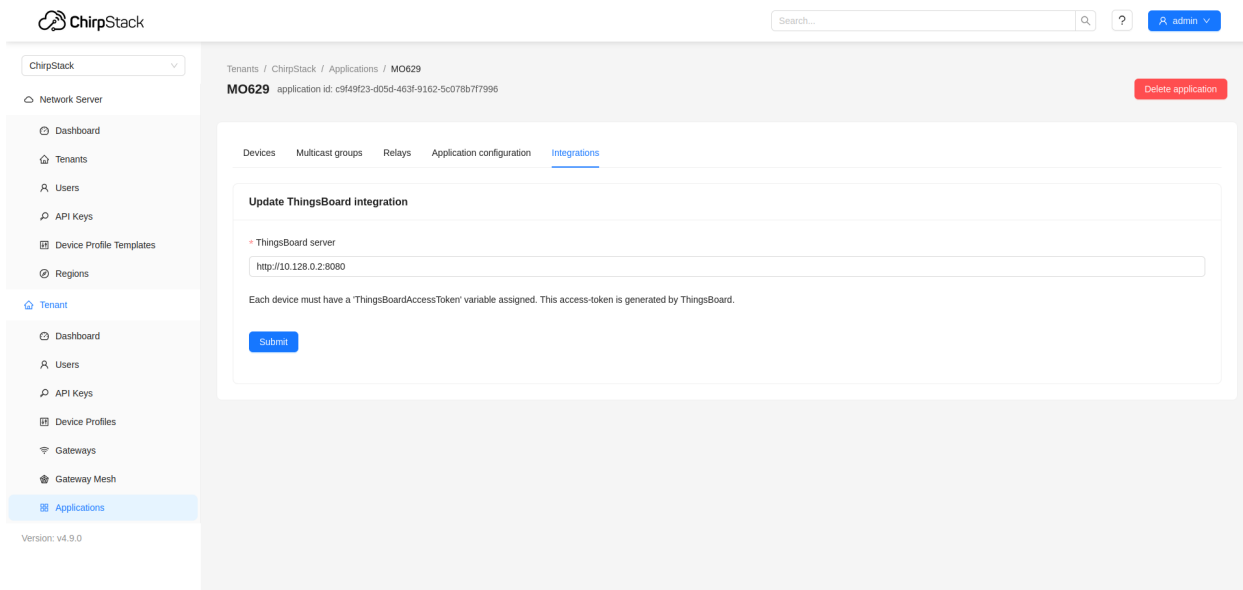


Figura 8: Configuração de integração entre Chirpstack e Thingsboard

no Chirpstack via protocolo MQTT, é necessário configurar os dispositivos no Thingsboard para iniciar a coleta de dados (Figura 9).

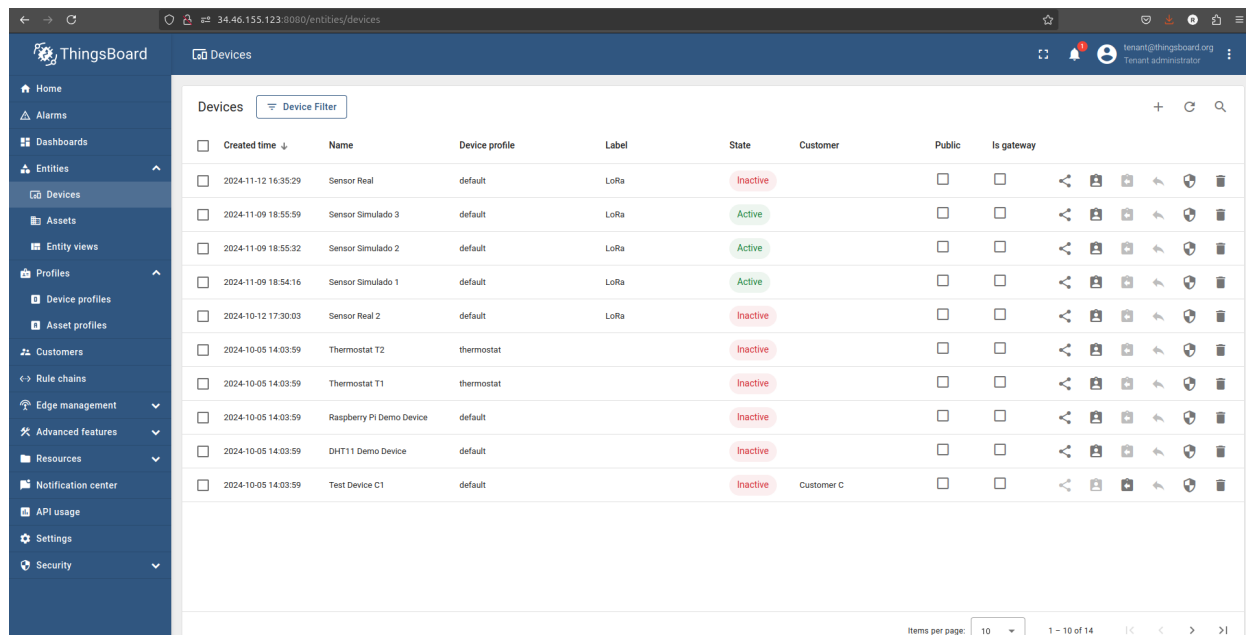


Figura 9: Dispositivos na plataforma Thingsboard

Com toda a configuração finalizada, é possível receber os dados enviados pelo dispositivo. Vale notar que é possível configurar diversas características do dispositivo, porém não foi necessário para o protótipo.

Para validar o IQA de cada dispositivo, é utilizado o componente Rule Engine do Thingsboard, um framework para customização da execução do Thingsboard, através de um workflow baseado

em eventos [28]. Foi criada uma validação através de um script que intercepta os dados recebidos, calcula o IQA, e adiciona o resultado ao payload, para tratativa e análise posterior (Figura 10).

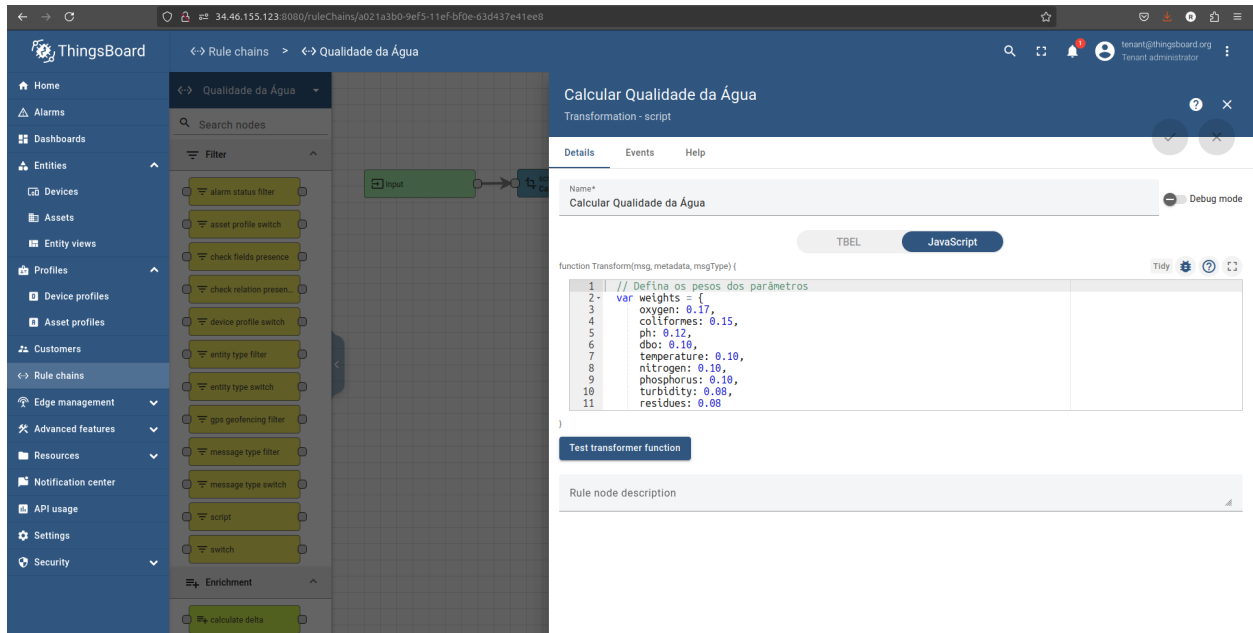


Figura 10: Configuração de script na Rule Engine do Thingsboard para cálculo em tempo real do IQA

Finalmente, com os dados sendo recebidos e o IQA calculado, é possível analisar os dados e identificar possíveis pontos de poluição precisos, de acordo com o monitoramento (Figura 11).

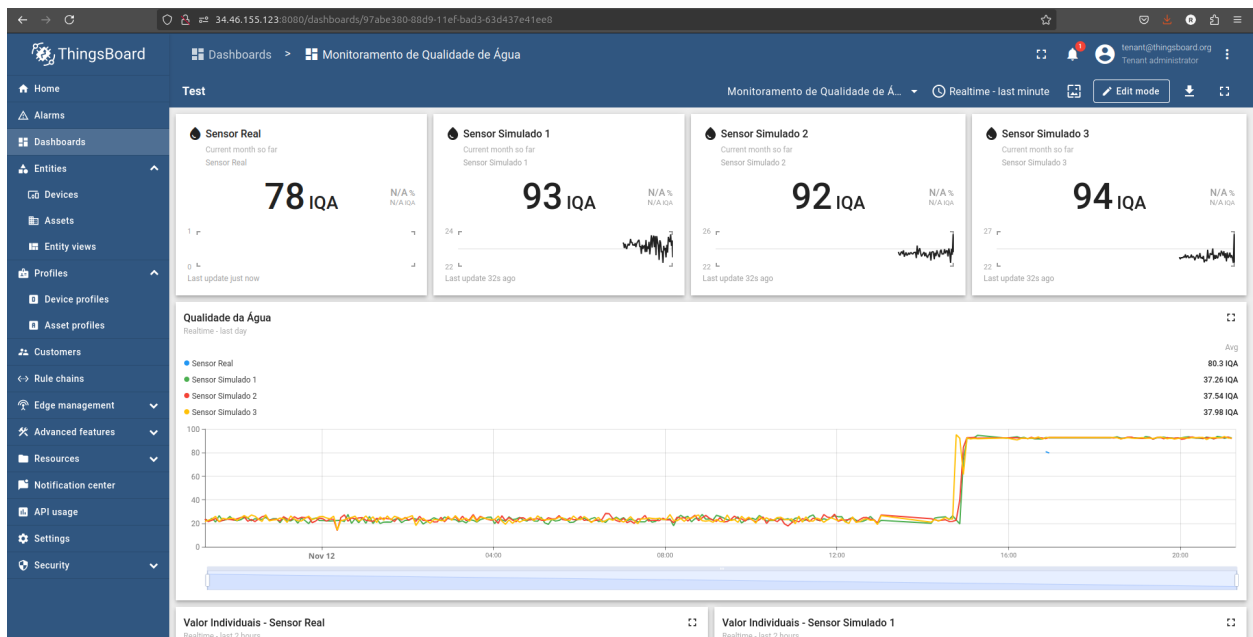


Figura 11: Dashboard Thingsboard

4.3 Coleta de Dados

Com todos os componentes apresentados, temos uma visão completa do fluxo de dados, desde a fonte à plataforma final (Figura 12).

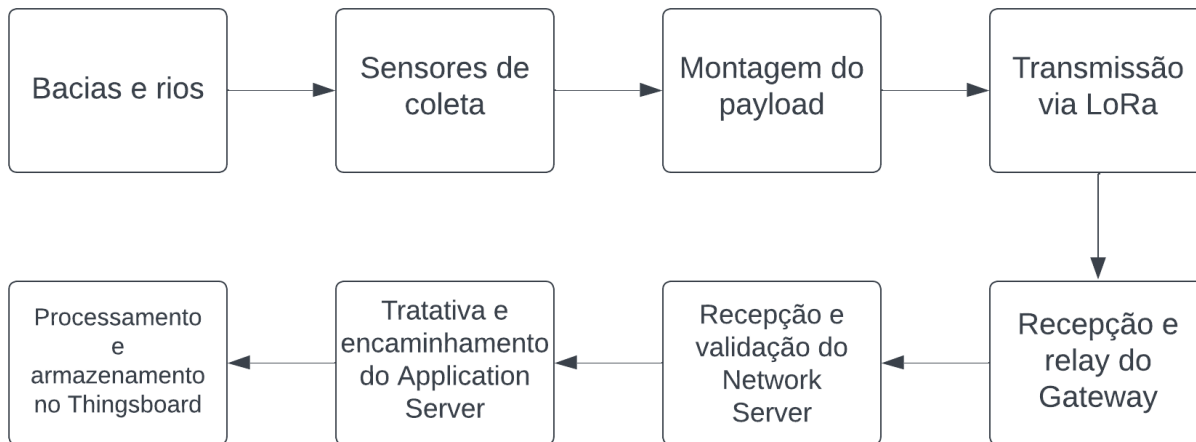


Figura 12: Fluxo de dados ponta-a-ponta

Com o fluxo completo, basta construir a visualização e o monitoramento.

4.4 Visualização de Dados

A plataforma Thingsboard permite a construção de diversos painéis e dashboards, trazendo uma visualização completa do sistema, com a evolução dos dados de forma granular. Para o protótipo, as seguintes visualizações foram construídas:

A Figura 13 apresenta um gráfico com os valores captados de cada sensor pelo tempo, com evolução e histórico de dado.



Figura 13: Evolução dos valores captados de cada sensor com mudança de ponto de coleta

Na Figura 14 é possível visualizar os valores individuais de cada parâmetro, separados por sensor.

Sensor	Temperatura	Turbidez	Coliformes	pH	DBO	Nitrogênio Total	Fósforo Total	Resíduos Totais	Oxigênio Dissolvido
Sensor Real 2	20 °C	70 NTU	97 CF	95 pH	90 DBO	92 NT	94 FT	88 RT	93 OD
Sensor Simulado 1	90 °C	96 NTU	98 CF	99 pH	97 DBO	87 NT	96 FT	86 RT	87 OD
Sensor Simulado 2	95 °C	99 NTU	98 CF	99 pH	91 DBO	93 NT	90 FT	94 RT	81 OD
Sensor Simulado 3	99 °C	96 NTU	96 CF	99 pH	92 DBO	85 NT	92 FT	91 RT	86 OD

Figura 14: Valores individuais de cada sensor

5 Conclusão

A implementação de soluções eficientes e sustentáveis para o monitoramento da qualidade da água em bacias hidrográficas é essencial para alcançar o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 da ONU, que visa garantir a disponibilidade, qualidade e gestão sustentável da água e do saneamento para todos. Neste contexto, este relatório apresentou uma solução baseada em Internet das Coisas (IoT) para monitoramento contínuo e eficiente da qualidade da água, utilizando a rede LoRaWAN.

A proposta explorou a integração do Índice de Qualidade da Água (IQA) como uma métrica central, calculada a partir de parâmetros como turbidez, temperatura e condições climáticas, com uma rede de sensores distribuídos e alimentados por LoRaWAN. A escolha do LoRaWAN deve-se ao seu baixo consumo energético, baixo custo e longo alcance, características que atendem diretamente às necessidades de monitoramento ambiental em áreas onde a manutenção e a conectividade são desafiadoras.

A infraestrutura de rede proposta, com a integração de gateway LoRaWAN, servidores de rede e duas plataformas IoT de código aberto (Chirpstack, ThingsBoard), foi configurada para garantir uma comunicação segura e eficiente dos dispositivos com um sistema central de monitoramento de dados. A solução emprega criptografia e autenticação para proteção dos mesmos, enquanto o uso do protocolo MQTT e do Rule Engine da ThingsBoard possibilita o processamento customizado e automatizado das informações, incluindo o cálculo do IQA em tempo real. Esse processo permite identificar pontos críticos de poluição da água com precisão, facilitando a tomada de decisões rápidas e baseadas em dados.

Ademais, o estudo reforçou a importância de alternativas econômicas e ambientalmente conscientes, como o uso de sensores biodegradáveis em pesquisas futuras, a fim de promover um monitoramento ambiental sustentável. A proposta apresentada se mostrou viável e alinhada às necessidades de monitoramento de longo prazo, combinando soluções tecnológicas acessíveis e eficazes para fortalecer a gestão hídrica e a preservação dos recursos naturais.

Para trabalhos futuros, recomenda-se realizar uma análise detalhada dos custos de implementação e manutenção dos dispositivos IoT utilizados, considerando sensores e outros componentes de comunicação, além do impacto financeiro da infraestrutura LoRaWAN em diferentes cenários. Adicionalmente, testes em campo com um número ampliado de nós e sensores distribuídos em uma rede mais densa podem fornecer dados fundamentais para validar a escalabilidade e a eficiência do sistema. Outra linha de pesquisa promissora envolve o estudo de estratégias otimizadas para

posicionamento dos nós, visando maximizar a cobertura de coleta de dados, reduzir a redundância e aprimorar a eficiência energética. Essas investigações contribuirão para definir configurações mais precisas e econômicas, adaptadas às características de cada bacia hidrográfica, promovendo um monitoramento mais eficaz e sustentável.

Referências

- [1] Nações Unidas Brasil. (2015). Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.
- [2] Porto, M. F., & Porto, R. L. L. (2008). Gestão de bacias hidrográficas. *Estudos avançados*, 22, 43-60.
- [3] Targa, M. (2008). Hidrologia e manejo de bacias hidrográficas. Taubaté: UNITAU.
- [4] Ross, J. L. S., & Del Prette, M. E. (1998). Recursos hídricos e as bacias hidrográficas: âncoras do planejamento e gestão ambiental. *Revista do departamento de geografia*, 12, 89-121.
- [5] Agência Nacional das Águas. (2024). Indicadores de qualidade da água no Brasil. Agência Nacional das Águas. <https://www.ana.gov.br/indicadores>
- [6] Budiarti, R. P. N., Tjahjono, A., Hariadi, M., & Purnomo, M. H. (2019, October). Development of IoT for automated water quality monitoring system. In 2019 International Conference on Computer Science, Information Technology, and Electrical Engineering (ICOMITEE) (pp. 211-216). IEEE.
- [7] Naoui, S., Elhdhili, M. E., & Saidane, L. A. (2016, November). Enhancing the security of the IoT LoraWAN architecture. In 2016 international conference on performance evaluation and modeling in wired and wireless networks (PEMWN) (pp. 1-7). IEEE.
- [8] Lavric, A., & Petrariu, A. I. (2018, May). LoRaWAN communication protocol: The new era of IoT. In 2018 International Conference on Development and Application Systems (DAS) (pp. 74-77). IEEE.
- [9] Petrariu, A. I., Lavric, A., & Coca, E. (2019, October). Lorawan gateway: Design, implementation and testing in real environment. In 2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME) (pp. 49-53). IEEE.
- [10] Silva, Maria Luiza Ramos da, Mariosa, Duarcides Ferreira, Falsarella, Orandi Mina, Conti, Diego de Melo, Brito, BRÍGIDA, Moraes, Marcela Barbosa, & Quaresma, Cristiano Capellani. (2023). Unlocking the Potential of Smart Watersheds: Leveraging Iot and Big Data for Sustainable Water Resource Management and Indicator Calculation. *Global Journal of Human-Social Science*, 23(H5), 23–32. <https://doi.org/10.34257/GJHSSHVOL23IS5PG23>
- [11] Sendra, S., Parra, L., Jimenez, J.M. et al. LoRa-based Network for Water Quality Monitoring in Coastal Areas. *Mobile Netw Appl* 28, 65–81 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11036-022-01994-8>
- [12] B. Ngom, M. Diallo, B. Gueye and N. Marilleau, "LoRa-based Measurement Station for Water Quality Monitoring: Case of Botanical Garden Pool," 2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Sophia Antipolis, France, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/SAS.2019.8705986.

- [13] Lu Q, Zou J, Ye Y, Wang Z. Design and implementation of a Li River water quality monitoring and analysis system based on outlier data analysis. PLoS One. 2024 Mar 18;19(3):e0299435. doi: 10.1371/journal.pone.0299435. PMID: 38498583; PMCID: PMC10947683.
- [14] González, L., Gonzales, A., González, S. et al. A Low-Cost IoT Architecture Based on LPWAN and MQTT for Monitoring Water Resources in Andean Wetlands. SN COMPUT. SCI. 5, 144 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42979-023-02515-4>
- [15] Villarim, A. W. R. (2023). Estudo do desempenho da transmissão subterrânea via LoRa para o monitoramento de sistemas subterrâneos visando aplicações em sistemas de distribuição de água.
- [16] Medeiros, Á. D. S. (2023). Monitoramento e medição de água em um campus inteligente com plataformas de IoT (Master's thesis).
- [17] S. Kurth, S. Voigt, R. Zichner, F. Roscher, P. Weigel and T. Großmann, "Technologies for biodegradable wireless plant monitoring sensors," 2021 Smart Systems Integration (SSI), Grenoble, France, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/SSI52265.2021.9466974.
- [18] <https://thingsboard.io/docs/>
- [19] <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-lanca-cartilha-sobre-uso-da-internet-das-coisas-na-criacao-de-cidades-inteligentes>
- [20] <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>
- [21] <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>
- [22] <https://qualidadedaagua.ana.gov.br/dbo.html>
- [23] <https://instrulab.com.br/produto.php?p=sistema-respirometrico-de-dbo-modelo-system-6-marca-velp>
- [24] <https://docs.arduino.cc/libraries/mcci-lorawan-lmic-library/>
- [25] <https://www.chirpstack.io/docs/chirpstack-gateway-os/index.html>
- [26] <https://www.chirpstack.io/>
- [27] <https://thingsboard.io/>
- [28] <https://thingsboard.io/docs/user-guide/rule-engine-2-0/overview/>
- [29] <https://lcqa.farmacia.ufg.br/p/21153-coliformes>
- [30] <https://www.parque.ufrj.br/ufrj-cria-sensor-que-detecta-agua-contaminada-em-20-minutos/>
- [31] <https://www.acquanativa.com.br/aplicacoes/kit-sensor-ph-com-arduino-5-passos.html>
- [32] <https://www.smartkits.com.br/sensor-de-turbidez-da-agua>
- [33] <https://cfq.org.br/noticia/pesquisadores-desenvolvem-um-sensor-portatil-para-deteccao-de-poluentes-e-analises-quimicas/>
- [34] <https://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>

- [35] <https://www.chirpstack.io/docs/chirpstack/integrations/index.html>
- [36] <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/modulation-data-rate/>
- [37] <https://www.sigfox.com/coverage/>
- [38] <https://revistaft.com.br/a-internet-das-coisas-iot-tecnologias-lorawan-e-sigfox/>